

Analisis Perhitungan Kebutuhan Zinc Anode Sebagai Sistem Proteksi Katodik pada Lambung Kapal Tugboat 28,5 Meter

Rendiansyah, Naufal Abdurrahman Prasetyo, Darti Purnama Sari, Yusuf Nurhuda, Ita Wijayanti

* Politeknik Negeri Batam

Program Studi Teknologi Rekayasa Konstruksi Perkapalan

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

¹E-mail: ra5529533@email.com

Abstrak

Korosi pada lambung kapal baja yang beroperasi di lingkungan laut merupakan permasalahan utama karena dapat menurunkan kekuatan struktur, memperpendek umur layanan, dan meningkatkan biaya pemeliharaan. Salah satu metode perlindungan yang efektif adalah sistem proteksi katodik menggunakan *zinc anode* sebagai anoda korban. Penelitian ini bertujuan menganalisis kebutuhan *zinc anode* pada kapal *tugboat* sepanjang 28,5 meter berdasarkan BKI Rules for the Classification and Construction 2026 Volume II Section 38 serta Guidance for the Corrosion Protection Pt.1 Vol.G Ch.1 Sec.8. Metode penelitian yang digunakan adalah kuantitatif dengan pendekatan analitis melalui perhitungan luas area basah, kebutuhan arus proteksi, berat anoda, jumlah anoda, jarak pemasangan, serta estimasi biaya pengadaan. Hasil penelitian menunjukkan luas area basah lambung sebesar 331,8 m², luas skeg 17,674 m², dan luas daun kemudi 4,18 m². Kebutuhan arus proteksi yang diperoleh berturut-turut sebesar 4.980 mA, 265,11 mA, dan 62,7 mA, sehingga total kebutuhan berat *zinc anode* selama umur proteksi lima tahun mencapai 313,74 kg. Konfigurasi yang direkomendasikan terdiri atas 26 unit *zinc anode* tipe S9E welded (12 kg) pada lambung, 2 unit tipe S8 (8 kg) pada skeg, dan 2 unit tipe S4 (4 kg) pada daun kemudi, dengan jarak pemasangan anoda pada lambung sekitar 2,2 meter. Total estimasi biaya pengadaan *zinc anode* sebesar Rp68.831.928. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan standar BKI mampu menghasilkan perencanaan sistem proteksi katodik yang efektif untuk mengurangi risiko korosi, dan memperpanjang umur layanan struktur kapal.

Kata kunci: korosi, proteksi katodik, *zinc anode*, kapal *tugboat*

Abstract

Corrosion on the steel hulls of vessels operating in marine environments is a major issue, as it can compromise structural integrity, shorten service life, and increase maintenance costs. One effective protection method is a cathodic protection system utilizing zinc anodes as sacrificial anodes. This study aims to analyze zinc anode requirements for a 28.5-meter tugboat in accordance with BKI Rules for the Classification and Construction (2026, Volume II, Section 38) and Guidance for Corrosion Protection (Part I, Vol. G, Ch. 1, Sec. 8). A quantitative research method with an analytical approach was employed, involving calculations of the wetted surface area, required protection current, anode weight, number of anodes, installation spacing, and estimated procurement costs. The results indicate a hull wetted surface area of 331.8 m², a skeg area of 17.674 m², and a rudder blade area of 4.18 m². The calculated protection current requirements were 4,980 mA, 265.11 mA, and 62.7 mA, respectively, resulting in a total zinc anode weight requirement of 313.74 kg for a five-year protection lifespan. The recommended configuration consists of 26 welded S9E-type zinc anodes (12 kg) on the hull, two S8-type units (8 kg) on the skeg, and two S4-type units (4 kg) on the rudder blade, with an anode spacing of approximately 2.2 meters on the hull. The total estimated procurement cost for the zinc anodes is IDR 68,831,928. The study demonstrates that applying BKI standards enables the design of an effective cathodic protection system to mitigate corrosion risks, and extend the vessel's structural service life..

Keywords : corrosion, cathodic protection, *zinc anode*, *tugboat*

1 Pendahuluan

Industri maritim, khususnya galangan kapal memiliki peran penting dalam pengembangan transportasi laut, Namun lingkungan laut yang bersifat korosif menyebabkan kapal berbahan material logam rentan mengalami korosi. Sebagaimana diketahui, korosi merupakan suatu reaksi kimia antara logam dengan berbagai zat yang ada di lingkungan laut, sehingga menghasilkan senyawa yang dapat merusak kualitas kandungan dalam logam atau yang sering kita kenal dengan istilah karatan. Sedangkan pada konstruksi kapal, salah satu penyebab kerusakan terbesar yang terjadi pada kapal akibat korosi air laut. Sampai saat ini penggunaan besi dan baja sebagai bahan utama pembuatan kapal masih sangat dominan karena beberapa keunggulannya dari segi biaya maupun kekuatan. Oleh karena itu penggunaan besi dan baja sangat efektif serta sangat cukup memadai. Namun besi dan baja sangat reaktif dan mempunyai kecenderungan yang besar untuk terdampak korosi air laut. Korosi pada pelat badan kapal dapat mengakibatkan penurunan kekuatan dan umur pemakaian kapal, mengurangi kecepatan kapal serta mengurangi jaminan keselamatan, keamanan muatan barang dan penumpang. Guna menghindari kerugian yang lebih besar akibat korosi air laut, maka perawatan dan pemeliharaan kapal harus dilakukan secara berkala [1].

Secara ilmiah, proses korosi tersebut terjadi melalui mekanisme elektrokimia yang melibatkan interaksi logam dengan lingkungannya, peristiwa ini merupakan pelepasan elektron dari suatu logam (besi atau baja) dalam larutan elektrolit seperti air laut. Sementara itu, atom logam yang bermuatan positif (Fe^{+3}) akan bereaksi dengan ion hidroksil (HO^-) membentuk besi hidroksida [$\text{Fe}(\text{OH})^3$] yang disebut dengan karat. Lingkungan yang bersangkutan adalah lingkungan asam, embun, udara, air tawar, air laut, air danau, air sungai, dan air tanah. Air laut mempunyai sifat korosif karena kandungan klorida (Cl^{3-}) yang cukup tinggi dan juga dapat merusak pelat dasar lambung kapal. Laju korosi juga dapat meningkat akibat arus dan gelombang laut yang tinggi [2]. Proteksi katodik merupakan salah satu metode pengendalian korosi struktur baja dalam lingkungan elektrolit dengan cara memperlakukan struktur logam sebagai katoda. Korosi yang terjadi pada permukaan logam akibat reaksi kimia karena pH air yang rendah dan udara yang lembab, sehingga semakin lama lapisan logam makin menipis. Biasanya ini terjadi pada pelat baja atau profil logam homogen. Korosi pada jenis tertentu dapat dicegah dengan memberikan lapisan pelindung pada permukaan logam. Lapisan ini mengandung inhibitor, yaitu zat yang berfungsi memperlambat atau menghambat reaksi korosi. Contohnya seperti penggunaan gemuk (*grease*) yang melapisi permukaan logam sehingga tidak langsung kontak dengan air atau oksigen penyebab korosi. Proteksi katodik sangat penting untuk mengurangi laju korosi pada luas permukaan bawah air lambung kapal, selain itu untuk menjaga logam dari korosi dapat menggunakan *zinc anode*, proteksi ini ditempatkan pada bagian kapal yang rentan terhadap korosi air laut [3].

Proteksi katodik dengan menggunakan metode *zinc anode* dapat dilakukan dengan menghubungkan *zinc anode* dengan material yang akan diproteksi. Material yang akan diproteksi diatur agar berperan sebagai katoda dalam suatu sel korosi dan pasangan yang akan dihubungkan adalah logam lain yang memiliki potensial yang lebih negatif sehingga berperan sebagai anoda. Elektron akan mengalir dari anoda ke katoda sehingga terjadi penerimaan elektron pada katoda. Dengan proses penerimaan elektron tersebut, katoda mengalami reaksi reduksi dan terproteksi dari proses korosi [4]. Dalam perencanaan proteksi katodik, pemilihan standar nasional sangat penting. Standar nasional Biro Klasifikasi Indonesia (BKI) sebagai lembaga klasifikasi nasional menetapkan tentang sistem katodik proteksi, masa umur proteksi, dan jenis anoda yang diperbolehkan. Pada standar *BKI Rules for the classification and construction 2026 Volume II Section 38* memberikan panduan yang jelas dan aplikatif mengenai perhitungan proteksi katodik menggunakan *zinc anode* [5].

Pada kapal tugboat 28,5 meter, yang digunakan sebagai anoda korban menghindari korosi pada kapal adalah *zinc anode*. Material *zinc anode* berfungsi sebagai pelindung anti karat yang terbuat dari seng dan bekerja dengan metode proteksi katodik. *Zinc anode* memiliki banyak pertikel elektron negatif yang beraksi sehingga anoda tersebut akan habis teroksidasi. Hal ini membuat pelat lambung kapal tetap terlindung dari karat. Untuk memaksimalkan fungsi dari *zinc anode* dalam mencegah korosi, penggunaannya harus secara rutin diperiksa dan diganti setelah periode tertentu. Dalam penelitian terkait, yang dianalisis meliputi jumlah *zinc anode* yang diperlukan, jarak antar *zinc anode*, umur, dan berat *zinc anode*.

Keuntungan utama proteksi katodik *zinc anode* meliputi efektivitasnya dalam melindungi lambung kapal, keterjangkauan material, dan kinerjanya di lingkungan laut yang korosif. *Zinc anode* menghasilkan distribusi arus proteksi yang cukup merata dan memiliki risiko *overprotection* yang rendah, sehingga aman bagi lapisan pelindung (*coating*) dan struktur baja kapal. Pemeliharaannya juga tergolong sederhana karena kondisi anoda dapat dipantau secara visual dan diganti secara berkala sesuai umur pemakaian. Logam Aluminium mempunyai potensial besar untuk dijadikan anoda korban, akan tetapi logam Aluminium memiliki efisiensi yang rendah. Logam seng yang digunakan sebagai anoda korban harus memiliki kemurnian yang tinggi [6]. Oleh karena itu diperlukan pemahaman yang baik tentang pemilihan, penempatan dan pemeliharaan *zinc anode* merupakan aspek penting dalam menjaga struktural lambung kapal dan mencegah kerusakan akibat korosi. Penelitian ini memiliki relevansi yang signifikan dalam konteks perlindungan korosi pada kapal *tugboat*.

Penelitian bertujuan menganalisis jumlah kebutuhan dan penempatan *zinc anode* dalam pengendalian korosi, penelitian ini dapat memberikan wawasan tentang bagaimana melindungi kapal tersebut dari kerusakan korosi di lingkungan laut. Hasil penelitian dapat membantu mengembangkan strategi perlindungan yang lebih efektif,

mengurangi waktu perbaikan, dan meminimalkan biaya pemeliharaan jangka panjang. Secara keseluruhan, penelitian ini memberikan dampak positif terhadap ketahanan dan efisiensi operasional kapal *tugboat*, sehingga relevan dalam konteks industri maritim yang mengandalkan kinerja kapal yang optimal di lingkungan laut.

2 Metodologi Penelitian

Metodologi penelitian yang digunakan oleh penulis adalah metode penelitian kuantitatif dengan pendekatan analitis, yaitu jenis penelitian yang dilakukan melalui perhitungan teknis berdasarkan data numerik dan standar yang berlaku. Pendekatan ini digunakan untuk menganalisis kebutuhan sistem proteksi katodik menggunakan *zinc anode* pada lambung kapal *tugboat* 28,5 meter. Perhitungan dalam penelitian ini mengacu pada standar Biro Klasifikasi Indonesia (BKI) khususnya *BKI Rules for the classification and construction 2026 volume II section 38* dan *Guidance for the Corrosion Protection pt. 1 vol. G Ch 1, Sec 8* yang membahas tentang sistem proteksi katodik pada kapal. Gambar 1 menampilkan alur penelitian mulai dari melakukan observasi hingga melakukan perhitungan biaya estimasi pengadaan *zinc anode*.



Gambar 1 Diagram Alir pengerjaan tugas akhir

2.1. Tahap Penelitian

Penjelasan mengenai diagram alir pengerjaan Gambar 1 dapat dilihat pada uraian berikut ini:

2.2. Observasi

Pada tahap ini, dilakukan dengan survei langsung kelapangan untuk mencari tahu data yang akan digunakan dalam penelitian ini. Observasi difokuskan pada pengumpulan data yang relevan terhadap penelitian ini, adapun data yang dikumpulkan meliputi, data jenis *zinc anode* yang akan di gunakan, data ukuran kapal, dan juga melakukan wawancara kepada para pekerja untuk mendapatkan data yang valid saat dilapangan.

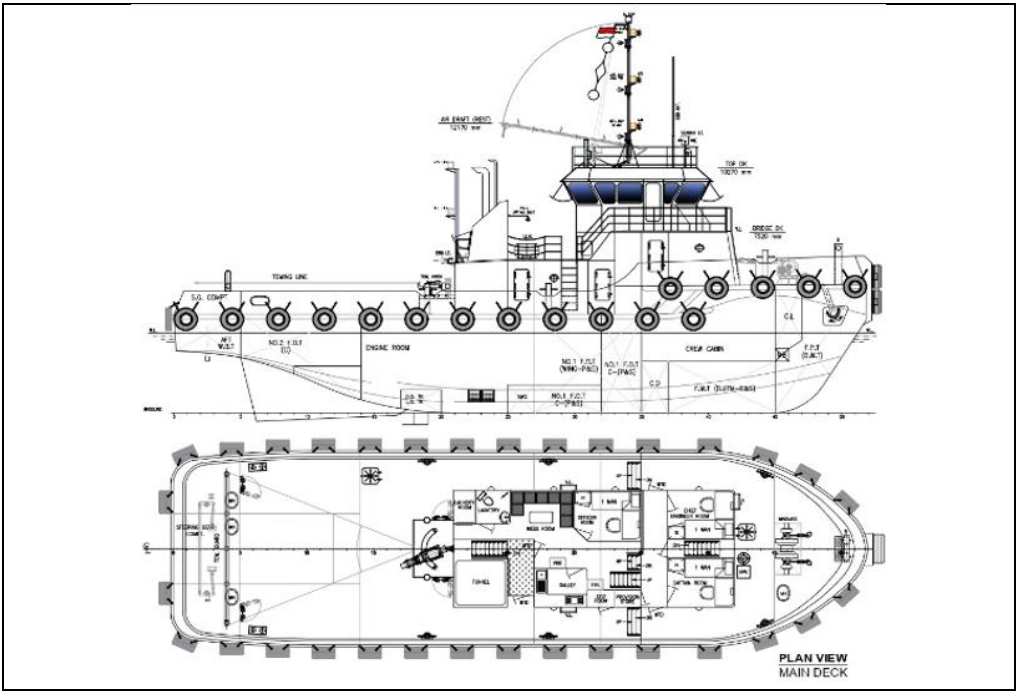
2.3. Studi Literatur

Pada tahap ini dilakukan proses pencarian, pengkajian, dan pengumpulan materi serta informasi yang dapat diandalkan dan relevan dengan materi yang dapat digunakan sebagai referensi dalam tugas akhir ini. Data yang dikumpulkan dalam penelitian ini adalah dimensi ukuran kapal, luas area basah kapal *tugboat* 28,5 meter, serta jenis *zinc anode* yang digunakan.

2.3.1 Ukuran Dimensi Kapal

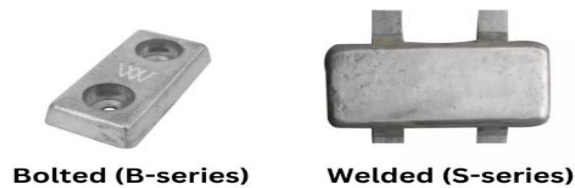
Dalam penelitian ini kapal *tugboat* 28,5 meter memiliki data ukuran kapal sebagai berikut:

Tabel 1 Data ukuran kapal	
Type kapal	Tugboat 28,50 meter
LOA	28,50 meter
LPP	27,65 meter
Breadth	8,20 meter
Draught	3,40 meter
Depth	4,20 meter



Gambar 2 Ilustrasi tampak samping dan tampak atas kapal 28,5 meter, Sumber (PT. XYZ)

2.3.2 Jenis Zinc Anode



Gambar 3 Jenis-Jenis *Type Zinc Anode*

(Sumber Internet)

Jenis *zinc anode* ada 2, yaitu B-series dan S-series seperti dapat dilihat pada Gambar 3. *Zinc anode type Bolted (B-series)* berbentuk persegi dengan dua lubang di bagian tengahnya yang digunakan untuk memasang baut. *type* ini biasanya digunakan pada bagian-bagian kapal yang mudah dijangkau dan membutuhkan pemasangan yang cepat dan mudah. Keuntungan dari *type bolted* ini adalah kemudahan dalam penggantian dan perawatan. Cukup dengan melepaskan baut, *anode* yang sudah habis dapat diganti dengan yang baru. Namun dalam penelitian ini akan digunakan *Zinc anode type Welded (S-series)* yang memiliki bentuk persegi panjang dengan tambahan pelat panjang di ujungnya. Dimana untuk pemasangan, pelat ini akan di las langsung ke struktur logam kapal. *Anode* ini memberikan perlindungan yang lebih permanen dan kokoh, cocok untuk bagian-bagian kapal yang sulit dijangkau atau memerlukan perlindungan jangka panjang. Keunggulan dari *type welded* ini adalah stabilitas yang lebih tinggi dan perlindungan yang lebih efektif dalam jangka waktu yang lebih lama [7].

2.3.3 Proteksi Katodik dari Zinc Anode Untuk Pengaplikasian di Air Laut

Tabel 2 Data proteksi katodik menggunakan *zinc anode* untuk air laut

Element	KI-Zn1	KI-Zn2
Al	0,10 – 0,50	$\leq 0,10$
Cd	0,025 – 0,07	$\leq 0,004$
Cu	$\leq 0,005$	$\leq 0,005$
Fe	$\leq 0,005$	$\leq 0,0014$
Pb	$\leq 0,006$	$\leq 0,006$
Zn	$> 99,22$	$\leq 99,88$
Potential (T = 20°C)	-1,03 V Ag/AgCl/Seawater	-1,03 V Ag/AgCl/Seawater
Qg (T = 20°C)	780 Ah/kg	780 Ah/kg
μ (Efficiency) (T = 20°C)	95%	

1) This value is used for calculation of the required anode weight.

Sumber: [5] BKI *Guidance for the Corrosion Protection pt. 1 vol. G Ch 1, Sec 8 .page 42.*

Untuk menentukan kebutuhan komposisi yang harus ada pada anoda maka Biro Klasifikasi Indonesia menetapkan standard komposisi anoda sesuai dengan tabel 2.

2.4. Perhitungan Luas Area Basah

Luas permukaan basah merupakan bagian dari luas bangunan bagian bawah kapal (*bottom*), yang merupakan area bangunan yang terendam air laut. Untuk mengetahui luas area basah pada kapal *tugboat* 28,5 meter yang akan meliputi area lambung kapal, skeg kapal dan daun kemudi kapal, dapat dikalkulasikan menggunakan perhitungan sebagai berikut:

2.4.1 Luas Area Basah Pada Lambung Kapal

Pada perhitungan luas area basah pada lambung kapal *tugboat* 28,5 meter dapat dikalkulasikan menggunakan rumus dengan persamaan (1):

$$A_G = (2T + B) \times L_{pp} \times p \quad (1)$$

Sumber: [8] Benny Hartanto dan Salim. (2023).

Keterangan :

- A_G = Area yang akan diproteksi
- T = Sarat kapal
- B = Lebar kapal
- L_{pp} = Panjang antara garis tegak kapal (m)
- p = Faktor bentuk lambung, (untuk kapal *tugboat* menggunakan 0,80)

Persamaan (1) digunakan untuk menentukan luas permukaan lambung kapal yang terendam air laut . nilai luas area basah yang diperoleh selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam menentukan kebutuhan arus proteksi dan jumlah *zinc anode* yang digunakan agar seluruh permukaan lambung kapal memperoleh perlindungan terhadap korosi.

2.4.2 Luas Area Basah Pada Skeg Kapal

Pada penentuan luas area basah pada skeg kapal dapat diperoleh melalui pengukuran langsung menggunakan prangkat lunak *autocad* dengan perintah (Area) terhadap profil skeg yang telah dibentuk sebagai objek tertutup (*closed polyline*). Nilai luas area skeg yang diperoleh selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam menentukan kebutuhan arus proteksi dan jumlah *zinc anode* yang digunakan agar seluruh permukaan skeg kapal memperoleh perlindungan terhadap korosi.

2.4.3 Luas Area Basah Daun Kemudi Kapal

Untuk menentukan luas area basah pada daun kemudi kapal dapat menggunakan persamaan (2):

$$SR = TD \times BD \quad (2)$$

Sumber: [8] Benny Hartanto dan Salim (2023).

Keterangan :

SR = Luas daun kemudi (m²)

TD = Tinggi daun kemudi (m)

BD = Lebar daun kemudi (m)

Persamaan (2) digunakan untuk menentukan luas permukaan daun kemudi kapal yang terendam air laut . nilai luas area basah yang diperoleh selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam menentukan kebutuhan arus proteksi dan jumlah *zinc anode* yang digunakan agar seluruh permukaan daun kemudi kapal memperoleh perlindungan terhadap korosi.

2.5. Perhitungan Kebutuhan Arus Proteksi

Pada penentuan kebutuhan arus proteksi dapat dikalkulasikan dengan perhitungan yang telah di tentukan oleh Badan Klasifikasi Indonesia (BKI) pada persamaan (3).

$$I_G = A_G \times i_s \quad (3)$$

Sumber: [5] BKI *Guidance for the Corrosion Protection pt. 1 vol. G Ch 1, Sec 8*

Keterangan :

- I_G = Kebutuhan arus proteksi (ampere)
- A_G = Luas area yang akan di proteksi (m²)
- i_s = kerapatan arus proteksi (mA/m²)

Pada persamaan (3) dibutuhkan untuk mencari kebutuhan arus proteksi pada lambung kapal. Nilai dari persamaan ini diperoleh dari hasil perkalian dari luas area yang akan di proteksi dengan nilai kerapatan arus proteksi. Hasil perhitungan ini menjadi dasar dalam menentukan jumlah kebutuhan *zinc anode* pada lambung kapal.

2.6. Perhitungan Total Berat *zinc anode*

Perhitungan kebutuhan massa anoda Setelah mengetahui laju korosi, menentukan umur anoda dan kebutuhan permintaan arus serta menentukan kebutuhan massa anoda untuk jenis anoda yang digunakan. Perlindungan katodik dapat dilakukan dengan menggunakan, anoda korban atau dengan sistem arus tanding. Perlindungan katodik dengan menggunakan anoda korban harus didesain untuk 1 (satu) periode pengedokan. Adapun untuk menghitung massa kebutuhan anoda korban dengan menggunakan persamaan berikut:

$$m_G = \frac{I_g \times t_s \times 8760}{Q_g \times \mu} \quad (4)$$

Sumber: [5] BKI *Guidance for the Corrosion Protection* n pt. 1 vol. G Ch 1, Sec 8

Keterangan :

- m_G = Berat anoda yang dibutuhkan (kg)
- I_g = Arus proteksi (Ampere)
- t_s = Periode proteksi (dalam tahun)
- Q_g = Kapasitas elektrokimia, dilihat dari panduan anoda pada table 2 (Ah/kg)
- μ = Efisiensi, dilihat dari table 2 (terhitung dalam persen), (95%)

Persamaan (4) digunakan untuk menghitung total berat keseluruhan *zinc anode* yang dibutuhkan agar sistem proteksi katodik mampu memberi perlindungan yang efektif sesuai dengan umur yang di rencanakan. Hasil Perhitungan ini dipengaruhi oleh besarnya kebutuhan arus proteksi, lama waktu proteksi, kapasitas elektrokimia material *zinc anode*.

2.7. Perhitungan Total jumlah *zinc anode*

Setelah medapatkan total berat anoda yang dibutuhkan, perlu dilakukan perhitungan jumlah *zinc anode* yang akan dipasangkan kepada bagian kapal yang terendam air, dengan membagi total berat *zinc anode* dengan berat *zinc anode* yang akan digunakan pada kapal[9]. Perhitungan tersebut dapat dikalkulasikan dengan rumus sebagai berikut.

$$mCPZ = \frac{m_G}{BZN} \quad (5)$$

Sumber: [10] W. Widianingrum, J. Sade, dan H. Palippui (2021)

Keterangan :

- $mCPZ$ = Jumlah *zinc anode* (Buah)
- m_G = Jumlah total berat *zinc anode* (KG)
- BZN = Berat jenis *zinc anode* yang digunakan

Persamaan (5) digunakan untuk menentukan jumlah *zinc anode* yang akan di pasang pada permukaan kulit lambung atau pada area basah kapal tugboat. Hasil perhitungan ini menjaid dasar dalam menentukan jarak pemasangan *zinc anode* agar lebih efisien dalam memberikan perlindungan kepada area basah kapal *tugboat* 28,5 meter,

2.8. Perhitungan Jarak *zinc anode*

Setelah didapatkan jumlah anoda yang akan digunakan untuk memproteksi maka dapat ditentukan peletakan pada badan kapal dengan menggunakan persamaan (6):

$$J_{AK} = \frac{LOA}{Zn} \quad (6)$$

Sumber: [3]B. Sudjasta, P. Suranto, and H. Setiani, Des 2018

Keterangan :

- J_{AK} = jarak antar *zinc anode* (m)
- LOA = panjang keseluruhan kapal (m)
- Zn = Jumlah total anoda korban yang dipasang (buah)

Persamaan (6) digunakan untuk menentukan jarak pemasangan *zinc anode* pada lambung kapal. Nilai dari jarak pemasangan ini diperoleh dari pembagian panjang daerah yang akan diperoteksi dengan jumlah *zinc anode* yang akan di pasang pada lambung kapal [11]. Hasil perhitungan ini menjadi acuan dalam menyusun tata letak *zinc anode* sehingga distribusi arus proteksi lebih merata.

2.9. Perhitungan biaya pengadaan material *zinc anode*

Perhitungan ini diperlukan untuk mengetahui seberapa besar pembiayaan yang harus dikeluarkan dalam perlindungan korosi menggunakan *zinc anode*. Perhitungan ekonomis pada *zinc anode* memerlukan perhitungan jumlah *zinc anode* yang diperlukan, setelah mendapatkan data tersebut maka selanjutnya dilakukan analisis biaya untuk setiap *type zinc anode* yang dibutuhkan berdasarkan jumlah kebutuhan *zinc anode* yang diperlukan. Untuk perhitungan biaya yang diperlukan dapat dilakukan dengan persamaan (7):

$$\text{Coast Requirment: } Quantity \times \text{Cost per Item} \quad (7)$$

Keterangan :

- Cost requirement = kebutuhan total biaya *zinc anode* (rupiah)
- Quantity = jumlah *zinc anode* (pcs)
- Cost per item = harga satuan *zinc anode* (rupiah)

Persamaan (7) digunakan untuk menghitung total anggaran biaya pengadaan *zinc anode* berdasarkan jumlah anoda yang dibutuhkan dan harga satuan masing-masing anoda. Perhitungan ini memberikan estimasi biaya material yang diperlukan untuk sistem proteksi katodik pada lambung kapal.

3 Analisa Data dan Pembahasan

3.1. Gambaran umum

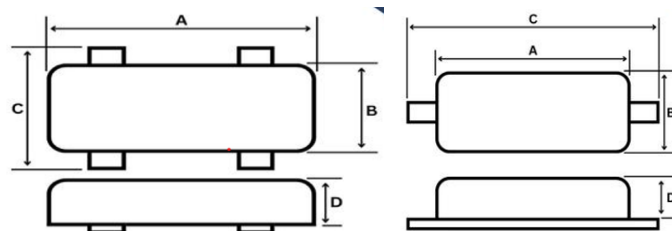


Gambar 4 zinc anode seri S9E dan seri S4 welding type

Pada gambar 4 diatas menunjukkan seri Zinc anode yang akan digunakan pada kapal tugboat 28,5 meter, yaitu zinc anode S9E welding type dan zinc anode S8 welding type dengan empat dudukan kaki, sementara itu untuk daerah daun kemudi kapal tugboat 28,5 meter menggunakan zinc anode seri S4 welding type dengan dudukan 2 kaki. Informasi penggunaan zinc anode pada kapal tugboat 28,5 meter diperoleh dari hasil wawancara dengan salah seorang tim *production incharge* pada kapal tersebut Pemilihan jenis dan seri yang akan digunakan dapat dipilih dengan melakukan analisis dengan melihat total jumlah berat anoda yang di dapatkan lalu dapat disimpulkan bahwa seri yang akan digunakan dipilih sesuai dengan total berat anoda. Data lengkap mengenai spesifikasi dan dimensi zinc anode dapat dilihat pada tabel 3 dibawah ini.

Tabel 3 Dimensi zinc anode

type	weight	Dimension (mm)			
		A	B	C	D
S4	4	192	98	300	24.87
S8	8	298	146	250	25.53
S9E	12	300	150	282	40.65



Gambar 5 Dimensi Zinc Anode

3.2. Data Utama Ukuran Kapal

Pada tahap ini suatu analisa dan pembahasan tentang perhitungan perencanaan kebutuhan zinc anode yang akan diperlukan untuk tahap awal perhitungan luasan area yang tercelup air atau area basah. untuk melakukan perhitungan ini pada permukaan lambung kapal yang tercelup air diperlukan data ukuran utama kapal tugboat 28,5 meter pada tabel.

3.3. Perhitungan Luas Area Basah

Perhitungan luas area basah merupakan tahap penting dalam menentukan luas permukaan yang akan di proteksi oleh zinc anode. Untuk menentukan total luas area basah pada kapal tugboat 28,5 meter, penulis membagi perhitungan ini menjadi tiga (3) yaitu, perhitungan pada area lambung kapal, perhitungan pada area daun kemudi kapal, dan juga perhitungan pada area skeep kapal.

3.3.1 Area Lambung Kapal

Perhitungan kebutuhan luas area basah pada lambung kapal *tugboat* 28,5 meter menjadi salah satu aspek dalam menentukan jumlah kebutuhan *zinc anode* yang diperlukan. Pada perhitungan kebutuhan luas area basah ini penulis menghitung luasan area basah menggunakan data yang sudah diperoleh dengan persamaan (1)

$$A_G = (2T + B) \times L_{pp} \times p$$

$$A_G = (2 \times 3,40 + 8,20) \times 27,65 \times 0,80$$

$$A_G = 15 \times 27,65 \times 0,8$$

$$A_G = 414 \times 0,8$$

$$A_G = 331,8 \text{ m}^2$$

Setelah melakukan perhitungan maka didapatkan luas area basah pada lambung kapal *tugboat* 28,5 meter sebesar 331,8 m². Hasil dari perhitungan area basah ini akan dikalkulasikan dengan area basah pada skeg dan juga daun kemudi kapal yang akan di hitung menggunakan persamaan (2)

3.3.2 Area Daun Kemudi Kapal

Perhitungan luas area basah pada area daun kemudi kapal *tugboat* 28,5 meter merupakan tahap penting dalam menentukan jumlah kebutuhan arus proteksi dan juga jumlah *zinc anode* yang akan di pasang pada daun kemudi kapal.

$$SR = T \times B$$

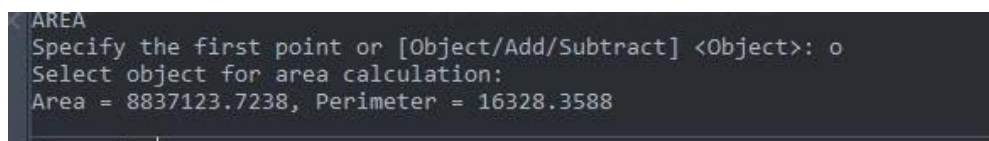
$$SR = 1,9 \text{ meter} \times 1,1 \text{ meter}$$

$$SR = 2,09 \text{ meter}^2$$

Setelah melakukan perhitungan luas area pada daun kemudi kapal didapatkan luas area daun kemudi sebesar 2,09 meter² lalu hasil tersebut dikalikan 2 karena pada daun kemudi kapal memiliki 2 permukaan sehingga mendapatkan hasil 4,18 meter². Hasil ini akan menjadi dasar dalam menentukan perhitungan kebutuhan arus proteksi pada area daun kemudi kapal.

3.3.3. Perhitungan Luas Area Skeg kapal

Untuk mengetahui luas area pada skeg kapal dapat diperoleh dari prangkat lunak *AutoCAD* dengan perintah memblok pada bagian skeg kapal dan perintahkan (Area) terhadap profil skeg yang telah diblok. Setelah melakukan perintah diatas maka luas area yang di dapatkan untuk skeg kapal sebesar 8837123.7238 mm².



Gambar 6 Hasil perhitungan luas area skeg kapal pada prangkat lunak AutoCAD

Sumber: Hasil pengolahan data

Pada penentuan luas area skeg kapal penulis menggunakan software *autoCAD* dan penulis menggunakan parameter mm karena desain utama kapal menggunakan parameter mm. Setelah mendapatkan hasil tersebut, peneliti melakukan konversi dari mm² kedalam m² dengan cara membagi hasil perhitungan $\frac{8837123.7238 \text{ mm}^2}{1.000.000}$, maka luas area pada skeg kapal *tugboat* mendapatkan hasil sebesar 8,837 m². hasil dari perhitungan ini hanya untuk sebelah sisi skeg kapal dan akan di kalikan 2 untuk mendapatkan luas area kedua belah sisi skeg kapal dan memiliki nilai sebesar 17.674. nilai ini akan menjadi nilai penting untuk menentukan jumlah total berat anoda yang akan melindungi skeg kapal dari korosi.

3.4. Perhitungan Kebutuhan Arus Proteksi

Untuk menghitung kebutuhan arus proteksi pada daerah area basah kapal tugboat 28,5 meter dapat menghitung menggunakan persamaan (4). dalam menghitung kebutuhan arus proteksi membutuhkan kepadatan arus proteksi, kepadatan arus proteksi tersebut dapat di lihat pada tabel 4 di bawah ini.

Tabel 4 kepadatan arus proteksi untuk berbagai zona proteksi katodik

Typical CPZ		Protective current density (i_s) (minimum value) (mA/m ²)
Coated outer shell of steel ships with speeds	Up to 20 kn	15
	20 – 25 kn	30
	Over 25 kn	40

Sumber: BKI *Guidance for the Corrosion Protection pt. 1 vol. G Ch 1, Sec 8, page 40.*

Kapal *tugboat* merupakan kapal yang didesain untuk menghasilkan gaya tarik yang sangat besar, bukan seperti kapal patroli ataupun kapal penumpang lainnya [12]. Dapat disimpulkan bahwa kapal *tugboat* dalam berlayar saat menarik ataupun mendorong kapal lainnya hanya berkecepatan 3 hingga 5 knot dan saat bermanuver berkecepatan 10 hingga 20 knot.

3.4.1. Perhitungan Kebutuhan Arus Proteksi Lambung Kapal

Perhitungan kebutuhan arus proteksi pada lambung kapal *tugboat* 28,5 meter merupakan penting yang harus dilakukan dalam menentukan jumlah katodik proteksi pada area lambung kapal. Hasil dari perhitungan arus proteksi pada lambung kapal ini nantinya akan digunakan untuk menghitung total kebutuhan *zinc anode* pada area lambung kapal. Perhitungan kebutuhan arus proteksi pada daun kemudi kapal dapat dilihat pada persamaan (4)

$$I_G = A_G \times i_s$$

$$I_G = 332 \text{ m}^2 \times 15 \text{ mA/m}^2$$

$$I_G = 4980 \text{ mA}$$

Setelah melakukan perhitungan kebutuhan arus proteksi pada lambung kapal, didapatkan hasil perhitungan sebesar 4980 mA. Hasil dari kebutuhan arus proteksi ini sangat penting dalam menentukan total jumlah berat *zinc anode* untuk memberikan perlindungan yang efektif pada daerah lambung kapal *tugboat* 28,5 meter.

3.4.2. Perhitungan Kebutuhan Arus Proteksi Daun Kemudi Kapal

Perhitungan kebutuhan arus proteksi pada daun kemudi kapal menjadi penting untuk mengetahui jumlah *zinc anode* yang di butuhkan pada area daun kemudi kapal *tugboat* 28.5 meter. Perhitungan kebutuhan arus proteksi pada daun kemudi kapal dapat dilihat pada persamaan (4)

$$I_G = A_G \times i_s$$

$$I_G = 4,18 \text{ m}^2 \times 15 \text{ mA/m}^2$$

$$I_G = 62.7 \text{ mA}$$

Setelah melakukan perhitungan kebutuhan arus proteksi pada daun kemudi kapal, didapatkan hasil arus proteksi yang dibutuhkan untuk area daun kemudi kapal sebesar 62.7 mA. Hasil dari perhitungan ini menjadi dasar yang penting dalam menentukan jumlah *zinc anode* yang akan dipasang pada daerah daun kemudi kapal *tugboat* 28,5 meter.

3.4.3. Perhitungan Kebutuhan Arus Proteksi pada Skeg Kapal

Perhitungan kebutuhan arus proteksi pada area skeg kapal menjadi penting untuk mengetahui jumlah *zinc anode* yang di butuhkan pada area skeg kapal *tugboat* 28.5 meter. Perhitungan kebutuhan arus proteksi pada skeg kapal dapat dilihat pada persamaan (4)

$$I_G = A_G \times i_s$$

$$I_G = 17,674 \text{ m}^2 \times 15 \text{ mA/m}^2$$

$$I_G = 265.11 \text{ Ma}$$

Setelah melakukan perhitungan kebutuhan arus proteksi pada daun kemudi kapal, didapatkan hasil arus proteksi yang dibutuhkan untuk area skeg kapal sebesar 265,11 mA. Hasil dari perhitungan ini menjadi dasar yang penting dalam menentukan jumlah *zinc anode* yang akan dipasang pada daerah skeg kapal *tugboat* 28,5 meter.

3.5. Perhitungan Total Berat Zinc Anode

Untuk perhitungan dari total kebutuhan *zinc anode* yang akan dipasangkan pada kapal *tugboat* 28,5 meter dapat dihitung menggunakan rumus persamaan (4). Untuk nilai elektrokimia yang dimiliki adalah sebesar 780Ah/kg. Nilai elektrokimia pada pembahasan ini dapat dilihat pada table 2.

3.5.1 Perhitungan Berat zinc anode Pada Lambung Kapal

Pada perhitungan total berat anoda pada lambung kapal, menjadi penting karena untuk menghasilkan total anoda yang dapat melindungi lambung kapal lebih efektif diperlukan perhitungan berat *zinc anode* dengan persamaan (4)

$$m_G = \frac{I_g \times t_s \times 8760}{Q_g \times \mu}$$

$$m_G = \frac{4980 \text{ mA} \times 5 \text{ tahun} \times 8760}{780 \text{ AH/KG} \times 95\%}$$

$$m_G = 294.36 \text{ Kg}$$

Setelah melakukan perhitungan maka diketahui total berat anoda yang dibutuhkan pada bagian lambung kapal sebesar 294.36 Kg.

3.5.2. Perhitungan Berat Zinc Anode Pada Daun Kemudi Kapal

Untuk mendapatkan perlindungan yang efektif bagi daun kemudi kapal *tugboat* 28,5 Meter diperlukan jumlah anoda yang dapat melindungi daun kemudi dari korosi dapat digunakan perhitungan pada persamaan (5). setelah melakukan perhitungan pada persamaan tersebut jumlah *zinc anode* akan dikalikan 2 , karena melihat dari *general arrangement* desain kapal *tugboat* 28,5 meter daun kemudi yang digunakan pada kapal *tugboat* 28,5 meter adalah 2 buah.

$$m_G = \frac{I_g \times t_s \times 8760}{Q_g \times \mu}$$

$$m_G = \frac{62.72 \text{ mA} \times 5 \text{ Tahun} \times 8760}{780 \text{ AH/Kg} \times 95\%}$$

$$m_G = 3.71 \text{ Kg}$$

Setelah melakukan perhitungan menggunakan persamaan (5) jumlah berat *zinc anode* yang dibutuhkan oleh daun kemudi kapal *tugboat* 28,5 meter adalah sebesar 3.71 Kg. dengan melihat hasil yang dibutuhkan pada daun kemudi kapal adalah sebesar 3.71.Kg.

3.5.3. Perhitungan Berat Zinc Anode Pada Skeg Kapal

Dalam melakukan perhitungan berat *zinc anode* pada area kapal yang tercelup air, Skeg kapal menjadi salah satu bagian yang harus diperhitungkan dalam menentukan kebutuhan katodik proteksi pada kapal *tugboat* ini.

$$m_G = \frac{I_g \times t_s \times 8760}{Q_g \times \mu}$$

$$m_G = \frac{265.11 \text{ mA} \times 5 \text{ tahun} \times 8760}{780 \text{ AH/Kg} \times 95\%}$$

$$m_G = 15.67 \text{ Kg}$$

Setelah melakukan perhitungan berat *zinc anode* pada skeg kapal *tugboat* 28,5 meter, maka didapatkan hasil sebesar 15.67 Kg . dengan hasil perhitungan berat total anoda yang dibutuhkan pada area skeg kapal maka selanjutnya nilai ini akan menjadi penentu untuk mengetahui berapa buah anoda yang akan dipasang pada area skeg kapal.

3.6. Perhitungan Total Zinc Anode

Nilai luas area basah yang telah diperoleh menunjukan total permukaan lambung kapal yang terendam air laut dan memerlukan perlindungan *zinc anode* sebagai katodik. Jumlah *zinc anode* pada penelitian ini ditentukan berdasarkan kebutuhan arus proteksi selama umur rencana proteksi serta kapasitas elektrokimia yang sesuai dengan aturan Badan Klasifikasi Indonesia. Menghitung jumlah total kebutuhan *zinc anode* yang dibutuhkan kapal *tugboat* 28,5 meter dengan dimensi anoda 300 mm × 150 mm × 282 mm dengan berat anoda 12 Kg per pcs dapat dihitung sesuai dengan persamaan (5)

$$mCPZ = \frac{mG}{BZN}$$

$$mCPZ = \frac{294.36 \text{ Kg}}{12 \text{ Kg}}$$

$$mCPZ = 25 \text{ pcs}$$

Setelah melakukan perhitungan total *zinc anode* yang akan digunakan mendapatkan hasil perhitungan sebesar 25 pcs *zinc anode*. Untuk mendapatkan perlindungan yang efektif maka jumlah anoda di tambah 1 agar menjadi genap untuk evisien saat pembagian antara bagian kanan dan kiri lambung kapal. perhitungan ini akan mejadi dasar untuk menentukan jarak pemasangan antar *zinc anode* agar dapat melindungi bagian permukaan lambung yang terendam air laut yang lebih efektif.

3.7. Perhitungan Jarak Zinc Anode

Untuk mendapatkan perlindungan secara maksimal pada area basah lambung kapal *tugboat* 28.5 meter, maka di butuhkan perhitungan jarak pemasangan *zinc anode* pada area yang rentan terdampak korosi. untuk menentukan jarak pemasangan *zinc anode* akan menggunakan persamaan (6)

$$J_{AK} = \frac{LOA}{Zn}$$

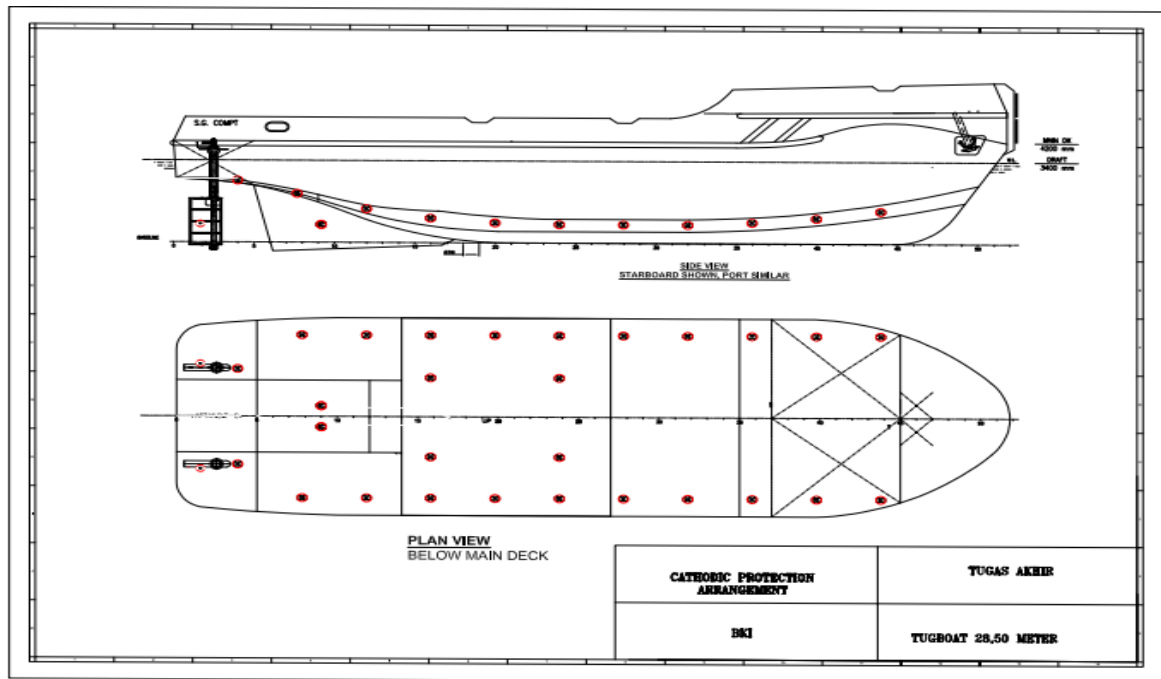
$$J_{AK} = \frac{28.50}{13}$$

$$J_{AK} = 2,2 \text{ Meter}$$

Setelah melakukan perhitungan untuk mendapatkan jarak pemasangan *zinc anode*, maka didapatkan hasil jarak pemasangan anoda sejauh 2,2 meter pada area lambung kapal *tugboat* 28,5 meter

3.8. Penempatan Lokasi Zinc Anode Pada Kapal Tugboat 28,8 meter

Setelah mengetahui total kebutuhan *zinc anode* yang dibutuhkan dan jarak peletakan maka selanjutnya akan dijadikan acuan utama untuk menentukan peletakan *zinc anode* pada daerah lambung kapal yang suda ditentukan dengan menggunakan *software AutoCAD*. Gambar 7 menampilkan ilustrasi lokasi penempatan *zinc anode* dari tampak samping dan juga tampak atas.



Gambar 7 Ilustrasi peletakan zinc anode

Pada gambar 7 di perlihatkan lokasi penempatan anoda pada kapal tugboat 28,5 meter. Penempatan anoda dapat dilihat pada tabel 7 yang menunjukkan dan menjelaskan mengenai lokasi penempadan dan jenis anoda yang di pasang.

Tabel 5 Penjelasan lokasi penempatan Zinc Anode

NO	POSITION	POSITION AT FRAME	WEIGHT OF ANODE PER PCS (KG)	TYPE OF ANODE	NUMBER OF ANODES
1	Rudder	2	4	S4	2
2	Hull	4	12	S9E	2
3	Hull	8	12	S9E	2
4	Skeg	9	8	S8	2
5	Hull	12	12	S9E	2
6	Hull	16	12	S9E	4
7	Hull	20	12	S9E	2
8	Hull	24	12	S9E	4
9	Hull	28	12	S9E	2
10	Hull	32	12	S9E	2
11	Hull	36	12	S9E	2
12	Hull	40	12	S9E	2
13	Hull	44	12	S9E	2

Dalam penentuan penempatan anoda diarea lambung kapal *tugboat* pada tabel 7, dijelaskan bahwa pemilihan lokasi pemasangan *zinc anode* untuk memastikan perlindungan korosi yang optimal pada seluruh area lambung kapal yang terendam oleh air laut. Berdasarkan BKI *volume guiddance for the corrosion protection pt 1 vol. G ch 1, sec 8 point 2.4.4 dan 2.4.5* tahun 2026, 30% dari total berat anoda juga harus ditempatkan pada area buritan, yang mencakup daun kemudi, skeg, dan *propeller*. Untuk area *propeller* BKI mengatakan bahwa *zinc anode* harus diletakan dekat dengan *propeller* antara atas atau di bawah *propeller*. Berdasarkan hasil perhitungan, total kebutuhan *zinc anode* pada kapal *tugboat* 28,5 meter adalah sebanyak 24 buah. Anoda tersebut didistribusikan pada area lambung yang terendam air laut, yaitu masing-masing 13 buah pada lambung kanan (*starboard side*) dan lambung kiri (*port side*), 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 1 anoda dengan berat 8 kg yang dipasangkan pada skeep kanan dan kiri dan juga masing-masing 1 anoda dengan berat 4 kg yang terpasang pada sisi kanan dan kiri daun kemudi kapal. Tata letak pemasangan *zinc anode* yang direncanakan pada penelitian ini ditunjukkan agar distribusi pada gambar 7 dan diharapkan mampu memberikan distribusi arus proteksi yang optimal selama umur desain proteksi yang ditetapkan.

Tabel 6 kesimpulan kebutuhan *zinc anode*

<i>Type anode</i>	<i>Zinc anode welded type</i>
<i>Total area to be protected</i>	<i>As calculated</i>
<i>Protection priode</i>	<i>5 years</i>
<i>Current capacity</i>	780 Ah/Kg
<i>Total number of anode 12 kg</i>	26
<i>Total number of anode 8 kg</i>	2
<i>Total number of anode 4 kg</i>	2
<i>Total weight of anode</i>	313.74 Kg

Pada tabel 8 diatas diperlihatkan kesimpulan mengenai kebutuhan *zinc anode* yang akan dipasang pada kapal tugboat 28,5 meter. Dapat disimpulkan bahwa total berat anoda yang akan di pasang pada kapal tugboat 28,5 meter adalah sebanyak 313,74 Kg. seseuai dengan peraturan BKI 25% hingga 30% anoda harus dipasangkan pada area buritan kapal. Maka 94 kg total berat anoda penulis letakan diarea buritan kapal.

3.8. Perhitungan Biaya Pengadaan *Zinc Anode*

Biaya yang di maksud adalah biaya yang digunakan untuk pengadaan material *zinc anode* pada bagian lambung, skeep, dan daun kemudi kapal *tugboat* 28,5 meter. Menghitung anggaran biaya penggandaan *zinc anode* dapat dihitung sesuai dengan persamaan (7).

Table 7 Harga Satuan *zinc anode*

<i>Type</i>	Harga satuan (pcs)
<i>Zinc anode S9E welding type</i>	Rp2.437.479
<i>Zinc anode S8 welding type</i>	Rp1.680.157
<i>Zinc anode S4 welding type</i>	Rp1.048.580

Pada tabel 7 diatas diperlihatkan harga satuan jenis anoda yang di gunakan pada kapal *tugboat* 28,5 meter

3.8.1. Perhitungan Biaya Pengadaan *Zinc Anode* Pada Lambung Kapal

Pada daerah lambung kapal *tugboat* 28,5 meter akan digunakan *zinc anode* dengan seri *S9E welding type* dengan berat anoda 12 Kg dan total anoda yang dibutuhkan sebanyak 26 pcs. Untuk mengetahui total biaya pengadaan *zinc anode* pada kapal maka dibutuhkan biaya perhitungan pengadaan *zinc anode* pada lambung kapal dengan persamaan (7)

$$\text{Coast Requirment} = \text{Quantity} \times \text{Cost per Item}$$

$$\text{Coast Requirment} = 26 \text{ pcs} \times \text{Rp}2.437.479$$

$$\text{Coast Requirment} = \text{Rp}63.374.454$$

Setelah melakukan perhitungan pengadaan *zinc anode* pada daerah lambung kapal maka di dapatkan total anggaran biaya yang harus dikeluarkan untuk pengadaan *zinc anode* adalah sebesar Rp.63.374.454

3.8.2. Perhitungan Biaya Pengadaan *Zinc Anode* Pada Daun Kemudi Kapal

Pada daerah daun kemudi kapal *tugboat* 28,5 meter akan digunakan *zinc anode* dengan seri *S4 welding type* dengan berat anoda 4 Kg dan total anoda yang dibutuhkan sebanyak 2 pcs. Untuk mengetahui total biaya pengadaan *zinc anode* pada kapal maka dibutuhkan biaya perhitungan pengadaan *zinc anode* pada lambung kapal dengan persamaan (7)

$$\text{Coast Requirment} = \text{Quantity} \times \text{Cost per Item}$$

$$\text{Coast Requirment} = 2 \text{ pcs} \times \text{Rp}1.048.580$$

$$\text{Coast Requirment} = \text{Rp}2.097.160$$

Setelah melakukan perhitungan pengadaan *zinc anode* pada daerah daun kemudi kapal, maka didapatkan total anggaran biaya yang harus dikeluarkan untuk pengadaan *zinc anode* pada daerah daun kemudi kapal *tugboat* 28,5 meter adalah sebesar Rp. 2.097.160

3.8.3. Perhitungan biaya Pengadaan *Zinc Anode* Pada Skeg Kapal

Pada daerah daun kemudi kapal *tugboat* 28,5 meter akan digunakan *zinc anode* dengan seri *S4 welding type* dengan berat anoda 8 Kg dan total anoda yang dibutuhkan sebanyak 2 pcs. Untuk mengetahui total biaya pengadaan *zinc anode* pada kapal maka dibutuhkan biaya perhitungan pengadaan *zinc anode* pada lambung kapal dengan persamaan (7)

$$\text{Coast Requirment} = \text{Quantity} \times \text{Cost per Item}$$

$$\text{Coast Requirment} = 2 \text{ pcs} \times \text{Rp}1.680.157$$

$$\text{Coast Requirment} = \text{Rp} 3.360.314$$

Setelah melakukan perhitungan pengadaan *zinc anode* pada daerah skeg kapal, maka didapatkan total anggaran biaya yang harus dikeluarkan untuk pengadaan *zinc anode* pada daerah daun kemudi kapal *tugboat* 28,5 meter adalah sebesar Rp. 3.360.314

Tabel 8 Perhitungan biaya anggaran pengadaan *zinc anode*

Lokasi	Type Anode	Jumlah (PCS)	Harga Satuan (Rp)	Total
Lambung	S9E	26	2.437.479	Rp.63.374.454
Daun kemudi	S4	2	1.048.580	Rp.2.097.160
Skeg	S8	2	1.680.157	Rp. 3.360.314
Total Anggaran Biaya Pengadaan <i>zinc anode</i> kapal <i>tugboat</i> 28,5 meter				Rp.68.831.928

Dapat dilihat pada tabel 6 dijelaskan mengenai estimasi pengadaan *zinc anode*, Biaya yang digunakan untuk pengadaan *zinc anode* dengan seri *S9E welding type* untuk pemasangan daerah lambung kapal, *zinc anode* seri *S4 welding type* untuk pemasangan daerah skeg dan *zinc anode* *S8 welding type* untuk pemasangan daerah daun kemudi lambung kapal *tugboat* 28,5 meter adalah sebesar Rp.68.831.928.

4 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian mengenai analisis perhitungan *zinc anode* sebagai katodik proteksi pada lambung kapal tugboat 28,5 meter. Berdasarkan BKI *rules for the classification and construction 2026 volume II section 38 dan guidance for the corrosion protection pt 1 vol. G ch 1, sec 8*, maka dapat disimpulkan sebagai berikut.

1. Berdasarkan perhitungan luas area basah, diperoleh luas area lambung kapal sebesar 331.8 m², luas area skeg sebesar 17.674 m², dan luas area daun kemudi sebesar 4,18 m². nilai luas area tersebut menjadi dasar dalam meentukan kebutuhan arus proteksi serta jumlah *zinc anode* yang diperlukan untuk melindungi seluruh bagian kapal yang terendam airlaut dari serangan korosi. Hasil analisis menunjukkan bahwa kebutuhan arus proteksi berdasarkan standar BKI adalah sebesar 4.980 mA pada area lambung, 265,11 mA pada area skeg, dan 62,7 mA pada area daun kemudi. Berdasarkan kebutuhan arus tersebut, total kebutuhan berat *zinc anode* yang diperlukan selama umur proteksi 5 tahun adalah 313,74 kg, yang terdiri dari 294,36 kg pada lambung, 15,67 kg pada skeg, dan 3,71 kg pada daun kemudi.
2. Berdasarkan hasil perhitungan kebutuhan anoda, pada area lambung kapal diperlukan 26 unit *Zinc Anode type S9E Welded* dengan berat 12 kg per unit. Sementara itu, pada area skeg digunakan 2 unit *Zinc Anode type S8* dengan berat 8 Kg per unit, dan pada area daun kemudi digunakan 2 unit *Zinc Anode type S4* dengan berat 4 Kg per unit, sehingga seluruh bagian bawah air kapal memperoleh perlindungan katodik yang optimal sesuai standar BKI.
3. Berdasarkan jumlah *zinc anode* yang telah diperoleh, jarak pemasangan antar *zinc anode* pada lambung kapal tugboat 28,5 meter ditentukan sekitar 2,2 meter. Jarak pemasangan tersebut dihitung agar distribusi arus proteksi yang dihasilkan oleh setiap *zinc anode* dapat menjangkau seluruh permukaan lambung secara merata tanpa menimbulkan area yang tidak terlindungi maupun pemasangan anoda yang berlebihan. Selain itu, penempatan *zinc anode* pada lambung, skeg, dan daun kemudi disusun berdasarkan hasil perhitungan kebutuhan masing-masing area sehingga sistem proteksi katodik dapat bekerja secara optimal. Dengan penerapan tata letak *zinc anode* sesuai hasil penelitian dan mengacu pada standar BKI *Rules for the Classification and Construction 2026 volume II section 38 dan guidance for the corrosion protection pt 1 vol. G ch 1, sec 8*, perlindungan terhadap korosi pada kapal tugboat 28,5 meter diharapkan menjadi lebih efektif, mampu memperpanjang umur layanan struktur kapal, mengurangi risiko kerusakan akibat korosi, serta mendukung efisiensi pemeliharaan selama periode operasi kapal.
4. Berdasarkan hasil perhitungan biaya pengadaan *zinc anode* sesuai dengan jumlah dan tipe anode yang digunakan, diperoleh estimasi total biaya sebesar Rp68.831.928. Estimasi biaya tersebut mencakup kebutuhan pengadaan seluruh *zinc anode* yang dipasang pada lambung kapal, skeg, dan daun kemudi untuk masa proteksi selama lima tahun. Hasil estimasi biaya ini dapat dijadikan sebagai acuan dalam penyusunan anggaran pengadaan sistem proteksi katodik pada kapal tugboat 28,5 meter serta sebagai bahan pertimbangan dalam perencanaan pemeliharaan kapal agar perlindungan terhadap korosi dapat dilakukan secara efektif dan ekonomis.

4.1. Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, terdapat beberapa saran yang dapat diberikan untuk pengembangan penelitian selanjutnya. Penelitian berikutnya diharapkan dapat menggunakan data kondisi aktual kapal yang lebih lengkap, seperti luas permukaan lambung yang terendam, kondisi *coating*, kondisi lingkungan perairan, serta data operasional kapal, sehingga hasil perencanaan *cathodic protection* dapat lebih mendekati kondisi sebenarnya. Selain itu, penelitian selanjutnya dapat mempertimbangkan penggunaan beberapa metode perhitungan atau membandingkan standar BKI dengan standar internasional lainnya, seperti DNV-RP-B401, untuk memperoleh hasil perencanaan yang lebih optimal.

Penelitian selanjutnya juga disarankan untuk melakukan analisis mengenai posisi, jumlah, jarak, dan distribusi *zinc anode* pada lambung kapal agar perlindungan terhadap korosi dapat berlangsung secara merata. Hasil perhitungan secara teoritis juga sebaiknya dapat dibandingkan dengan kondisi aktual di lapangan melalui inspeksi atau monitoring terhadap laju korosi dan kondisi *zinc anode* selama masa operasi kapal. Dengan demikian, hasil penelitian dapat memberikan rekomendasi yang lebih akurat dan dapat diterapkan sebagai dasar dalam perencanaan serta pemeliharaan sistem *cathodic protection* pada kapal.

5 Daftar Pustaka

- [1] M. P. ZABINA, "Analisis Penempatan Zinc Anode Untuk Perlindungan Korosi Pada Kapal Tugboat = Analysis Of Zinc Anode Placement For Corrosion Protection On Tugboats," other, Universitas Hasanuddin, 2024. Accessed: Apr. 08, 2026. [Online]. Available: <https://repository.unhas.ac.id/id/eprint/45978/>
- [2] P. Pongky, M. Manaseh, A. Kisanjani, and A. Asriansyah, "Pengukuran Laju Korosi Dan Umur Pakai Pelat Dasar Kapal Tug Boat Prima Star 7 Dengan Ultrasonic Thickness," *J. Rekayasa Mesin Dan Inov. Teknol.*, vol. 2, no. 2, pp. 127–132, Nov. 2021.
- [3] T. Mahendra and Dwistiono, "Proteksi Katodik Menggunakan Zinc Anode Untuk Menghambat Korosi Pada Lambung Kapal Port Link Vii Jakarta," *Hexag. J. Tek. Dan Sains*, vol. 3, pp. 56–62, Jan. 2022, doi: 10.36761/hexagon.v3i1.1492.
- [4] M. 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. 108–117, Jun. 2024, doi: 10.62012/mp.v3i2.35389.
- [5] "BKI Reliable | Homepage." Accessed: Apr. 16, 2026. [Online]. Available: <https://www.bkinusantara.co.id/rule-0-1.html>
- [6] P. Pratisna, D. Deriva, and N. W. Permana, "Comparative Study Of The Casualty Anode Cathodic Protection System Between Zinc Anode (Zn) And Aluminum Anode (Al) In KRI TJA-541," *Techno Bahari*, vol. 12, no. 1, Jul. 2025, doi: 10.52234/tb.v12i1.350.
- [7] R. V. Vignesh and P. Sathiya, "Sacrificial anode materials to protect marine grade steel structures: a review," *Corros. Rev.*, vol. 42, no. 3, pp. 303–330, Jun. 2024, doi: 10.1515/correv-2023-0099.
- [8] B. Hartanto and S. Salim, "Pemasangan Zinc Anoda Protection (ZAP) sebagai Perlindungan Aktif Korosi pada Kapal," *Maj. Ilm. Bahari Jogja*, vol. 21, pp. 21–27, Feb. 2023, doi: 10.33489/mibj.v21i1.315.
- [9] W. Widianingrum, J. Sade, and H. Palippui, "Analisis Peletakan dan Kebutuhan Proteksi Katodik Pada Mooring Buoy di Pertamina Fuel Terminal Luwuk," *Zona Laut J. Inov. Sains Dan Teknol. Kelaut.*, pp. 57–54, Jul. 2021, doi: 10.62012/zl.v2i2.14081.
- [10] W. Widianingrum, J. Sade, and H. Palippui, "Analisis Peletakan dan Kebutuhan Proteksi Katodik Pada Mooring Buoy di Pertamina Fuel Terminal Luwuk," *Zona Laut J. Inov. Sains Dan Teknol. Kelaut.*, pp. 18–25, Jul. 2021, doi: 10.20956/zl.v2i2.14081.
- [11] T. Mahendra and D. Dwisetiono, "Proteksi Katodik Menggunakan Zinc Anode Untuk Menghambat Korosi Pada Lambung Kapal Port Link Vii Jakarta," *Zona Laut J. Inov. Sains Dan Teknol. Kelaut.*, pp. 7–12, Jul. 2022, doi: 10.20956/zl.vi.19694.
- [12] V. Paulauskas, D. Paulauskas, and M. Simutis, "Estimation of Tug Pulling Power (Bollard Pull) and Number of Tugs Required During Ship Mooring Operations," *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 12, no. 11, p. 1959, Nov. 2024, doi: 10.3390/jmse12111959.