



PROPOSAL PENELITIAN TERAPAN

**EFISIENSI INSTALASI *ZINC ANODE BOLTED* DAN *WELDED* PADA
RUDDER MENGGUNAKAN *WEIGHT LOSS METHOD* DAN *LIFE
CYCLE COST ANALYSIS***

Diajukan untuk memenuhi sebagai persyaratan
gelar Sarjana Terapan

Disusun Oleh:

Eggal Marta Puspa Wardhani

40040422650033

**TEKNOLOGI REKAYASA KONSTRUKSI PERKAPALAN
DEPARTEMEN TEKNOLOGI INDUSTRI
SEKOLAH VOKASI
UNIVERSITAS DIPONEGORO/
SEMARANG**

2026

LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Enggal Marta Puspa Wardhani

NIM : 40040422650033

Judul Tugas Akhir : *EFISIENSI INSTALASI ZINC ANODE BOLTED DAN WELDED PADA RUDDER MENGGUNAKAN WEIGHT LOSS METHOD DAN LIFE CYCLE COST ANALYSIS*

Menyatakan dengan sebenarnya bahwa penulisan Proposal Laporan tugas Akhir ini berdasarkan hasil penelitian dan pemaparan asli saya sendiri. Jika terdapat karya orang lain, saya akan mencantumkan sumber yang jelas.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sesungguhnya dan apabila dikemudia hati terdapat penyimpangan dan ketidak benaran dalam pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi akademik berupa pencabutan gelar yang telah diperoleh karena Tugas Akhir ini dan sanksi lain sesuai dengan peraturan yang berlaku di Universitas Diponegoro.

Demikian pernyataan ini saya buat dalam keadaan nsadar tanpa paksaan dari pihak manapun.

Semarang, 15 Juni 2026

Yang membuat pernyataan

Enggal Marta Puspa Wardhani

40040422650033

HALAMAN PENGESAHAN TUGAS AKHIR

**EFISIENSI INSTALASI ZINC ANODE BOLTED DAN WELDED PADA RUDDER
MENGUNAKAN WEIGHT LOSS METHOD DAN LIFE CYCLE COST ANALYSIS**

Oleh :

Enggal Marta Puspa Wardhani

40040422650033

Diajukan pada

Sidang Tugas Akhir

Tanggal, 15 Juni 2026

Dinyatakan Lulus/Tidak Lulus

Sarjana Terapan Teknologi Rekayasa Konstruksi Perkapalan

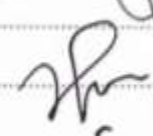
Dr. Mohd. Ridwan, S.T., M.T.

Pembimbing.....

Muhammad Sawal Baital, S.T., M.T.

Penguji 1.....

Dr. Aulia Windyandari, S.T., M.T.

Penguji 2.....

Mengetahui,

Ketua Program Studi
Teknologi Rekayasa Konstruksi Perkapalan
Sekolah Vokasi Universitas Diponegoro


Dr. Mohd. Ridwan, S.T., M.T.

NIP 197008271999031002

EFISIENSI INSTALASI ZINC ANODE BOLTED DAN WELDED PADA RUDDER MENGGUNAKAN WEIGHT LOSS METHOD DAN LIFE CYCLE COST ANALYSIS

Nama Mahasiswa : Enggal Marta Puspa Wardhani
NIM : 40040422650033
Nama Dosen Pembimbing : Dr. Mohd. Ridwan, S.T., M.T.

ABSTRAK

Korosi pada struktur *rudder* kapal dapat menurunkan umur pakai dan kinerja komponen sehingga diperlukan sistem proteksi katodik menggunakan *zinc anode* sebagai anoda korban (*sacrificial anode*). Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis efisiensi instalasi *zinc anode* metode *bolted* dan *welded* pada *rudder* kapal *ferry* berdasarkan tingkat konsumsi *anode*, umur pakai dan *Life Cycle Cost Analysis* (LCCA).

Penelitian dilakukan menggunakan *Weight Loss Method* dengan membandingkan berat awal dan berat akhir *zinc anode* setelah beroperasi selama 2,5 tahun. Selanjutnya dilakukan perhitungan laju konsumsi, estimasi umur pakai *zinc anode*, serta analisis biaya siklus hidup yang meliputi biaya awal, biaya perawatan, biaya penggantian, dan biaya operasional.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode *bolted* memiliki rata-rata kehilangan massa *zinc anode* sebesar 4,331 kg dengan laju konsumsi 1,732 kg/tahun, sedangkan metode *welded* memiliki rata-rata kehilangan massa sebesar 3,476 kg dengan laju konsumsi 1,390 kg/tahun. Estimasi umur pakai *zinc anode* pada metode *bolted* sebesar 4,41 tahun dan metode *welded* sebesar 5,18 tahun. Hasil *Life Cycle Cost Analysis* menunjukkan bahwa kedua metode memiliki biaya siklus hidup yang sama yaitu sebesar Rp2.900.000. Berdasarkan integrasi analisis teknis dan ekonomi, metode *welded* dinilai lebih optimal dibandingkan metode *bolted* karena memiliki laju konsumsi yang lebih rendah, umur pakai yang lebih panjang, serta mampu mengurangi frekuensi penggantian *zinc anode* selama masa operasional kapal.

Kata kunci: Zinc anode, rudder kapal, Weight Loss Method, Life Cycle Cost Analysis, bolted, welded.

EFFICIENCY OF BOLTED AND WELDED ZINC ANODE INSTALLATION ON RUDDER USING WEIGHT LOSS METHOD AND LIFE CYCLE COST ANALYSIS

Name of Student : Enggal Marta Puspa Wardhani
NIM : 40040422650033
Name of Supervising Lecturer : Dr. Mohd. Ridwan, S.T., M.T.

ABSTRACT

Corrosion on the ship's rudder structure can reduce the service life and performance of the components, so a cathodic protection system using a zinc anode as a sacrificial is required. This study aims to analyze the efficiency of bolted and welded zinc anode installations on ferry rudders based on anode consumption levels, service life, and Life Cycle Cost Analysis (LCCA).

The study was conducted using the Weight Loss Method, comparing the initial and final weights of the zinc anode after 2.5 years of operation. Furthermore, the consumption rate, estimated lifespan of the zinc anode, and a life-cycle cost analysis were performed, including initial costs, maintenance costs, replacement costs, and operational costs.

The results of the study showed that the bolted method had an average zinc anode mass loss of 4,331 kg with a consumption rate of 1,732 kg/year, while the welded method had an average mass loss of 3,476 kg with a consumption rate of 1,390 kg/year. The estimated service life of the zinc anode in the bolted method was 4.41 years and the welded method was 5.18 years. The results of the Life Cycle Cost Analysis showed that both methods had the same life cycle cost of Rp2,900,000. Based on the integration of technical and economic analysis, the welded method is considered more optimal than the bolted method because it has a lower consumption rate, longer service life, and is able to reduce the frequency of zinc anode replacement during the operational period of the ship.

Keywords: Zinc anode, ship rudder, Weight Loss Method, Life Cycle Cost Analysis, bolted, welded.

KATA PENGANTAR

Puji syukur atas kehadiran Allah SWT Tuhan Yang Maha Esa atas, sehingga penyusun dapat menyelesaikan pengerjaan proposal Tugas Akhir ini. Shalawat serta salam selalu terlimpahkan kepada junjungan alam Nabi Muhammad SAW. Penyusunan proposal Tugas Akhir ini bertujuan untuk memperoleh gelar sarjana terapan di Program Studi Teknologi Rekayasa Konstruksi Perkapalan Sekolah Vokasi Universitas Diponegoro.

Dengan terselesaikannya penyusunan proposal ini tidak terlepas dari bantuan serta bimbingan dari berbagai pihak terkait, sehingga penulis ingin menyampaikan rasa syukur serta mengucapkan terimakasih dan penghargaan setinggi-tingginya. Untuk tulisan ilmiah yang sederhana ini, maka penulis persembahkan untuk:

1. Bapak Martopo dan Ibu Elik Reliana selaku kedua orangtua saya yang yang senantiasa menjadi alasan terbesar bagi penulis untuk terus berjuang dan bertahan dalam setiap proses kehidupan, khususnya selama menempuh pendidikan hingga jenjang perguruan tinggi. Dengan penuh rasa hormat, cinta, dan kasih sayang, penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya atas segala pengorbanan, doa, dukungan, perhatian, serta kasih sayang yang tidak pernah berhenti mengalir kepada penulis. Terima kasih karena telah membesarkan penulis dengan penuh cinta dan ketulusan, mendidik dengan kesabaran, serta mengajarkan berbagai nilai kehidupan yang menjadi bekal berharga bagi penulis hingga saat ini. Terima kasih atas setiap usaha yang telah Bapak dan Ibu lakukan demi memberikan yang terbaik bagi penulis, bahkan di saat harus mengesampingkan kepentingan dan kebahagiaan pribadi. Penulis menyadari bahwa tidak sedikit perjuangan, tenaga, waktu, pikiran, dan pengorbanan yang telah dicurahkan agar penulis dapat memperoleh kesempatan untuk menempuh pendidikan dan meraih cita-cita. Dengan penuh rasa syukur dan cinta, penulis mempersembahkan skripsi ini sebagai wujud penghormatan dan rasa terima kasih yang mendalam kepada Bapak dan Ibu, yang telah mengusahakan segala hal terbaik bagi penulis dan menjadi anugerah terindah dalam kehidupan penulis. Semoga Tuhan Yang Maha Esa senantiasa melimpahkan kesehatan, kebahagiaan, serta keberkahan kepada Bapak dan Ibu atas segala cinta dan pengorbanan yang telah diberikan selama ini.
2. Saudara kandung saya Pranaya Bintang Wardhana, yang telah menjadi salah satu alasan terbesar bagi penulis untuk terus berjuang, bertahan, dan meraih kesuksesan. Penulis berharap segala perjuangan yang dilakukan hari ini dapat menjadi jalan agar kelak kamu tidak perlu merasakan kesulitan yang pernah penulis hadapi. Sebagai seorang kakak, penulis selalu memiliki keinginan untuk melihatmu tumbuh dengan bahagia, memperoleh kesempatan yang lebih baik, serta meraih pencapaian yang jauh lebih tinggi daripada yang mampu penulis raih. Terima kasih telah menjadi sumber semangat dan pengingat bagi penulis bahwa setiap usaha dan pengorbanan yang dilakukan akan terasa berarti apabila dapat menghadirkan kebahagiaan serta masa depan yang lebih baik bagi orang-orang yang dicintai.
3. Bapak Dr. Mohd. Ridwan, S.T., M.T., selaku Kepala Program Studi Teknologi Rekayasa Konstruksi Perkapalan Sekolah Vokasi Universitas Diponegoro yang telah memberikan arahan, dukungan, serta fasilitas akademik kepada penulis selama menempuh pendidikan hingga proses penyusunan skripsi ini.
4. Dr. Mohd. Ridwan, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing Tugas Akhir yang telah yang telah meluangkan waktu, tenaga, pikiran, serta kesabaran dalam membimbing dan mengarahkan penulis selama proses penyusunan skripsi ini. Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya atas segala ilmu, masukan, kritik, saran, serta motivasi yang diberikan sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian dan penulisan skripsi ini dengan baik. Bimbingan, ketelitian, dan perhatian yang diberikan tidak hanya membantu penulis

dalam menyelesaikan tugas akhir ini, tetapi juga memberikan banyak pelajaran berharga yang akan menjadi bekal bagi penulis dalam menghadapi dunia akademik maupun kehidupan profesional di masa mendatang.

5. Semua dosen Program Studi Teknologi Rekayasa Konstruksi Perkapalan, penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya atas dedikasi, kesabaran, dan ketulusan dalam mendidik serta membagikan ilmu yang sangat berharga. Setiap pembelajaran, nasihat, dan pengalaman yang diberikan selama masa perkuliahan telah menjadi bekal penting bagi penulis dalam mengembangkan kemampuan akademik maupun pribadi. Semoga segala ilmu dan kebaikan yang telah diberikan menjadi amal jariyah yang senantiasa memberikan manfaat bagi banyak generasi mahasiswa.
6. Saudara sahabat penulis, Hati, Sandra, dan Rizka, yang telah menjadi bagian penting dalam perjalanan hidup penulis sejak masa SMP hingga saat ini. Penulis mengucapkan terima kasih atas kebersamaan, dukungan, serta berbagai cerita dan pengalaman yang telah dilalui bersama selama bertahun-tahun. Merupakan suatu kebahagiaan dan rasa syukur tersendiri bagi penulis karena persahabatan yang dimulai sejak usia muda dapat terus terjaga hingga kini, ketika masing-masing telah berada pada tahap kehidupan yang berbeda dan sedang berjuang meraih tujuan masing-masing. Terima kasih karena selalu menjadi tempat berbagi cerita, bertukar pikiran, dan saling memberikan dukungan dalam berbagai keadaan. Penulis berharap persahabatan yang telah terjalin ini tidak hanya menjadi bagian dari masa sekolah atau masa perkuliahan semata, tetapi dapat terus bertahan dan tumbuh hingga di masa yang akan datang. Semoga kebersamaan yang berawal dari “BIPOLAR” ini tetap menjadi satu ikatan yang kuat, dan semoga kelak kita dapat kembali mengenang perjalanan panjang yang telah dilalui bersama dengan rasa bangga dan bahagia.
7. Teman dan sahabat perantauan saya Zara, Hasbiya, Aurel, Nazwa, Okta, Dhandi, Bima, Jeje dan Farah, terimakasih untuk waktu yang dihabiskan bersama, untuk segala rasa sedih dan senang yang kita lalui bersama. Terima kasih karena selalu hadir sebagai teman untuk berbagi cerita, bertukar pikiran, menghabiskan waktu, serta menemani penulis dalam berbagai situasi, baik dalam proses akademik maupun kehidupan sehari-hari. Kehadiran kalian telah memberikan banyak warna, kenyamanan, dan kenangan berharga selama masa perkuliahan. Penulis merasa bersyukur dapat dipertemukan dengan orang-orang baik yang membuat perjalanan sebagai seorang perantau terasa lebih ringan dan bermakna. Semoga pada kesempatan lain kita masih bisa dipertemukan sebagai seseorang yang pernah belajar untuk bertahan hidup bersama.
8. Teman-teman NASA 22, yang telah menjadi bagian dari perjalanan penulis selama menempuh pendidikan di perguruan tinggi. Penulis mengucapkan terima kasih atas kebersamaan, dukungan, serta berbagai pengalaman yang telah dibagikan selama kurang lebih empat tahun terakhir. Kehadiran kalian membuat penulis memahami bahwa dunia perkuliahan tidak sesulit dan semengerikan yang dibayangkan, karena setiap tantangan, tekanan, dan proses yang dijalani terasa lebih ringan ketika dihadapi bersama. Terima kasih atas setiap kerja sama, diskusi, canda, cerita, dan kenangan yang telah tercipta selama masa perkuliahan. Empat tahun yang telah dilalui bersama menjadi bagian yang sangat berharga dalam kehidupan penulis dan akan selalu dikenang sebagai salah satu fase terbaik yang pernah dijalani. Penulis percaya bahwa berbagai momen, pengalaman, serta kebersamaan yang telah terjalin tidak akan mudah dilupakan, bahkan ketika kelak masing-masing telah menempuh jalan hidupnya sendiri. Semoga seluruh kenangan baik yang telah kita bangun bersama dapat menjadi cerita yang selalu membangkitkan rasa syukur dan kebahagiaan ketika dikenang di masa mendatang.
9. Terakhir, kepada diri penulis sendiri, terima kasih karena telah memilih untuk tetap bertahan dan terus melangkah hingga berada pada titik ini. Terima kasih karena telah mampu melewati berbagai kesedihan, kekecewaan, dan luka yang tidak selalu dapat

diceritakan kepada orang lain, namun tetap berusaha berdiri dengan tegar untuk menyelesaikan setiap tanggung jawab yang telah dimulai. Perjalanan ini tidak selalu mudah, tetapi setiap air mata, rasa lelah, dan kegagalan telah menjadi bagian dari proses yang membentuk penulis menjadi pribadi yang lebih kuat dan dewasa. Di tengah berbagai keraguan, penulis belajar bahwa menyerah bukanlah pilihan, karena selalu ada harapan yang menunggu di ujung perjuangan

Di tengah berbagai fase tersebut, karya-karya Hindia menjadi salah satu teman yang menemani perjalanan penulis. Salah satu penggalan lirik dari lagu "Evaluasi", yaitu "yang tak bisa terobati biarlah mengering sendiri", menjadi pengingat bahwa tidak semua luka harus segera hilang untuk tetap melanjutkan hidup. Bagi penulis, lagu tersebut menyampaikan pesan tentang menerima proses, berdamai dengan masa lalu, dan terus berjalan meskipun tidak selalu dalam keadaan baik-baik saja.

Penulis menyadari bahwa laporan ini masih jauh dari kesempurnaan, baik dari materi maupun teknik penyajiannya. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran konstruktif dari pembaca demi kesempurnaan laporan ini di kemudian hari.

Akhir kata, penulis berharap Proposal Tugas Akhir ini tidak hanya menjadi catatan akhir akademis, tetapi juga inspirasi bagi perjalanan pengetahuan di masa yang akan datang. Semoga karya ini dapat memberikan manfaat bagi banyak pihak. Semoga Allah SWT Tuhan Yang Maha Esa senantiasa memberikan berkah dan petunjuk-Nya kepada kita semua.

Semarang, 15 Juni 2026

Enggal Marta Puspa Wardhani

DAFTAR ISI

LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN	ii
HALAMAN PENGESAHAN TUGAS AKHIR.....	iii
ABSTRACT	v
KATA PENGANTAR.....	vi
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR ISTILAH	xiv
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	2
1.4 Batasan Masalah.....	2
1.5 Manfaat Penelitian	3
1.6 Rencana Luaran Peneltian	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	4
2.1 Korosi pada Struktur Kapal.....	4
2.2 Struktur <i>Rudder</i> Kapal	4
2.3 Zinc Anode	5
2.4 Efisiensi Proteksi Korosi Menggunakan <i>Weight Loss Method</i>	6
2.5 Konsep <i>Life Cycle Cost Analysis</i> dalam Sistem Proteksi Korosi	6
2.6 Penelitian Terdahulu.....	7
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	10
3.1 Perumusan Masalah.....	11
3.2 Studi Literatur	11
3.3 Pengumpulan Data	11
3.3.1 Identifikasi Kapal	11
3.3.2 Pengukuran Berat Sisa <i>Zinc Anode (Weight Loss Method)</i>	11
3.3.3 Observasi Kondisi Fisik <i>Zinc Anode</i>	11
3.3.4 Identifikasi Diskontinuitas <i>Bolted</i> dan <i>Welded</i>	12
3.3.5 Pengumpulan Data Biaya Instalasi.....	12
3.4 Variabel Penelitian	12
3.4.1 Variabel Independen	12

3.4.2	Variabel dependen	12
3.4.3	Hubungan antar variabel	13
3.5	Pengolahan Data Kuantitatif	13
3.5.1	Pengolahan Data Berat <i>Zinc Anode</i>	13
3.5.2	Perhitungan Laju Konsumsi <i>Zinc Anode (Weight Loss Method)</i>	13
3.5.3	Perhitungan Umur Pakai <i>Zinc Anode (Interval Penggantian)</i>	13
3.5.4	Kuantifikasi Diskontinuitas Terhadap Laju Korosi	14
3.5.5	Pengolahan Data Biaya	14
3.5.6	Perhitungan <i>Life Cycle Cost Analysis</i>	14
3.5.7	Penentuan Metode Instalasi Optimal	16
3.6	Hasil dan Pembahasan	16
BAB IV	17
4.1	Pendahuluan Hasil Pembahasan	17
4.2	Hasil Pengolahan Data <i>Weight Loss Method</i>	17
4.3	Perbandingan Laju Konsumsi dan Umur Pakai <i>Zinc Anode</i>	20
4.3.1	Laju Konsumsi (kg/tahun)	20
4.3.2	Estimasi Umur Pakai <i>Zinc Anode</i>	24
4.4	Pengaruh Diskontinuitas terhadap Laju Konsumsi	25
4.4.1	Diskontinuitas Mekanik (<i>Bolted</i>)	25
4.4.2	Diskontinuitas Termal (<i>Welded</i>)	26
4.4.3	Kuantifikasi Diskontinuitas terhadap Laju Korosi	27
4.5	Hasil <i>Life Cycle Cost Analysis</i>	28
4.5.1	Perhitungan <i>Life Cycle Cost Analysis</i> Metode <i>Welded</i>	29
4.5.2	Perhitungan <i>Life Cycle Cost Analysis</i> Metode <i>Bolted</i>	30
4.6	Integrasi Analisis Teknis dan Ekonomi	31
4.7	Penentuan Metode Instalasi Optimal	32
BAB V	36
5.1	Kesimpulan	36
5.2	Saran	36
DAFTAR PUSTAKA	38
LAMPIRAN	40

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Rudder Kapal (Sumber : asmarines.com, 2022)	5
Gambar 2. 2 Zinc Anode (Sumber: asmarines.com, 2025).....	5
Gambar 3. 1 Flowchart Penelitian (Sumber: Penulis, 2026).....	10
Gambar 4. 1 Perhitungan Berat Akhir Zinc Anode (Sumber: Penulis, 2026).....	17
Gambar 4. 2 Zinc Anode Bolted pada Rudder Kapal	29

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Penelitian Terdahulu (Sumber: Penulis, 2026)	7
Tabel 4. 1 Data Utama Zinc Anode (Sumber: Penulis, 2026)	18
Tabel 4. 2 Data Pengurangan Massa Zinc Anode (Sumber: Penulis, 2026)	18
Tabel 4. 3 Komposisi Zinc Anode (Sumber: PT. Vescarindo Utama).....	19
Tabel 4. 4 Hasil Perhitungan Laju Konsumsi (Sumber: Penulis, 2026)	23
Tabel 4. 5 Rekapitulasi Laju Konsumsi Berdasarkan Metode Instalasi (Sumber: Penulis, 2026) .	24
Tabel 4. 6 Diskontinuitas Mekanik Instalasi Metode Bolted (Sumber: Penulis, 2026)	26
Tabel 4. 7 Diskontinuitas Termal Instalasi Metode Welded (Sumber: Penulis, 2026)	26
Tabel 4. 8 Integrasi Analisis Teknis dan Ekonomi Metode Welded dan Bolted	31
Tabel 4. 9 Rekapitulasi Hasil Analisis (Sumber: Penulis, 2026)	33

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Timeline Penelitian	40
Lampiran 2. Pengukuran Kehilangan Massa Zinc Anode Welded	41
Lampiran 3. Pengukuran Kehilangan Massa Zinc Anode Bolted.....	42
Lampiran 4. Pengurangan Massa Zinc Anode	43
Lampiran 5. Pelepasan Zinc Anode dari Rudder Kapal.....	44
Lampiran 6. Modul	45
Lampiran 7. Jurnal.....	46
Lampiran 8. Sertifikat HKI.....	52

DAFTAR ISTILAH

<i>Activator</i>	: Penggerak
<i>Adlayer</i>	: Layer yang telah terbentuk di permukaan suatu material melalui proses adsorpsi (partikel benda asing yang menempel pada permukaan bahan padat atau cair).
Aerosol	: Partikel padat atau cair berukuran sangat kecil yang tersuspensi di udara.
ASTM	: <i>American Society for Testing and Materials</i> yang merupakan organisasi internasional yang menetapkan standar pengujian dan spesifikasi material.
<i>Cavitation</i>	: Pembentukan dan pecahnya gelembung uap dalam fluida akibat penurunan tekanan yang dapat merusak permukaan material.
<i>Cathodic Protection</i>	: Metode pengendalian korosi dengan menjadikan logam sebagai katoda dalam sistem elektrokimia.
Degradasi	: Penurunan kualitas atau kinerja material akibat pengaruh lingkungan atau proses pemakaian.
Diskontinuitas Mekanik	: Ketidakteraturan pada material atau sambungan yang memengaruhi sifat mekaniknya.
Diskontinuitas Termal	: Ketidaksinambungan distribusi suhu pada material yang dapat menimbulkan tegangan termal.
Elektrolit	: Medium yang dapat menghantarkan arus listrik melalui perpindahan <i>ion</i> .
Fluktasi suhu	: Perubahan suhu yang terjadi secara tidak tetap atau periodik.
Fouling	: Penumpukan atau pengotoran aterial pada permukaan peralatan yang menghambat kinerja sistem, terutama dalam perpindahan panas atau filtrasi.

Gravimetri	: Teknik analisis kuantitatif dalam kimia yang mengukur konsentrasi suatu zat berdasarkan beratnya
HAZ	: <i>Heat Affected Zone</i> merupakan daerah di sekitar las yang mengalami perubahan sifat akibat panas pengelasan tanpa meleleh.
<i>Heat Input</i>	: Besarnya energi panas yang diberikan selama proses pengelasan per satuan panjang sambungan.
Homogenitas	: Kondisi di mana data dalam sebuah kelompok atau antar kelompok memiliki variansi yang serupa atau sama.
ICCP	: <i>Impressed Current Cathodic Protection</i> merupakan sistem proteksi katodik yang menggunakan arus listrik eksternal untuk mengendalikan korosi.
Impuritas	: Keadaan atau kualitas suatu benda atau substansi yang menjadi tidak murni atau tercemar oleh zat asing atau kotoran.
Inhibitor	: Zat yang ditambahkan untuk memperlambat atau menghambat laju reaksi korosi.
Instalasi <i>Bolted</i>	: Metode pemasangan komponen menggunakan baut sebagai pengikat tanpa proses pengelasan.
Instalasi <i>Welded</i>	: Metode pemasangan komponen dengan proses pengelasan sehingga menyatu secara permanen dengan struktur.
<i>Interval</i>	: Jangka waktu antara dua kejadian atau kegiatan yang berurutan.
Ketidakhomogenan	: Kekurangan keseragaman atau konsistensi dalam sistem, bahan atau harta.
Komprehensif	: Sesuatu yang bersifat menyeluruh, lengkap, dan mencakup berbagai aspek.
Konfigurasi	: Susunan atau tata letak komponen dalam suatu sistem atau struktur.

Kontinuitas	: Kesenambungan, kelangsungan, kelanjutan, atau keadaan kontinu
LCCA	: <i>Life Cycle Cost Analysis</i> merupakan metode analisis biaya yang mempertimbangkan seluruh biaya selama umur layanan suatu sistem atau komponen.
<i>Maneuvering</i>	: Proses pengendalian arah dan gerak kapal saat beroperasi.
Manufaktur	: Proses mengubah bahan mentah menjadi produk jadi yang memiliki nilai jual melalui penggunaan mesin, tenaga kerja, dan teknologi.
Mikrostruktur	: Struktur material yang berukuran sangat kecil.
Oksidasi	: Reaksi kimia yang melibatkan pelepasan electron dari suatu zat, sering dikaitkan dengan proses korosi.
Polaritas	: Konsep yang menggambarkan adanya dua sifat atau kutub yang berlawanan, baik dalam konteks kimia, fisika, maupun social.
Representatif	: Dapat mewakili (cakap dan tepat).
Resistansi	: Kemampuan suatu bahan atau komponen untuk menghambat aliran arus listrik, diukur dalam satuan ohm.
SACP	: <i>Sacrificial Anode Cathodic Protection</i> merupakan metode proteksi katodik yang menggunakan anoda korban untuk melindungi logam utama dari korosi.
Salinitas air.	: Tingkat kandungan garam terlarut dalam air.
Vibrasi	: Gerakan osilasi atau getaran yang terjadi pada suatu benda akibat gaya atau beban dinamis.
<i>Weight Loss Method</i>	: Metode pengukuran laju korosi berdasarkan selisih berat spesimen sebelum dan sesudah periode pengujian.

Zinc Anode

: Anoda berbahan seng yang digunakan sebagai anoda korban dalam sistem proteksi katodik.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Penggunaan plat baja pada struktur kapal merupakan hal umum yang digunakan sebagai bahan pembuatan kapal karena cukup memadai. Tetapi besi dan baja sangat reaktif sehingga mempunyai kecenderungan mengalami korosi di daerah korosif yakni air laut. Korosi merupakan gejala alamiah yang biasa terjadi didalam plat kapal sebagai akibat interaksi dengan lingkungan sekitarnya sehingga mengalami perubahan massa dalam lingkungan korosif (Susilowati & Simbolon, 2019).

Korosi kapal baja mengakibatkan turunnya kekuatan dan umur pakai kapal, sehingga dapat mengurangi jaminan keselamatan muatan barang dan penumpang kapal (Sudjasta et al., 2018). Untuk menghindari kerugian yang lebih besar akibat korosi air laut maka diperlukan suatu perlindungan korosi pada plat kapal. Korosi kapal dapat di tanggulasi dengan berbagai cara antara lain dengan menggunakan anoda karbon kapal (Susilowati & Simbolon, 2019). Penelitian ini mengarah pada efektivitas anode korban dalam dua metode yaitu las dan baut. Penentuan proteksi untuk bagian *rudder* kapal merupakan sesuatu yang sangat penting guna memproteksi kapal dari biota laut dan karat yang pasti akan mempengaruhi operasional kapal. Perbedaan pengaplikasian anoda korban memiliki perbedaan pada biaya operasional dan juga korosi yang terjadi pada bagian *rudder*.

Katodic protection dapat didefinisikan dalam arti sel elektrokimia untuk mengendalikan korosi dengan mengkonsetrasikan reaksi oksigen pada sel galvanis dan menekan korosi pada katoda dalam sel yang sama pada proteksi katodik, logam yang kana di lindungi dijadikan katoda dan reaksi oksidasi akan terjadi pada anoda (Sade & A, 2024). (Anoda adalah tempat terjadinya oksidasi) sedangkan (Katoda adalah tempat berlangsungnya reduksi) dimana hubungan tersbut menunjukkan bahwa penambahan elektron ke struktur akan menekan penguraian logam dan meningkatkan laju pembentukan *hydrogen*, jika arus mengalir dari kutub (+) ke (-), maka struktur terlindungi jika arus memasuki struktur/logam melalui elektrolit (*View of ANALISA KEBUTUHAN ANODA KORBAN ...KAPAL DI PT. INDONESIA MARINA SHIPYARD.Pdf*, n.d.).

Ada beberapa metode untuk mencegah dan mengehentikan korosi, dan seringkali sulit bagi insinyur dan lembaga transportasi untuk memilih metode terbaik dalam situasi tertentu. Memilih langkah-langkah perbaikan yang tepat sangat penting tidak hanya untuk memastikan masalah teratasi sepenuhnya, tetapi juga agar biayanya tidak terlalu mahal untuk membenarkan pekerjaan tersebut. Karena langkah-langkah perbaikan terkait dengan biaya yang signifikan, maka penerapan *Life Cycle Cost Analysis* (LCCA) diperlukan dalam menentukan strategi rehabilitasi yang benar-benar efisien secara biaya (How & Rahman, 2004). Penelitian ini fokus pada perbandingan efisiensi penggunaan dan total biaya yang ada pada *Zinc Anode Bolted* dan *Zinc Anode Welded*.

Beberapa metode yang dapat diterapkan pada penelitian ini salah satunya adalah *Weight Loss Method* yang mampu menghitung penurunan berat dari media yang di teliti. *Weight Loss Method* masih menjadi cara yang paling banyak digunakan untuk menentukan laju korosi material berbasis logam, meskipun merupakan metode tertua yang saat ini digunakan. Metode ini melibatkan pemaparan *specimen* logam yang di uji ke lingkungan tertentu (yaitu, media korosif) selama waktu pemaparan yang cukup, setelah itu *specimen* dikeluarkan dari lingkungan tersebut dan perubahan beratnya sebelum dan sesudah pemaparan kemudian ditentukan, yang dikenal sebagai *Weight Loss* (L. Liu et al., 2018).

Berdasarkan tinjauan tersebut, penelitian terdahulu menunjukkan bahwa penelitian yang dilakukan berfokus antara efisiensi dan material yang digunakan pada *zinc anode*.

Sebagian besar studi tidak menganalisis perbandingan mengenai metode yang digunakan pada instalasi *anode* korban yang terdapat dua metode yaitu *bolted* (baut) dan *welded* (las). Perbandingan dari kedua metode tersebut belum menemukan hasil mengenai mana yang lebih efisien dari segi biaya dan perlindungan mana yang lebih memproteksi dari korosi. Apabila pemasangan anoda karbon disusun berdasarkan luas plat pada lambung kapal/area bawah garis air maka dapat di bagi sesuai dengan jarak masing-masing lajur pelat lambung kapal dengan kebutuhan anoda karbon dan sesuai dengan perhitungan dan penambahan 20% untuk tempat kritis, seperti area yang mengalami arus yang deras atau daerah yang dinilai cukup penting untuk bagian kapal (*View of ANALISA KEBUTUHAN ANODA KORBAN ...KAPAL DI PT. INDONESIA MARINA SHIPYARD.Pdf*, n.d.).

Penelitian ini bertujuan untuk menentukan instalasi *zinc anode* yang paling optimal pada struktur *rudder* kapal dengan melakukan studi komparatif antara metode penyambungan mekanik (*bolted*) dan termal (*welded*) guna menekan laju korosi seminimal mungkin. Melalui penerapan metode kehilangan berat (*Weight Loss Method*), penelitian ini secara mendalam mengevaluasi bagaimana fenomena diskontinuitas mekanik berupa celah pada sistem baut serta pengaruh masukan panas (*heat input*) pada proses pengelasan memengaruhi integritas material plat dan efektivitas perlindungan katodik secara keseluruhan. Selain aspek teknis, penelitian ini juga mengintegrasikan analisis efisiensi melalui *Life Cycle Cost Analysis* untuk mengidentifikasi metode instalasi yang tidak hanya unggul dalam ketahanan proteksi, tetapi juga paling ekonomis dari segi biaya operasional, waktu pengerjaan, dan kemudahan pemeliharaan. Dengan membandingkan kedua metode ini dari sudut pandang teknis dan ekonomi, penelitian ini bertujuan unyuk memberikan landasan pengambilan keputusan bagi pemilik kapal dalam memilih sistem proteksi yang tidak hanya handal secara mekanis menahan vibrasi pada *rudder*, tetapi juga lebih efisien secara finansial dalam jangka panjang, yang pada akhirnya berkontribusi pada peningkatan daya saing industri pelayaran melalui reduksi biaya perawatan tahunan.

1.2 Rumusan Masalah

1. Bagaimana perbandingan laju konsumsi dan umur pakai *zinc anode* pada instalasi *bolted* dan *welded* pada *rudder* kapal berdasarkan *Weight Loss Method*?
2. Bagaimana pengaruh diskontinuitas mekanik (*bolted*) dan diskontinuitas termal (*welded*) terhadap efisiensi perlindungan korosi *zinc anode* pada *rudder* kapal?
3. Metode instalasi *zinc anode* manakah (*bolted* atau *welded*) yang lebih efisien secara biaya selama masa pakai berdasarkan *Life Cycle Cost Analysis*?

1.3 Tujuan Penelitian

1. Menganalisis perbandingan laju konsumsi dan umur pakai *zinc anode* pada instalasi *bolted* dan *welded* pada struktur *rudder* kapal menggunakan *Weight Loss Method*.
2. Mengevaluasi pengaruh diskontinuitas mekanik (*bolted*) dan diskontinuitas termal (*welded*) akibat perbedaan metode instalasi *zinc anode* terhadap efisiensi perlindungan korosi pada struktur *rudder* kapal.
3. Menentukan metode instalasi *zinc anode* yang paling efisien secara biaya antara sistem *bolted* dan *welded* berdasarkan *Life Cycle Cost Analysis* selama masa pakai *zinc anode*.

1.4 Batasan Masalah

1. Penelitian ini hanya berfokus pada struktur *rudder* kapal, tidak mencakup bagian kapal yang lain.

2. Jenis anoda yang digunakan hanya dibatasi pada *zinc anode*, tidak membandingkan dengan komposisi yang lain seperti aluminium atau *magnesium anode*.
3. Variasi lingkungan dibatasi pada kondisi air laut standar, tanpa mempertimbangkan variasi salinitas dan *temperature* ekstrem yang terjadi.
4. Pada analisis biaya ini hanya membandingkan biaya operasional untuk menghitung kebutuhan *zinc anode* metode *bolted* dan *welded* pada *rudder* kapal.
5. Metode pemasangan (instalasi) yang dianalisis hanya seputar *bolted* dan *welded*, tanpa mempertimbangkan variasi jenis baut, elektroda, atau metode pengelasan lainnya.
6. Pada penelitian ini tidak mencakup desain dari *rudder* kapal dan *zinc anode* yang akan di *instal*.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat teoritis dari penelitian ini adalah dapat memberikan kontribusi signifikan terhadap pengembangan literasi di bidang teknik perkapalan, khususnya mengenai dinamika proteksi katodik pada area yang memiliki tingkat turbulensi dan vibrasi tinggi seperti *rudder* kapal. Secara akademis, studi ini memperkaya referensi ilmiah terkait perbandingan efektivitas antara sambungan mekanik (*bolted*) dan sambungan termal (*welded*) dengan mengintegrasikan prinsip ekonomi teknik melalui metode *Life Cycle Cost Analysis (LCCA)*. Dengan demikian, hasil penelitian ini dapat menjadi landasan teoritis bagi peneliti selanjutnya dalam mengkaji perilaku material korosi dan optimalisasi sistem proteksi pada komponen kapal yang memiliki vibrasi tinggi.

Manfaat praktis dari hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi acuan teknis bagi galangan kapal, perancang, dan operator kapal dalam menentukan metode instalasi struktur *rudder* serta parameter pemasangan *zinc anode* yang paling efektif dan ekonomis. Evaluasi laju korosi dan *Life Cycle Cost Analysis (LCCA)* memungkinkan pemilihan konfigurasi instalasi yang mampu menekan laju degradasi material, memperpanjang umur pakai *zinc anode*, serta mengurangi frekuensi perawatan dan penggantian anode. Dengan demikian, penelitian ini berkontribusi langsung terhadap peningkatan efisiensi biaya operasional, keandalan sistem *rudder*, dan keberlanjutan operasional kapal selama masa layanannya.

1.6 Rencana Luaran Penelitian

1. Paper publikasi pada jurnal nasional terakreditasi.
2. Modul penerapan metode *Weight Loss Method* dan *Life Cycle Cost Analysis* dalam perbandingan laju konsumsi *zinc anode bolted* (mekanik) dan *zinc anode welded* (termal).

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Korosi pada Struktur Kapal

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

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

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

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

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

2.2 Struktur Rudder Kapal

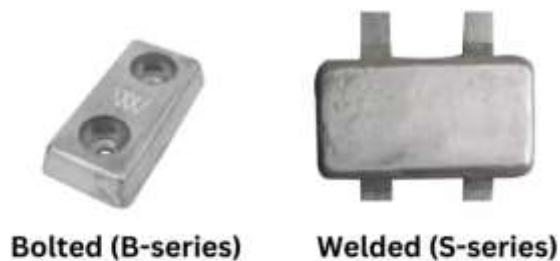


Gambar 2. 1 *Rudder* Kapal (Sumber : asmarines.com, 2022)

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

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

2.3 Zinc Anode



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

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

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

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

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

2.4 Efisiensi Proteksi Korosi Menggunakan *Weight Loss Method*

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

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

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

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

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

2.6 Penelitian Terdahulu

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

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

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

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

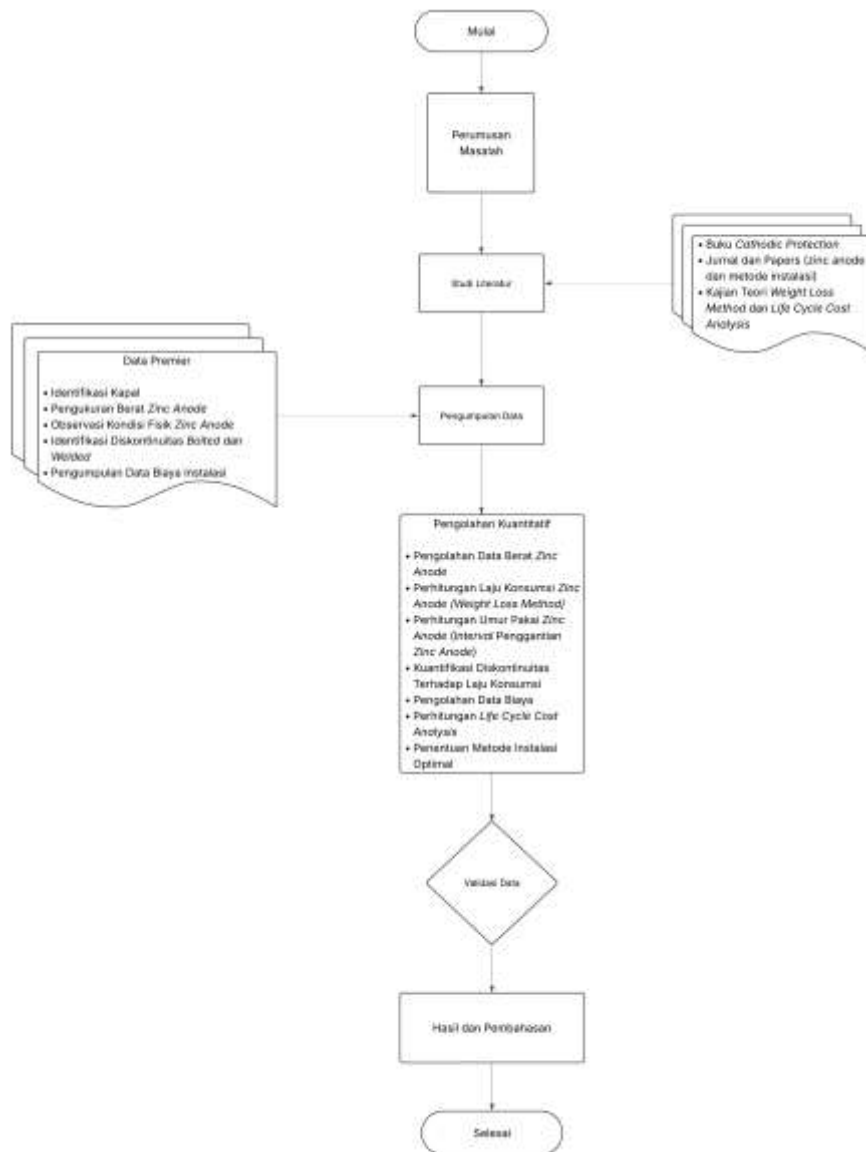
				40%. Studi ini menyoroti pentingnya optimasi desain sistem <i>anode</i> , namun tidak membahas metode sambungan atau aspek siklus hidup.
7.	“ <i>Review of Cathodic Protection Tecknology for Steel Rebars in Marine Environment</i> ” – Z. Guo et al.	2024	Review teknis dan komparatif.	Studi ini menunjukkan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

Kesimpulan:

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

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini berisi tentang penjelasan tahapan penelitian yang termasuk langkah-langkah atau prosedur yang harus dilakukan, waktu yang dibutuhkan, data yang diperlukan dan cara yang digunakan. Berikut ini adalah tahapan yang akan dilakukan pada penelitian ini yang dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 3. 1 *Flowchart* Penelitian (Sumber: Penulis, 2026)

3.1 Perumusan Masalah

Perumusan masalah merupakan langkah awal untuk mengidentifikasi suatu masalah yang akan dijadikan latar belakang penulisan penelitian. Tahap ini memiliki tujuan untuk menjelaskan latar belakang, merumuskan masalah, menetapkan tujuan yang akan dicapai, dan menetapkan batasan yang akan dicapai, dan menetapkan batasan yang akan membantu dalam penulisan serta penyelesaian masalah.

3.2 Studi Literatur

Studi literatur bertujuan untuk merangkum teori dasar, acuan secara umum dan khusus, serta mendapatkan berbagai macam sumber informasi pendukung. Studi literatur bisa dilakukan dengan cara membaca dan merangkum isi buku, jurnal, skripsi yang berhubungan, ataupun dengan melakukan diskusi dengan dosen pembimbing. Hasil studi literatur nantinya akan digunakan sebagai acuan untuk menentukan langkah-langkah dalam penyelesaian masalah.

3.3 Pengumpulan Data

Pengumpulan data digunakan sebagai objek penelitian. Data yang diperlukan dalam penelitian ini adalah:

3.3.1 Identifikasi Kapal

Identifikasi kapal dan struktur *rudder* dilakukan pada tahap awal yang berfungsi untuk memastikan kesesuaian objek penelitian dengan ruang lingkup penelitian yang telah ditetapkan. Pada tahap pertama ini akan dilakukan pendataan atau pencatatan data utama kapal seperti, jenis kapal, umur kapal, serta material struktur *rudder*. Selain itu, tahap ini dilakukan identifikasi lokasi instalasi *zinc anode* pada *rudder*, jumlah *zinc anode* yang ter-instalasi, serta metode instalasi yang digunakan, yaitu *bolted* dan *welded*. Identifikasi pada kapal ini diperlukan untuk memberikan gambaran kondisi operasional dan lingkungan kerja *zinc anode* selama masa pemakaian.

3.3.2 Pengukuran Berat Sisa Zinc Anode (Weight Loss Method)

Lalu tahapan selanjutnya merupakan pengukuran berat sisa *zinc anode* yang ada di kapal dilakukan dengan menimbang *zinc anode* yang telah terlepas dari struktur *rudder* kapal saat kapal melakukan pengedokan. Pengukuran ini dilakukan dilakukan pada *zinc anode* metode *bolted* maupun *zinc anode* metode *welded*. Berat *zinc anode* yang telah di dapat kemudian akan dibandingkan dengan berat awal *zinc anode* berdasarkan spesifikasi teknis atau data dari pabrik. Data berat sisa ini menjadi parameter utama dalam *Weight Loss Method* untuk menentukan besarnya kehilangan massa *zinc anode* selama periode operasional kapal.

3.3.3 Observasi Kondisi Fisik Zinc Anode

Pada tahapan observasi kondisi fisik dari *zinc anode* ini dilakukan untuk mengevaluasi tingkat keausan *zinc anode* selama masa pemakaian. Pengamatan yang

dilakukan meliputi tingkat pengikisan permukaan *zinc anode*, keseragaman konsumsi material, serta adanya indikasi kerusakan local seperti retak atau pengikisan yang tidak merata. Hasil observasi tahap ini akan digunakan untuk penilaian efektivitas kinerja *zinc anode* dalam memberikan perlindungan katodik pada struktur *rudder* serta untuk mendukung interpretasi hasil perhitungan laju korosi.

3.3.4 Identifikasi Diskontinuitas *Bolted* dan *Welded*

Identifikasi diskontinuitas mekanik dilakukan pada *zinc anode* yang dipasang menggunakan metode *bolted* (baut) dan *welded* (las). Pada metode *bolted*, pemeriksaan difokuskan pada kondisi sistem pengikatan, meliputi kekencangan baut, keberadaan celah antara *zinc anode* dan permukaan struktur *rudder*. Lalu pada metode *welded* difokuskan pada zona yang terpengaruh panas atau *Heat Affected Zone* (HAZ), yang berpotensi mengalami perubahan sifat material akibat proses pengelasan. Indikasi perubahan warna, oksidasi, atau cacat las dicatat sebagai data primer karena diskontinuitas termal dapat mempengaruhi efektivitas perlindungan korosi yang diberikan oleh *zinc anode*.

3.3.5 Pengumpulan Data Biaya Instalasi

Tahap pengumpulan data biaya dilakukan untuk memperoleh informasi biaya actual terkait dengan pemasangan dan penggantian *zinc anode* pada struktur *rudder* kapal. Data biaya meliputi biaya pengadaan *zinc anode*, biaya pemasangan dengan metode *bolted* dan *welded* serta total biaya yang dikeluarkan untuk seluruh *zinc anode* yang terpasang pada *rudder* kapal. Data biaya ini digunakan sebagai dasar dalam perhitungan *Life Cycle Cost Analysis* untuk membandingkan efisiensi ekonomi dari masing-masing metode instalasi selama masa pemakaian.

3.4 Variabel Penelitian

3.4.1 Variabel Independen

Variabel independen merupakan variabel yang memengaruhi tingkat laju korosi yang terjadi pada *zinc anode* yang akan dihitung dengan *Weight Loss Method*. Variabel independen yang ada dalam penelitian ini meliputi:

- a. Perbedaan instalasi *zinc anode*: menggambarkan sebuah perbedaan yang mempresentasikan perubahan kinerja proteksi katodik yang ditunjukkan melalui tingkat efektivitas perlindungan terhadap korosi, laju konsumsi *anode*, serta umur layanan sistem.

3.4.2 Variabel dependen

Variabel dependen merupakan variabel yang dipengaruhi oleh perubahan variabel independen yang merupakan hasil utama yang diamati. Variabel dependen yang ada dalam penelitian ini meliputi:

- a. Laju konsumsi: merupakan hasil dari perhitungan *Weight Loss Method* yang menunjukkan penurunan berat massa selama masa operasional *zinc anode*, mencerminkan seberapa efektif perlindungan yang diberikan oleh *zinc anode* terhadap struktur *rudder*.

- b. Efisiensi instalasi: merupakan hasil untuk menunjukkan tingkat keberhasilan konfigurasi pemasangan *zinc anode* dan kondisi operasional dalam memberikan perlindungan yang optimal terhadap korosi. Hasil dari perhitungan *Life Cycle Cost* yang menjadi dasar evaluasi dalam menentukan konfigurasi instalasi *zinc anode* yang paling efektif dan ekonomis.

3.4.3 Hubungan antar variabel

Perbedaan instalasi *zinc anode* sebagai variabel independent memengaruhi laju korosi dan efisiensi instalasi sebagai variabel dependen. Variasi instalasi *zinc anode* menentukan distribusi arus proteksi katodik dan laju konsumsi *anode*, sedangkan suhu lingkungan operasi memengaruhi laju elektrokimia.

3.5 Pengolahan Data Kuantitatif

Tahapan pengolahan data dilakukan secara kuantitatif dengan beberapa langkah analisis sebagai berikut:

3.5.1 Pengolahan Data Berat Zinc Anode

Pengolahan data berat *zinc anode* dilakukan dengan mengolah data berat awal *zinc anode* berdasarkan spesifikasi teknis pabrikan dan berat sisa *zinc anode* yang diperoleh dari hasil penimbangan saat kapal berada di dok. Selisih antara berat awal dan berat sisa *zinc anode* digunakan untuk menentukan besarnya kehilangan massa *zinc anode* selama periode operasional kapal. Data berat *zinc anode* akan diolah secara terpisah (metode *bolted* dan *welded*) untuk memperoleh perbedaan tingkat konsumsi material *zinc anode* akibat metode pemasangan.

3.5.2 Perhitungan Laju Konsumsi Zinc Anode (*Weight Loss Method*)

Perhitungan laju konsumsi *zinc anode* dilakukan menggunakan metode *Weight Loss Method*, yang merupakan metode dengan memanfaatkan data kehilangan berat *zinc anode*, luas permukaan efektif, dan waktu pemakaian. Metode ini digunakan karena mampu menggambarkan laju konsumsi *zinc anode* secara *actual* selama periode operasional kapal. Perhitungan kehilangan berat dihitung untuk masing-masing metode instalasi untuk membandingkan tingkat efektivitas yang diberikan oleh masing-masing metode instalasi.

$$CR = \frac{(W_0 - W_t)}{t}$$

Rumus tersebut berasal dari konsep dasar *Weight Loss Method*, yaitu laju konsumsi dihitung sebagai kehilangan massa dibagi waktu paparan (*mass loss per unit time*). Konsep ini mengacu pada metode gravimetri yang dijelaskan dalam ASTM G31, kemudian diadaptasi untuk menghitung *anode consumption rate* (kg/tahun) pada penelitian proteksi katodik. Oleh karena itu, yang ingin diketahui bukanlah penipisan ketebalan material, melainkan berapa banyak massa *zinc* yang habis setiap tahun.

3.5.3 Perhitungan Umur Pakai Zinc Anode (*Interval Penggantian*)

Pada tahap selanjutnya yaitu merupakan perhitungan umur pakai *zinc anode* yang dilakukan berdasarkan hasil dari *Weight Loss Method*. Umur pakai *zinc anode*

ditentukan dengan perbandingan massa total *zinc anode* yang telah dilakukan. Hasil perhitungan ini digunakan untuk menentukan *interval* penggantian *zinc anode* yang optimal, sehingga *zinc anode* masih mampu memberikan perlindungan katodik yang efektif sebelum mengalami degradasi lebih.

3.5.4 Kuantifikasi Diskontinuitas Terhadap Laju Korosi

Kuantifikasi diskontinuitas dilakukan dengan mengaitkan kondisi diskontinuitas mekanik pada metode *bolted* dan diskontinuitas termal pada metode *welded* terhadap nilai laju korosi *zinc anode*. Pada diskontinuitas mekanik, mencakup kelonggaran baut pada material serta diskontinuitas termal mencakup zona pengaruh panas pengelasan, dianalisis berdasarkan fisik kapal pada saat pengedokan. Tahap ini bertujuan untuk menilai diskontinuitas instalasi yang mempengaruhi efektivitas perlindungan *katodic* pada *rudder* kapal.

3.5.5 Pengolahan Data Biaya

Setelahnya kemudian masuk pada tahap pengolahan biaya, dilakukan dengan mendata seluruh komponen kebutuhan instalasi *zinc anode*. Data biaya mencakup pada biaya awal per satu *zinc anode*, biaya pemasangan dengan kedua metode yang berbeda (*bolted* dan *welded*) serta total seluruh biaya pada instalasi menyeluruh *rudder* kapal. Data ini kemudian diolah untuk memperoleh kebutuhan seluruh biaya selama masa pakai *zinc anode*.

3.5.6 Perhitungan Life Cycle Cost Analysis

Tahapan selanjutnya setelah mendata biaya yaitu merupakan perhitungan *Life Cycle Cost Analysis* yang dilakukan dengan menjumlahkan seluruh biaya yang telah dilakukan pendataan sebelumnya. Analisis ini meliputi biaya awal pemasangan, biaya penggantian berkala berdasarkan *interval* umur pakai *zinc anode*, serta biaya keseluruhan yang kemudian digunakan untuk membandingkan efisiensi ekonomi antara metode instalasi *bolted* dan *welded* dengan mempertimbangkan teknis dan biaya jangka panjang.

a. Biaya Awal (*Initial Cost*)

Biaya awal (*initial cost*) merupakan biaya yang dikeluarkan pada tahap awal pengadaan dan pemasangan *zinc anode* sebelum kapal mulai beroperasi. Dalam penelitian ini, biaya awal mencakup harga pembelian *zinc anode*, biaya material pendukung, serta biaya instalasi sesuai metode pemasangan yang digunakan, yaitu *bolted* dan *welded*. Pada metode *bolted*, biaya awal umumnya meliputi pengadaan *zinc anode*, baut pengikat, mur, *washer*, serta tenaga kerja pemasangan. Sementara itu, pada metode *welded*, biaya awal mencakup pengadaan *zinc anode*, elektroda las, penggunaan mesin las, konsumsi listrik, serta tenaga kerja pengelasan yang memerlukan keterampilan khusus.

Besarnya biaya awal sangat dipengaruhi oleh kompleksitas metode instalasi. Metode *welded* umumnya memiliki biaya awal yang lebih tinggi dibandingkan metode *bolted* karena proses pengelasan membutuhkan waktu pengerjaan lebih lama dan penggunaan peralatan khusus. Selain itu, inspeksi hasil pengelasan juga sering kali diperlukan untuk memastikan kualitas sambungan. Meskipun demikian, biaya awal bukan satu-satunya parameter yang menentukan efisiensi suatu sistem, karena metode dengan

biaya awal lebih tinggi belum tentu menghasilkan biaya total operasional yang lebih besar dalam jangka panjang.

b. Biaya Perawatan (*Maintenance Cost*)

Biaya perawatan (*maintenance cost*) merupakan biaya yang dikeluarkan selama masa operasional kapal untuk menjaga kinerja sistem proteksi katodik agar tetap optimal. Dalam konteks *zinc anode*, biaya perawatan meliputi kegiatan inspeksi kondisi *anode*, pengecekan sambungan instalasi, pembersihan *fouling* atau produk korosi, serta perbaikan minor apabila ditemukan kerusakan pada sistem pemasangan. Perawatan ini bertujuan untuk memastikan bahwa *zinc anode* tetap mampu memberikan arus proteksi secara efektif terhadap struktur *rudder* kapal.

c. Biaya Penggantian (*Replacement Cost*)

Biaya penggantian (*replacement cost*) merupakan biaya yang timbul akibat penggantian *zinc anode* yang telah mengalami konsumsi hingga mencapai batas minimum massa efektif. Biaya ini mencakup pembelian *zinc anode* baru, pelepasan anode lama, pemasangan kembali, serta biaya *docking* apabila penggantian dilakukan saat kapal berada di galangan. Dalam sistem proteksi katodik, biaya penggantian menjadi salah satu komponen penting karena berkaitan langsung dengan umur pakai *zinc anode* dan frekuensi penggantian selama masa layanan kapal.

Besarnya biaya penggantian dipengaruhi oleh laju konsumsi *zinc anode*. *Anode* dengan laju konsumsi yang tinggi akan lebih cepat habis, sehingga membutuhkan frekuensi penggantian yang lebih sering dan meningkatkan total biaya siklus hidup. Dalam penelitian ini, metode *bolted* berpotensi memiliki biaya penggantian lebih tinggi apabila konsumsi *anode* terjadi lebih cepat dibandingkan metode *welded*. Sebaliknya, metode *welded* yang memiliki konsumsi lebih stabil cenderung memberikan *interval* penggantian yang lebih panjang, sehingga mampu menekan biaya penggantian dalam jangka panjang.

d. Biaya Operasional Lainnya (*Operational Cost*)

Biaya operasional lainnya (*operational cost*) merupakan biaya tambahan yang berkaitan secara tidak langsung dengan penggunaan *zinc anode* selama kapal beroperasi. Biaya ini dapat meliputi biaya inspeksi berkala, pengujian sistem proteksi katodik, penggunaan alat ukur potensial, serta biaya tenaga kerja untuk monitoring kondisi anode selama masa operasional kapal. Selain itu, biaya operasional juga dapat mencakup potensi kerugian akibat penurunan efektivitas proteksi yang menyebabkan meningkatnya risiko korosi pada struktur kapal.

Dalam praktik di lapangan, biaya operasional sering kali dipengaruhi oleh metode instalasi yang digunakan. Metode *bolted* biasanya membutuhkan frekuensi monitoring lebih tinggi karena adanya kemungkinan pelonggaran sambungan atau terbentuknya celah kontak selama operasional. Sementara itu, metode *welded* cenderung memiliki kebutuhan monitoring yang lebih rendah karena sambungan bersifat lebih stabil. Meskipun biaya operasional lainnya tidak sebesar biaya awal atau biaya penggantian, komponen ini tetap perlu diperhitungkan dalam analisis

Life Cycle Cost Analysis karena berkontribusi terhadap total biaya selama umur layanan sistem proteksi katodik.

3.5.7 Penentuan Metode Instalasi Optimal

Pada tahap terakhir ini dilakukan dengan mengintegrasikan hasil dari perhitungan laju korosi dengan *Weight Loss Method*, umur pakai *zinc anode*, pengaruh diskontinuitas, dan hasil dari *Life Cycle Cost Analysis*. Metode instalasi yang mempunyai nilai optimal merupakan metode yang mampu memberikan perlindungan korosi yang efektif dengan laju korosi yang terkendali serta biaya siklus hidup yang paling efisien. Hasil dari tahap ini berupa rekomendasi metode instalasi *zinc anode* yang paling sesuai untuk diaplikasikan pada struktur *rudder* kapal.

3.6 Hasil dan Pembahasan

Hasil dari pengolahan data kuantitatif selanjutnya dianalisis dan dibahas secara mendalam. Hasil dan pembahasan difokuskan pada penjelasan mendalam tentang bagaimana langkah dalam proses pengolahan data yang dilakukan secara sistematis. Pengukuran laju korosi dilakukan dengan *Weight Loss Method*, sementara perhitungan biaya instalasi *zinc anode* menggunakan *Life Cycle Cost Analysis* (LCCA). Diskontinuitas mekanik (*bolting*) dan termal (*welding*) dianalisis untuk mengetahui pengaruh cacat material terhadap laju korosi. Pada uji korelasi berguna mengevaluasi hasil uji korosi dengan perbandingan total biaya pada *zinc anode* (*bolting* dan *welding*). Hasil dari analisis akan memberikan wawasan mengenai efisiensi penggunaan *zinc anode* pada struktur *rudder* kapal.

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pendahuluan Hasil Pembahasan

Pada bab ini menyajikan hasil pengolahan data serta pembahasan berdasarkan metode penelitian yang telah dijelaskan pada bab III. Analisis dilakukan untuk menjawab rumusan masalah mengenai perbandingan efektivitas instalasi *zinc anode* dengan metode *bolted* dan *welded* pada struktur *rudder* kapal, ditinjau dari aspek teknis berupa laju korosi dan umur pakai, serta aspek ekonomi melalui pendekatan biaya siklus hidup (*Life Cycle Cost Analysis*).

Pengolahan data dilakukan secara kuantitatif menggunakan *Weight Loss Method* untuk menentukan laju korosi berdasarkan kehilangan massa *zinc anode* selama periode operasional. Hasil perhitungan ini kemudian digunakan untuk mengestimasi umur pakai *anode* dan *interval* penggantian yang optimal. Selain itu, dilakukan analisis terhadap pengaruh diskontinuitas mekanik pada metode *bolted* dan diskontinuitas termal pada metode *welded* terhadap efektivitas perlindungan katodik.

Selanjutnya, evaluasi efisiensi biaya dilakukan menggunakan *Life Cycle Cost Analysis* (LCCA) dengan mempertimbangkan biaya instalasi awal, biaya penggantian, dan total biaya selama masa pakai. Hasil analisis teknis dan ekonomi kemudian diintegrasikan untuk menentukan metode instalasi *zinc anode* yang paling optimal pada struktur *rudder* kapal, sehingga dapat memberikan perlindungan korosi yang efektif sekaligus efisien secara biaya.

4.2 Hasil Pengolahan Data *Weight Loss Method*



Gambar 4. 1 Perhitungan Berat Akhir *Zinc Anode* (Sumber: Penulis, 2026)

Pengolahan data menggunakan *Weight Loss Method* dilakukan untuk menentukan laju korosi *zinc anode* berdasarkan selisih berat sebelum dan sesudah periode pemakaian pada struktur *rudder* kapal. Data yang digunakan meliputi berat awal *zinc anode* berdasarkan spesifikasi pabrikan dan berat sisa yang diperoleh dari hasil penimbangan saat kapal melakukan *docking*. Selisih berat tersebut mencerminkan jumlah material yang terkorosi selama masa

operasional, sehingga dapat digunakan sebagai indikator utama dalam mengevaluasi kinerja proteksi katodik.

Dalam penelitian ini, perhitungan dilakukan secara terpisah antara *zinc anode* metode instalasi *bolted* dan *welded* untuk memperoleh perbandingan tingkat konsumsi *zinc anode*. Nilai kehilangan massa yang lebih besar menunjukkan bahwa *anode* mengalami reaksi oksidasi yang lebih intens, yang berkaitan langsung dengan aktivitas proteksi terhadap struktur baja. Namun, interpretasi hasil tidak hanya didasarkan pada besarnya kehilangan massa, melainkan juga mempertimbangkan distribusi arus proteksi dan efisiensi pemakaian *anode*.

Tabel 4. 1 Data Utama *Zinc Anode* (Sumber: Penulis, 2026)

No.	Metode Instalation	Type	Dimension (P x L x T) mm	Berat Nett (kg)	Berat Gross (kg)	Berat Akhir (kg)
1.	Welded (Las)	Vesca S-8	300 x 150 x 25	7.25	8.0	4.910
2.	Bolted (Baut)	Vesca B-9	300 x 150 x 30	8.2	8.5	5.822
3.	Welded (Las)	Vesca S-8	300 x 150 x 25	7.25	8.0	3.835
4.	Bolted (Baut)	Vesca B-9	300 x 150 x 30	8.2	8.5	4.036
5.	Welded (Las)	Vesca S-8	300 x 150 x 25	7.25	8.0	4.725
6.	Bolted (Baut)	Vesca B-9	300 x 150 x 30	8.2	8.5	4.320
7.	Welded (Las)	Vesca S-8	300 x 150 x 25	7.25	8.0	4.475
8.	Bolted (Baut)	Vesca B-9	300 x 150 x 30	8.2	8.5	3.325
9.	Welded (Las)	Vesca S-8	300 x 150 x 25	7.25	8.0	4.674
10.	Bolted (Baut)	Vesca B-9	300 x 150 x 30	8.2	8.5	3.340

Perhitungan laju korosi menggunakan *Weight Loss Method* mengacu pada persamaan standar sebagai berikut:

$$W = W_0 - W_t$$

W = kehilangan massa (kg)

W₀ = berat awal *zinc anode* sebelum pemakaian

W_t = berat akhir *zinc anode* setelah pemakaian

Tabel 4. 2 Data Pengurangan Massa Zinc Anode (Sumber: Penulis, 2026)

No.	Metode Instalation	Type	Berat Awal (kg)	Berat Akhir (kg)	Kehilangan M (kg)
1.	<i>Welded</i> (Las)	Vesca S-8	8.0	4.910	3.090
2.	<i>Bolted</i> (Baut)	Vesca B-9	8.5	5.822	2.678
3.	<i>Welded</i> (Las)	Vesca S-8	8.0	3.835	4.165
4.	<i>Bolted</i> (Baut)	Vesca B-9	8.5	4.036	4.464
5.	<i>Welded</i> (Las)	Vesca S-8	8.0	4.725	3.275
6.	<i>Bolted</i> (Baut)	Vesca B-9	8.5	4.320	4.180
7.	<i>Welded</i> (Las)	Vesca S-8	8.0	4.475	3.525
8.	<i>Bolted</i> (Baut)	Vesca B-9	8.5	3.325	5.175
9.	<i>Welded</i> (Las)	Vesca S-8	8.0	4.674	3.326
10.	<i>Bolted</i> (Baut)	Vesca B-9	8.5	3.340	5.160

Berdasarkan pada Tabel 4.2, ditampilkan hasil pengukuran berat awal dan berat akhir *zinc anode* pada struktur *rudder* kapal dengan dua metode instalasi, yaitu *bolted* (baut) dan *welded* (las), menggunakan tipe *zinc anode* Vesca S-8 dan Vesca B-9. Pengukuran dilakukan setelah periode operasioanl kapal 2.5 tahun, sehingga diperoleh nilai kehilangan massa sebagai indikator tingkat konsumsi *anode* selama pemakaian.

Secara umum, data menunjukkan bahwa kedua metode instalasi mengalami penurunan massa yang cukup signifikan, yang mengindikasikan bahwa *zinc anode* berfungsi secara aktif sebagai anoda korban dalam sistem proteksi katodik. Variasi nilai kehilangan massa pada masing-masing data dapat disebabkan oleh perbedaan kondisi operasional.

Tabel 4. 3 Komposisi Zinc Anode (Sumber: PT. Vescarindo Utama)

Zinc (Zn)	Aluminium (Al)	Cadmium (Cd)	Iron (Fe)	Lead (Pb)	Copper (Cu)	Silicon (Si)
Remainder (±99.9%)	0.10-0.50	0.025-0.07	≤0.005	≤0.006	≤0.005	≤0.125

Berdasarkan tabel 4.3, *zinc anode* tersusun dari unsur utama berupa *zinc* (Zn) dengan kemurnian sangat tinggi, yaitu sekitar 99,9%. *Zinc* berfungsi sebagai material utama yang mengalami oksidasi dalam sistem proteksi katodik. *Zinc* dipilih karena memiliki potensial elektrokimia yang lebih negatif dibandingkan baja, sehingga mampu bertindak sebagai anoda korban (*sacrificial anode*) yang melindungi struktur utama dari korosi.

Unsur aluminium (Al) ditambahkan dalam jumlah kecil sebagai elemen paduan yang berfungsi untuk meningkatkan efisiensi elektrokimia *zinc anode*. Aluminium berperan dalam mencegah terbentuknya lapisan pasif pada permukaan *anode*, sehingga *anode* tetap aktif selama digunakan.

Cadmium (Cd) merupakan unsur *activator* yang ditambah dalam jumlah kecil untuk menjaga kestabilan potensial. Fungsi utama *cadmium* adalah mencegah terjadinya polaritas berlebih yang dapat menurunkan kinerja proteksi katodik. Dengan adanya *cadmium*, *zinc anode* mampu mempertahankan karakteristik elektrokimia yang konsisten selama masa operasional, sehingga proses konsumsi berlangsung secara lebih terkontrol.

Unsur *Iron* (Fe), *lead* (Pb), dan *copper* (Cu) termasuk dalam kategori impuritas yang harus dijaga dalam kadar sangat rendah. Kandungan besi (Fe) yang tinggi dapat menurunkan

efisiensi anode karena bepotensi menyebabkan korosi tidak merata (*localized corrosion*). Sementara itu, timbal (Pb) dan tembaga (Cu) dapat mengganggu proses elektrokimia dan menurunkan kemampuan *anode* dalam menghasilkan arus proteksi. Oleh karena itu, standar internasional menetapkan batas maksimum yang ketat untuk unsur-unsur ini agar tidak mengurangi performa *anode*.

Selain itu, *silicon* (Si) juga terdapat dalam jumlah kecil sebagai unsur tambahan yang berasal dari proses manufaktur. Meskipun tidak memiliki peran utama dalam mekanisme proteksi, keberadaan *silicon* tetap harus dikontrol karena dapat memengaruhi struktur mikro material. Kandungan *silicon* yang terlalu tinggi dapat menyebabkan perubahan sifat mekanik dan memengaruhi homogenitas konsumsi anode.

Berdasarkan komposisi tersebut, dapat dikatakan bahwa *zinc anode* merupakan paduan *zinc* dengan kemurnian tinggi yang ditambahkan unsur *activator* seperti aluminium dan *cadmium* untuk meningkatkan performa elektrokimia. Sementara itu, unsur impuritas seperti Fe, Pb, Cu dan Si dikontrol dalam batas rendah untuk menjaga efisiensi dan kestabilan konsumsi. Kombinasi komposisi ini dirancang agar *zinc anode* mampu bekerja secara optimal sebagai anode korban dalam sistem proteksi katodik, dengan konsumsi yang terkendali dan umur pakai yang relatif panjang.

4.3 Perbandingan Laju Konsumsi dan Umur Pakai *Zinc Anode*

Laju konsumsi *zinc anode* merupakan parameter yang menunjukkan jumlah massa *anode* yang berkurang selama periode operasional tertentu (2,5 tahun), yang umumnya dinyatakan dalam satuan kg/tahun.

Sementara itu, umur pakai *zinc anode* didefinisikan sebagai periode waktu yang dibutuhkan hingga anode mencapai batas minimum massa efektif atau habis terpakai.

4.3.1 Laju Konsumsi (kg/tahun)

Parameter ini diperoleh melalui *weight loss method*, yaitu dengan menghitung selisih antara berat awal dan berat akhir *zinc anode* setelah digunakan, kemudian dibagi dengan waktu pemakaian. Laju konsumsi mencerminkan tingkat aktivitas *anode* dalam memberikan arus proteksi katodik terhadap struktur baja. Semakin tinggi laju konsumsi, maka semakin besar massa anode yang terpakai dalam waktu tertentu, yang menunjukkan bahwa *anode* bekerja lebih aktif dalam lingkungan korosif.

$$CR = \frac{(W_0 - W_t)}{t}$$

CR = Laju konsumsi *zinc anode* (kg/tahun)

W₀ = Berat awal *zinc anode* (kg)

W_t = berat akhir *zinc anode* setelah periode tertentu (kg)

t = waktu operasional (tahun)

4.3.1.1 Perhitungan Laju Konsumsi W₁

$$CR = \frac{(W_0 - W_t)}{t}$$

$$CR = \frac{(8,0 - 4,910)}{2,5}$$

$$= 1,236 \text{ kg/tahun}$$

Persentase Konsumsi

$$\begin{aligned} \%K &= \frac{\Delta W}{W_0} \times 100\% \\ &= \frac{3,090}{8,0} \times 100\% \\ &= 38,63\% \end{aligned}$$

4.3.1.2 Perhitungan Laju Konsumsi W2

$$CR = \frac{(W_0 - W_t)}{t}$$

$$CR = \frac{(8,0 - 3,835)}{2,5}$$

$$= 1,666 \text{ kg/tahun}$$

Persentase Konsumsi

$$\begin{aligned} \%K &= \frac{\Delta W}{W_0} \times 100\% \\ &= \frac{4,165}{8,0} \times 100\% \\ &= 52,06\% \end{aligned}$$

4.3.1.3 Perhitungan Laju Konsumsi W3

$$CR = \frac{(W_0 - W_t)}{t}$$

$$CR = \frac{(8,0 - 4,725)}{2,5}$$

$$= 1,310 \text{ kg/tahun}$$

Persentase Konsumsi

$$\begin{aligned} \%K &= \frac{\Delta W}{W_0} \times 100\% \\ &= \frac{3,275}{8,0} \times 100\% \\ &= 40,94\% \end{aligned}$$

4.3.1.4 Perhitungan Laju Konsumsi W4

$$CR = \frac{(W_0 - W_t)}{t}$$

$$CR = \frac{(8,0 - 4,475)}{2,5}$$

$$= 1,410 \text{ kg/tahun}$$

Persentase Konsumsi

$$\%K = \frac{\Delta W}{W_0} \times 100\%$$

$$= \frac{3,525}{8,0} \times 100\%$$

$$= 44,06\%$$

4.3.1.5 Perhitungan Laju Konsumsi W5

$$CR = \frac{(W_0 - W_t)}{t}$$

$$CR = \frac{(8,0 - 4,674)}{2,5}$$

$$= 1,330 \text{ kg/tahun}$$

Persentase Konsumsi

$$\%K = \frac{\Delta W}{W_0} \times 100\%$$

$$= \frac{3,326}{8,0} \times 100\%$$

$$= 41,58\%$$

4.3.1.6 Perhitungan Laju Konsumsi B1

$$CR = \frac{(W_0 - W_t)}{t}$$

$$CR = \frac{(8,5 - 5,822)}{2,5}$$

$$= 1,071 \text{ kg/tahun}$$

Persentase Konsumsi

$$\%K = \frac{\Delta W}{W_0} \times 100\%$$

$$= \frac{2,678}{8,5} \times 100\%$$

$$= 31,51\%$$

4.3.1.7 Perhitungan Laju Konsumsi B2

$$CR = \frac{(W_0 - W_t)}{t}$$

$$CR = \frac{(8,5 - 4,036)}{2,5}$$

$$= 1,786 \text{ kg/tahun}$$

Persentase Konsumsi

$$\%K = \frac{\Delta W}{W_0} \times 100\%$$

$$= \frac{4,464}{8,5} \times 100\%$$

$$= 52,52\%$$

4.3.1.8 Perhitungan Laju Konsumsi B3

$$CR = \frac{(W_0 - W_t)}{t}$$
$$CR = \frac{(8,5 - 4,320)}{2,5}$$
$$= 1,672 \text{ kg/tahun}$$

Persentase Konsumsi

$$\%K = \frac{\Delta W}{W_0} \times 100\%$$
$$= \frac{4,140}{8,5} \times 100\%$$
$$= 49,18\%$$

4.3.1.9 Perhitungan Laju Konsumsi B4

$$CR = \frac{(W_0 - W_t)}{t}$$
$$CR = \frac{(8,5 - 3,325)}{2,5}$$
$$= 2,070 \text{ kg/tahun}$$

Persentase Konsumsi

$$\%K = \frac{\Delta W}{W_0} \times 100\%$$
$$= \frac{5,175}{8,5} \times 100\%$$
$$= 60,88\%$$

4.3.1.10 Perhitungan Laju Konsumsi B5

$$CR = \frac{(W_0 - W_t)}{t}$$
$$CR = \frac{(8,5 - 3,340)}{2,5}$$
$$= 2,064 \text{ kg/tahun}$$

Persentase Konsumsi

$$\%K = \frac{\Delta W}{W_0} \times 100\%$$
$$= \frac{5,160}{8,5} \times 100\%$$
$$= 60,71\%$$

Tabel 4. 4 Hasil Perhitungan Laju Konsumsi (Sumber: Penulis, 2026)

No	Metode Instalasi	Type	Berat Awal	Berat Akhir	Kehilangan Massa	Lama Operas	Laju Konsumsi	Konsumsi (%)
----	------------------	------	------------	-------------	------------------	-------------	---------------	--------------

						i (tahun)	(kg/tahun)	
1.	Welded (Las)	Vesc a S-8	8.0	4.910	3.090	2,5	1,236	38,63
2.	Bolted (Baut)	Vesc a B-9	8.5	5.822	2.678	2,5	1,071	31,51
3.	Welded (Las)	Vesc a S-8	8.0	3.835	4.165	2,5	1,666	52,06
4.	Bolted (Baut)	Vesc a B-9	8.5	4.036	4.464	2,5	1,786	52,52
5.	Welded (Las)	Vesc a S-8	8.0	4.725	3.275	2,5	1,310	40,94
6.	Bolted (Baut)	Vesc a B-9	8.5	4.320	4.180	2,5	1,672	49,18
7.	Welded (Las)	Vesc a S-8	8.0	4.475	3.525	2,5	1,410	44,06
8.	Bolted (Baut)	Vesc a B-9	8.5	3.325	5.175	2,5	2,070	60,88
9.	Welded (Las)	Vesc a S-8	8.0	4.674	3.326	2,5	1,330	41,58
10.	Bolted (Baut)	Vesc a B-9	8.5	3.340	5.160	2,5	2,064	60,71

Tabel 4. 5 Rekapitulasi Laju Konsumsi Berdasarkan Metode Instalasi (Sumber: Penulis, 2026)

Parameter	Welded	Bolted
Jumlah Sampel	5	5
Rata-rata Kehilangan Massa (kg)	3,476	4,331
Rata-rata Laju Konsumsi (kg/tahun)	1,390	1,732
Rata-rata Konsumsi (%)	43,45	50,96

Berdasarkan hasil perhitungan laju konsumsi *zinc anode* menggunakan *Weight Loss Method*, diperoleh bahwa metode instalasi *welded* memiliki rata-rata laju konsumsi sebesar 1,390 kg/tahun, sedangkan metode *bolted* sebesar 1,732 kg/tahun. Nilai tersebut menunjukkan bahwa *zinc anode* pada metode *bolted* mengalami konsumsi yang lebih cepat dibandingkan metode *welded* selama periode operasi yang sama.

4.3.2 Estimasi Umur Pakai Zinc Anode

Umur pakai sangat dipengaruhi oleh laju konsumsi, di mana terdapat hubungan yang bersifat berbanding terbalik. Umur pakai dapat diestimasi dengan membandingkan kapasitas awal anode terhadap laju konsumsi rata-rata pertahun. Dengan demikian, *zinc anode* yang memiliki laju konsumsi lebih tinggi cenderung memiliki umur pakai yang lebih pendek, sedangkan anode dengan laju konsumsi rendah akan memiliki umur pakai yang lebih panjang.

$$L = \frac{(\eta \cdot W_0)}{CR}$$

- L = Umur pakai *zinc anode* (tahun)
 η = Efisiensi *anode* (0,85-0,95 untuk *zinc*)
 W_0 = Berat awal *zinc anode* (kg)
 CR = Laju konsumsi *zinc anode* (kg/tahun)

Umur pakai menunjukkan efisiensi waktu hingga *zinc anode* habis atau mencapai batas minimum massa efektif. Rumus umur pakai *zinc anode* diturunkan dari konsep keseimbangan antara kapasitas material yang tersedia dan laju konsumsi selama operasional. Standar seperti DNV dan ISO menjelaskan bahwa dalam desain proteksi katodik, umur anode dihitung dengan mempertimbangkan massa efektif yang dapat digunakan serta efisiensi anode dalam menghasilkan arus proteksi. Oleh karena itu, penggunaan faktor efisiensi (η) menjadi penting menggambarkan kondisi nyata di lapangan, di mana tidak seluruh massa anode dapat dimanfaatkan secara optimal.

Estimasi umur pakai *zinc anode* dilakukan berdasarkan rata-rata laju konsumsi hasil pengujian *Weight Loss Method* pada masing-masing metode instalasi. Penggunaan nilai rata-rata dilakukan untuk memperoleh umur pakai representatif yang dapat digunakan sebagai dasar perhitungan *interval* penggantian dan *Life Cycle Cost Analysis* (LCCA).

4.3.1.1 Perhitungan Estimasi Umur Pakai *Zinc Anode Welded*

$$\begin{aligned} L &= \frac{(\eta \cdot W_0)}{CR} \\ &= \frac{(0,90 \times 8,0)}{1,390} \\ &= 5,18 \text{ tahun} \end{aligned}$$

4.3.1.2 Perhitungan Estimasi Umur Pakai *Zinc Anode Bolted*

$$\begin{aligned} L &= \frac{(\eta \cdot W_0)}{CR} \\ &= \frac{(0,90 \times 8,5)}{1,733} \\ &= 4,41 \text{ tahun} \end{aligned}$$

4.4 Pengaruh Diskontinuitas terhadap Laju Konsumsi

Diskontinuitas dalam sistem instalasi *zinc anode* merupakan salah satu faktor yang dapat memengaruhi efektivitas proteksi katodik dan laju konsumsi *anode*. Diskontinuitas yang dimaksud dapat berupa ketidaksempurnaan kontak listrik, perbedaan kondisi permukaan, maupun ketidakseragaman distribusi arus proteksi. Dalam penelitian ini, pengaruh diskontinuitas dianalisis berdasarkan dua metode instalasi, yaitu metode *bolted* dan *welded*, untuk melihat bagaimana masing-masing metode memengaruhi laju korosi *zinc anode* pada struktur *rudder* kapal.

4.4.1 Diskontinuitas Mekanik (*Bolted*)

Diskontinuitas mekanik pada metode pemasangan *bolted* merupakan kondisi ketidaksempurnaan fisik pada sambungan antara *zinc anode* dan struktur *rudder* yang dapat memengaruhi kinerja proteksi katodik. Diskontinuitas ini tidak hanya berkaitan

dengan keberadaan celah, tetapi juga mencakup berbagai aspek mekanis yang memengaruhi kualitas kontak dan kestabilan sambungan selama operasional kapal.

Tabel 4. 6 Diskontinuitas Mekanik Instalasi Metode *Bolted* (Sumber: Penulis, 2026)

Metode Instalasi	Jenis Diskontinuitas	Kondisi yang Terjadi di Lapangan	Kondisi Zinc Anode	Keterangan
<i>Bolted</i>	Mekanik	Pelonggaran baut akibat getaran operasional kapal.	Zinc Anode mengalami pengikisan merata pada permukaan luar.	Distribusi arus proteksi tidak merata.
<i>Bolted</i>	Mekanik	Ditemukan adanya celah tipis pada sebagian area kontak akibat permukaan yang tidak sepenuhnya rata.	Pengikisan lebih dominan pada sisi yang langsung terpapar air laut.	Tidak ditemukan kerusakan fisik pada baut.
<i>Bolted</i>	Mekanik	Terdapat fouling berupa kerak dan organisme laut pada beberapa titik sambungan.	Permukaan zinc anode tetap mengalami konsumsi selama masa operasi	Fouling menutupi sebagian area kecil sambungan.
<i>Bolted</i>	Mekanik	Bentuk anode masih 65% utuh.	Tidak ditemukan retak maupun patahan pada zinc anode.	Zinc anode masih berfungsi sebagai anoda korban.

Berdasarkan tabel 4.6, zinc anode metode *bolted* menunjukkan kondisi sambungan yang masih terpasang dengan baik pada struktur *rudder*. Pada beberapa titik ditemukan endapan laut (*fouling*) dan celah tipis pada area kontak *anode* dengan *rudder*, namun tidak ditemukan kerusakan berupa retak atau patahan pada *zinc anode* maupun baut pengikat. Permukaan *zinc anode* memperlihatkan pengikisan yang relatif merata sebagai indikasi bahwa proses proteksi katodik masih berlangsung selama masa operasi kapal

4.4.2 Diskontinuitas Termal (Welded)

Diskontinuitas termal pada metode pemasangan *welded* (las) merupakan fenomena yang timbul akibat pengaruh panas selama proses pengelasan *zinc anode* ke struktur *rudder* kapal. Proses pengelasan melibatkan *temperature* tinggi yang menyebabkan terjadinya perubahan sifat fisik, mekanik, dan mikrostruktur material di sekitar area sambungan.

Tabel 4. 7 Diskontinuitas Termal Instalasi Metode *Welded* (Sumber: Penulis, 2026)

Metode Instalasi	Jenis Diskontinuitas	Kondisi yang Terjadi di Lapangan	Kondisi Zinc Anode	Keterangan
<i>Welded</i>	Termal	Sambungan las masih melekat kuat pada struktur rudder.	Tidak ditemukan pelepasan sambungan	Kontak antara anode dan rudder masih baik.
<i>Welded</i>	Termal	Terlihat perubahan warna pada area bekas pengelasan serta lapisan oksida tipis.	Pengikisan zinc anode berlangsung relatif merata.	Area las masih utuh.
<i>Welded</i>	Termal	Permukaan zinc anode mengalami pengikisan selama masa operasi tanpa deformasi signifikan.	Tidak ditemukan retak pada area las.	Zinc anode masih berfungsi dengan normal.
<i>Welded</i>	Termal	Sambungan permanen masih dalam kondisi baik dan tidak menunjukkan kerusakan visual.	Distribusi pengikisan terlihat lebih seragam.	Tidak ditemukan kegagalan sambungan.

Berdasarkan tabel 4.7, metode welded menunjukkan kondisi sambungan yang masih melekat kuat pada struktur rudder. Pada area bekas pengelasan terlihat perubahan warna dan lapisan oksida tipis sebagai akibat proses pengelasan sebelumnya, namun tidak ditemukan retak maupun pelepasan sambungan. Permukaan zinc anode mengalami pengikisan yang relatif merata sehingga menunjukkan bahwa zinc anode tetap bekerja sebagai sistem proteksi katodik selama masa operasional kapal.

4.4.3 Kuantifikasi Diskontinuitas terhadap Laju Korosi

a. Pengaruh terhadap kehilangan massa

$$\frac{4,331 - 3,476}{3,476} \times 100\% \\ = 24,59\%$$

Kehilangan massa zinc anode pada metode bolted 24,59% lebih tinggi disbanding dengan metode welded.

b. Pengaruh terhadap laju konsumsi

$$\frac{1,730 - 1,390}{1,390} \times 100\% \\ = 24,60\%$$

Laju konsumsi zinc anode metode bolted 24,60% lebih tinggi dibanding metode welded.

c. Pengaruh terhadap umur pakai

$$\frac{5,18 - 4,41}{4,41} \times 100\% \\ = 17,46\%$$

Umur zinc anode metode welded 17,46% lebih panjang dibanding dengan metode bolted.

Berdasarkan hasil kuantifikasi menggunakan parameter kehilangan massa, laju konsumsi, dan umur pakai zinc anode, metode bolted menunjukkan kehilangan massa sebesar 4,331 kg atau 24,59% lebih tinggi dibandingkan metode welded sebesar 3,476 kg. Hal ini diikuti dengan laju konsumsi zinc anode sebesar 1,732 kg/tahun yang lebih tinggi dibandingkan metode welded sebesar 1,390 kg/tahun. Akibatnya, umur pakai zinc anode metode bolted hanya mencapai 4,41 tahun, sedangkan metode welded mencapai 5,18 tahun. Hasil tersebut menunjukkan bahwa kondisi sambungan pada metode bolted berkaitan dengan efisiensi proteksi katodik yang lebih rendah dibandingkan metode welded selama periode operasi yang sama.

4.5 Hasil *Life Cycle Cost Analysis*

Life Cycle Cost Analysis (LCCA) merupakan metode analisis ekonomi yang digunakan untuk menghitung total biaya suatu sistem selama umur operasionalnya, mulai dari biaya pengadaan, instalasi, perawatan, penggantian, hingga biaya akhir masa pakai. Dalam penelitian ini, metode LCCA digunakan untuk membandingkan efisiensi ekonomi penggunaan *zinc anode* dengan metode instalasi *bolted* dan *welded* berdasarkan umur pakai serta frekuensi penggantian selama periode operasional kapal.

Dengan menggunakan metode LCCA, evaluasi tidak hanya berfokus pada biaya awal, tetapi juga mempertimbangkan biaya selama masa operasional kapal. Oleh karena itu, metode ini sangat penting dalam menentukan keputusan teknis dan ekonomis terkait pemilihan metode instalasi *zinc anode* paling optimal.



Gambar 4. 2 Zinc Anode Bolted pada Rudder Kapal

Rumus *Life Cycle Cost Analysis*:

$$LCC = Ci + Cm + Cr + Co$$

LCC = Total biaya siklus hidup

Ci = Biaya awal (*initial cost*)

Cm = Biaya perawatan (*maintenance cost*)

Cr = Biaya penggantian (*replacement cost*)

Co = Biaya operasional lainnya (*operational cost*)

Rumus *Life Cycle Cost Analysis* mengacu pada konsep analisis biaya siklus hidup yang dikembangkan oleh:

ISO-ISO 15686-5: *Buildings and Constructed Assets – Service Life Planning – Part 5: Life Cycle Costing* = “*Life Cycle Costing is a methodology for systematic economic evaluation of life cycle costs over a period of analysis.*”

4.5.1 Perhitungan Life Cycle Cost Analysis Metode Welded

Ci = Rp. 1.150.000,00 (sumber: Tokopedia.com)

Cm = Rp. 100.000,00

Cr = Rp. 1.150.000,00

Co = Rp. 500.000,00

Berdasarkan data yang telah diperoleh tersebut, maka perhitungan *Life Cycle Cost Analysis* sebagai berikut:

$$\begin{aligned} LCC &= 1.150.000,00 + 100.000,00 + 1.150.000,00 + 500.000 \\ &= 2.900.000,00 \end{aligned}$$

$$n_r = \left[\frac{20}{5,18} \right]$$

$$n_r = 4$$

Karena maintenance dilakukan setiap penggantian, maka:

$$n_m = 4$$

Sehingga:

$$\begin{aligned} LCC &= C_i + (n_m \times C_m) + (n_r \times C_r) + C_o \\ &= 1.150.000 + (4 \times 100.000) + (4 \times 1.150.000) + 500.000 \\ &= \text{Rp. } 6.650.000 \end{aligned}$$

4.5.2 Perhitungan Life Cycle Cost Analysis Metode Bolted

$$C_i = \text{Rp. } 1.125.000,00 \text{ (sumber: Tokopedia.com)}$$

$$C_m = \text{Rp. } 150.000,00$$

$$C_r = \text{Rp. } 1.125.000,00$$

$$C_o = \text{Rp. } 850.000,00$$

Berdasarkan data yang telah diperoleh tersebut, maka perhitungan *Life Cycle Cost Analysis* sebagai berikut:

$$\begin{aligned} LCC &= 1.125.000,00 + 150.000,00 + 1.125.000,00 + 850.000,00 \\ &= 3.150.000 \end{aligned}$$

$$n_r = \left[\frac{20}{4,41} \right]$$

$$n_r = 5$$

Diasumsikan maintenance mengikuti setiap penggantian:

$$n_m = 5$$

Sehingga:

$$\begin{aligned} LCC &= C_i + (n_m \times C_m) + (n_r \times C_r) + C_o \\ &= 1.125.000 + (5 \times 100.000) + (5 \times 1.125.000) + 850.000 \\ &= \text{Rp. } 8.350.000 \end{aligned}$$

Berdasarkan hasil perhitungan *Life Cycle Cost Analysis (LCCA)*, diperoleh total biaya siklus hidup sebesar Rp. 6.650.000 untuk metode instalasi *welded* dan Rp. 8.350.000 untuk metode instalasi *bolted*. Hasil tersebut menunjukkan bahwa kedua metode memiliki total biaya siklus hidup yang relatif sama berdasarkan komponen biaya yang digunakan dalam penelitian ini.

Metode *welded* memiliki biaya awal (*Initial Cost*) yang sedikit lebih tinggi dibandingkan metode *bolted* akibat adanya kebutuhan proses pengelasan dan penggunaan

material pendukung seperti elektroda las. Namun demikian, metode *welded* cenderung memiliki biaya perawatan yang lebih rendah karena sambungan bersifat permanen dan tidak memerlukan pemeriksaan kekencangan sambungan secara berkala.

Sebaliknya, metode *bolted* memiliki biaya awal yang lebih rendah, tetapi membutuhkan biaya perawatan yang lebih besar karena adanya potensi pelonggaran baut selama masa operasi kapal. Kondisi tersebut mengharuskan dilakukan inspeksi dan pengencangan ulang secara berkala untuk menjaga kontinuitas kontak listrik antara *zinc anode* dan struktur *rudder*.

Dalam penelitian ini, *Life Cycle Cost Analysis* (LCCA) dilakukan menggunakan periode analisis selama 20 tahun. Penetapan periode tersebut bertujuan untuk mengevaluasi total biaya yang dikeluarkan selama masa operasional sistem proteksi katodik pada *rudder* kapal, sehingga perbandingan antara metode instalasi *welded* dan *bolted* dapat dilakukan secara lebih komprehensif.

4.6 Integrasi Analisis Teknis dan Ekonomi

Integrasi analisis teknis dan ekonomi merupakan tahap evaluasi yang dilakukan untuk menentukan metode instalasi *zinc anode* yang paling optimal berdasarkan aspek kinerja proteksi katodik dan efisiensi biaya selama masa operasional kapal. Pada penelitian ini, analisis teknis dilakukan melalui pengamatan laju konsumsi, kehilangan massa (*weight loss method*), laju korosi, serta umur pakai *zinc anode* pada metode *bolted* dan *welded*. Sementara itu, analisis ekonomi dilakukan menggunakan pendekatan *life cycle cost analysis* yang mempertimbangkan biaya awal, biaya perawatan, biaya penggantian, dan biaya operasional lainnya selama umur layanan sistem proteksi katodik.

Tabel 4. 8 Integrasi Analisis Teknis dan Ekonomi Metode *Welded* dan *Bolted*

(Sumber: Penulis, 2026)

Aspek	Metode <i>Welded</i>	Metode <i>Bolted</i>
Cara pemasangan	<i>Zinc anode</i> dipasang menggunakan proses pengelasan langsung pada struktur <i>rudder</i>	<i>Zinc anode</i> dipasang menggunakan baut dan mur lalu melalui tahap pengecoran dengan semen
Kontak listrik	Kontinuitas kontak listrik sangat baik dan permanen	Kontak listrik bergantung pada kekencangan baut
Stabilitas arus proteksi	Lebih stabil dan merata	Cenderung kurang stabil akibat potensi pelonggaran
Laju konsumsi <i>zinc anode</i>	Relatif lebih rendah dan beberapa tidak merata	Relatif lebih tinggi dan beberapa ada yang tidak merata
Umur pakai <i>zinc anode</i>	Lebih panjang	Relatif lebih pendek
Risiko diskontinuitas	Diskontinuitas termal akibat panas proses pengelasan	Diskontinuitas mekanik akibat sambungan baut
Kemudahan instalasi	Lebih sulit dan membutuhkan tenaga kerja khusus	Lebih mudah dan sederhana dan tidak memerlukan tenaga kerja khusus

Kemudahan penggantian	Penggantian lebih sulit karena harus dipotong/las ulang	Penggantian lebih mudah saat <i>docking</i>
Frekuensi inspeksi	Tidak terlalu sering	Membutuhkan inspeksi berkala pada baut
Biaya awal	Lebih tinggi	Lebih rendah
Biaya perawatan	Lebih rendah	Lebih tinggi
Biaya penggantian	Lebih rendah dalam jangka panjang	Lebih tinggi akibat frekuensi penggantian
Efektivitas proteksi katodik	Lebih optimal	Cukup optimal namun dipengaruhi kondisi sambungan

Berdasarkan Tabel 4.8, metode *welded* dan *bolted* memiliki karakteristik teknis dan ekonomi yang berbeda dalam penerapan sistem proteksi katodik menggunakan *zinc anode* pada *rudder* kapal. Dari aspek pemasangan, metode *welded* dilakukan dengan pengelasan langsung pada struktur *rudder* sehingga menghasilkan sambungan yang permanen dan memiliki kontinuitas kontak listrik yang sangat baik. Sebaliknya, metode *bolted* menggunakan baut dan mur sebagai media pengikat, sehingga kualitas kontak listrik sangat dipengaruhi oleh kondisi mekanik sambungan tersebut.

Pada aspek teknis, metode *welded* menunjukkan kestabilan distribusi arus proteksi yang lebih baik karena hambatan kontak relatif kecil. Kondisi ini menyebabkan laju konsumsi *zinc anode* lebih rendah dan lebih merata, sehingga umur pakai *anode* menjadi lebih panjang. Sementara itu, metode *bolted* lebih rentan mengalami diskontinuitas mekanik seperti pelonggaran baut dan terbentuknya celah mikro (*micro-gap*), yang dapat meningkatkan resistansi kontak dan menyebabkan konsumsi *zinc anode* menjadi lebih cepat pada area tertentu.

Dari aspek operasional, metode *bolted* memiliki keunggulan dalam kemudahan pemasangan dan penggantian saat proses *docking* kapal karena *zinc anode* dapat dilepas tanpa proses pemotongan atau pengelasan ulang. Namun demikian, metode ini membutuhkan inspeksi dan perawatan berkala yang lebih intensif untuk memastikan kekencangan baut dan kualitas kontak listrik tetap terjaga. Sebaliknya, metode *welded* memiliki kebutuhan perawatan yang lebih rendah karena sambungan bersifat permanen dan lebih stabil selama operasional kapal.

Berdasarkan aspek ekonomi, metode *welded* memiliki biaya awal yang lebih tinggi akibat kebutuhan proses pengelasan dan tenaga kerja khusus. Akan tetapi, biaya perawatan dan penggantian dalam jangka panjang cenderung lebih rendah karena umur pakai *zinc anode* lebih panjang dan konsumsi lebih stabil. Sebaliknya, metode *bolted* memiliki biaya awal yang lebih rendah, namun biaya perawatan dan penggantian dapat meningkat akibat frekuensi inspeksi dan penggantian anode yang lebih sering.

4.7 Penentuan Metode Instalasi Optimal

Tahap penentuan metode instalasi *zinc anode* yang optimal dilakukan dengan mengintegrasikan seluruh hasil analisis yang telah diperoleh sebelumnya, meliputi hasil *weight loss method*, estimasi umur pakai *zinc anode*, pengaruh diskontinuitas instalasi, dan *life cycle cost analysis*. Sesuai metodologi penelitian yang telah disusun, metode instalasi yang dinyatakan optimal harus memenuhi dua kriteria utama, yaitu memberikan perlindungan

korosi yang efektif secara teknis serta memiliki efisiensi biaya yang baik selama masa operasional kapal.

Tabel 4. 9 Rekapitulasi Hasil Analisis (Sumber: Penulis, 2026)

Parameter	Welded (Las)	Bolted (Baut)
Rata-rata kehilangan massa (kg)	3,476	4,331
Rata-rata laju konsumsi (kg/tahun)	1,390	1,733
Berat awal <i>anode</i> (kg)	8,0	8,5
Efisiensi <i>anode</i> (η)	0,90	0,90
Umur pakai <i>anode</i> (tahun)	5,18	4,41
Initial Cost (Rp)	1.150.000	1.125.000
Maintenance Cost (Rp)	100.000	150.000
Replacement Cost (Rp)	1.150.000	1.125.000
Operational Cost (Rp)	500.000	850.000
Total LCC (Rp)	2.900.000	3.150.000

Berdasarkan hasil identifikasi lapangan pada saat proses *docking*, kapal yang diteliti menggunakan 2 unit *rudder* sebagai sistem kemudi utama. Setiap *rudder* dilengkapi dengan 8 unit *zinc anode* yang berfungsi sebagai anoda korban (*sacrificial anode*) dalam sistem proteksi katodik untuk melindungi permukaan *rudder* dari serangan korosi akibat lingkungan air laut.

Dengan jumlah *rudder* sebanyak 2 unit dan kebutuhan *zinc anode* sebanyak 8 unit pada setiap *rudder*, maka total kebutuhan *zinc anode* pada kapal dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$N_t = N_r \times N_a$$

N_t = total kebutuhan *zinc anode* (unit)

N_r = jumlah *rudder* (unit)

N_a = jumlah *zinc anode* per *rudder* (unit)

Sehingga:

$$N_t = 2 \times 8$$

$$= 16 \text{ unit}$$

Maka total kebutuhan *zinc anode* pada struktur *rudder* kapal adalah 16 unit *zinc anode*.

Berdasarkan data penelitian, *zinc anode welded* menggunakan tipe **Vesca S-8** dengan berat *gross* sebesar 8kg/unit.

$$Wt = Nt \times W$$

Wt = berat total yang dibutuhkan (kg)

Nt = total kebutuhan *zinc anode* (unit)

W = berat *zinc anode*

Sehingga:

$$\begin{aligned} Wt &= 16 \times 8 \\ &= 128 \text{ kg} \end{aligned}$$

Berdasarkan hasil perhitungan kebutuhan *zinc anode* metode *welded* pada *rudder*, maka biaya yang diperoleh untuk pemasangan *zinc anode* pada *rudder* kapal sebagai berikut:

$$\begin{aligned} &= \text{Rp. } 1.150.000 \times 16 \text{ pcs} \\ &= \text{Rp. } 18.400.000 \times 3 \\ &= \text{Rp. } 55.200.000 \end{aligned}$$

Sedangkan hasil analisis berdasarkan data penelitian *zinc anode bolted* menggunakan tipe **Vesca B-9** dengan berat *gross* sebesar 8,5 kg/unit.

Sehingga:

$$\begin{aligned} Wt &= 16 \times 8,5 \\ &= 136 \text{ kg} \end{aligned}$$

Berdasarkan hasil perhitungan kebutuhan *zinc anode* metode *bolted* pada *rudder*, maka biaya yang diperoleh untuk pemasangan *zinc anode* pada *rudder* kapal sebagai berikut:

$$\begin{aligned} &= \text{Rp. } 1.125.000 \times 16 \text{ pcs} \\ &= \text{Rp. } 18.000.000 \times 4 \\ &= \text{Rp. } 72.000.000 \end{aligned}$$

Sehingga hasil analisis perhitungan estimasi biaya kebutuhan *zinc anode* pada *rudder* kapal menggunakan metode *welded* yaitu sebesar Rp. 55.200.000; sedangkan menggunakan metode *bolted* yaitu sebesar Rp. 72.000.000.

Selain itu, estimasi umur pakai *zinc anode* menunjukkan bahwa metode *welded* memiliki umur pakai sebesar 5,18 tahun, sedangkan metode *bolted* hanya 4,41 tahun. Selisih umur pakai tersebut dapat dihitung sebagai berikut:

$$\begin{aligned}\Delta L &= 5,18 - 4,41 \\ &= 0,77 \text{ tahun}\end{aligned}$$

Atau sekitar

$$\frac{0,77}{4,41} \times 100\% = 17,46\%$$

Dengan demikian, metode *welded* memiliki umur pakai 17,46% lebih panjang dibandingkan metode *bolted*.

Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa sambungan las mampu menghasilkan kontinuitas listrik yang lebih baik antara *zinc anode* dan struktur *rudder* sehingga distribusi arus proteksi berlangsung lebih merata. Sebaliknya, pada metode *bolted* terdapat potensi terbentuknya diskontinuitas mekanik berupa celah sambungan, penurunan tekanan baut akibat vibrasi operasional kapal, serta peningkatan resistansi kontak yang dapat mempercepat konsumsi anode. Akibatnya, *zinc anode* pada metode *bolted* mengalami kehilangan massa yang lebih besar dan umur pakai yang lebih pendek.

Dari aspek ekonomi, hasil *life cycle cost analysis* menunjukkan bahwa metode *welded* memiliki total biaya siklus hidup sebesar Rp. 6.660.000 dan *bolted* Rp. 8.350.000.

Berdasarkan hasil *weight loss method* yang telah dilakukan, metode *bolted* menunjukkan rata-rata kehilangan massa *zinc anode* sebesar 4,331 kg atau 50,96% dari massa awal *anode*. Nilai tersebut lebih tinggi dibandingkan metode *welded* yang mengalami kehilangan massa sebesar 3,476 kg atau 43,45% dari massa awal *anode*.

Hasil analisis teknis menggunakan Weight Loss Method dan analisis ekonomi menggunakan *Life Cycle Cost Analysis* (LCCA), metode instalasi *welded* dapat direkomendasikan sebagai metode yang lebih optimal untuk pemasangan *zinc anode* pada *rudder* kapal. Hal ini ditunjukkan oleh nilai kehilangan massa dan laju konsumsi *zinc anode* yang lebih rendah dibandingkan metode *bolted*, sehingga distribusi konsumsi anode berlangsung lebih merata dan efisiensi pemanfaatan material anode menjadi lebih baik selama masa operasional kapal. Sebaliknya, metode *bolted* menunjukkan konsumsi *zinc anode* yang lebih besar akibat distribusi arus proteksi yang kurang merata, sehingga menyebabkan pengurangan massa anode lebih tinggi dan umur pakainya menjadi lebih pendek.

Berdasarkan hasil estimasi umur pakai, *zinc anode* dengan metode *welded* memiliki masa layanan sekitar 5,18 tahun, sedangkan metode *bolted* sekitar 4,41 tahun. Dengan asumsi kapal beroperasi selama 20 tahun, metode *welded* diperkirakan hanya memerlukan tiga kali penggantian *zinc anode*, sedangkan metode *bolted* memerlukan sekitar empat kali penggantian untuk mempertahankan efektivitas sistem proteksi katodik. Oleh karena itu, meskipun metode *welded* memiliki proses instalasi yang lebih kompleks, metode ini dinilai lebih efisien dari aspek teknis maupun operasional karena mampu memperpanjang umur pakai *zinc anode*, mengurangi frekuensi penggantian, serta mendukung keandalan sistem proteksi katodik dalam jangka panjang.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

1. Berdasarkan hasil analisis menggunakan *Weight Loss Method*, metode instalasi *welded* menunjukkan kinerja yang lebih baik dibandingkan metode *bolted*. Hal ini ditunjukkan oleh rata-rata kehilangan massa *zinc anode* sebesar 3,476 kg dengan laju konsumsi 1,390 kg/tahun, sedangkan metode *bolted* memiliki rata-rata kehilangan massa 4,331 kg dengan laju konsumsi 1,733 kg/tahun. Hasil tersebut menunjukkan bahwa metode *welded* memiliki konsumsi *zinc anode* yang lebih rendah sehingga pemanfaatan material anode lebih efisien selama masa operasional kapal.
2. Perbedaan metode instalasi berpengaruh terhadap efektivitas proteksi katodik dan umur pakai *zinc anode*. Metode *welded* menghasilkan kontak listrik yang lebih kontinu sehingga distribusi arus proteksi lebih merata dan konsumsi *zinc anode* berlangsung secara homogen. Sebaliknya, metode *bolted* lebih rentan mengalami diskontinuitas mekanik akibat kondisi sambungan baut yang dapat menyebabkan distribusi arus kurang merata dan konsumsi *zinc anode* lebih besar. Berdasarkan hasil perhitungan, metode *welded* memiliki estimasi umur pakai sekitar 5,18 tahun, sedangkan metode *bolted* sekitar 4,41 tahun.
3. Berdasarkan integrasi analisis teknis dan ekonomi melalui *Life Cycle Cost Analysis (LCCA)*, metode *welded* merupakan metode instalasi yang lebih optimal untuk diterapkan pada *rudder* kapal. Meskipun biaya awal pemasangan relatif lebih tinggi, metode *welded* memberikan efisiensi yang lebih baik melalui laju konsumsi yang lebih rendah, umur pakai yang lebih panjang, serta potensi pengurangan frekuensi penggantian *zinc anode* selama masa operasional kapal. Dalam periode operasional 10 tahun, metode *welded* diperkirakan hanya memerlukan sekitar 3 kali penggantian *zinc anode*, sedangkan metode *bolted* memerlukan sekitar 4 kali penggantian, sehingga metode *welded* lebih efektif dalam mendukung keberlanjutan sistem proteksi katodik dan efisiensi biaya pemeliharaan kapal.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, beberapa saran yang dapat diberikan untuk pengembangan penelitian selanjutnya maupun penerapan di lapangan adalah sebagai berikut:

1. Penelitian selanjutnya disarankan untuk melakukan pengamatan terhadap *zinc anode* dengan periode operasional yang lebih panjang sehingga diperoleh data konsumsi anode yang lebih *representative* dan mendekati kondisi actual selama umur layanan kapal.
2. Penelitian selanjutnya dapat mengembangkan analisis dengan membandingkan material anoda korban lainnya seperti aluminium *anode* dan magnesium *anode* untuk mengetahui efektivitas perlindungan korosi pada struktur *rudder* kapal dalam berbagai kondisi lingkungan operasi.

3. Perlu dilakukan pengukuran potensial proteksi katodik menggunakan metode elektrokimia untuk memperoleh data yang lebih komprehensif mengenai distribusi arus proteksi pada metode instalasi *bolted* dan *welded*.

DAFTAR PUSTAKA

- Anwar, S., Octavitri, Y., Purnaningratri, I., & Sofian, I. M. (2025). *Electrochemical Performance of Sacrificial Anode Metals in Preventing Corrosion on Ships : A Literature Review*. 4(1), 2208–2216.
- Budianto, Reza Gadis, & Tri Karyono. (2017). Analisis_Teknik_Pencegahan_Korosi_Pada_L. *Analisis Teknik Pencegahan Korosi Pada Lambung Kapal Dengan Variasi Sistem Pencegahan Iccp Dibandingkan Dengan Sacp*, 6(1), 7–17.
- How, H. O. J. I. N., & Rahman, A. A. (2004). Life Cycle Cost Analysis Case Study on Corrosion Remedial Measures for Concrete Structures. *Jurnal Teknologi*, 40(B) Jun. 2004: 15–26\r© *Universiti Teknologi Malaysia*, 40, 15–26.
- Ihza Mahendra, T., & Dwisetiono, D. (2022). Proteksi Katodik Menggunakan Zinc Anode Untuk Menghambat Korosi Pada Lambung Kapal Port Link Vii Jakarta. *Zona Laut Jurnal Inovasi Sains Dan Teknologi Kelautan*, 7–12. <https://doi.org/10.62012/zl.v3i2.19694>
- Kurniawati, O., & Budi, A. S. (2021). Analisis Laju Korosi Material Plat Kapal Hlb4004 Menggunakan Media Di Perairan Pelabuhan Tanjung. *Jurnal Univpgr*, 6(2), 80–85.
- Liu, J., & Hekkenberg, R. (2017). Sixty years of research on ship rudders: effects of design choices on rudder performance. *Ships and Offshore Structures*, 12(4), 495–512. <https://doi.org/10.1080/17445302.2016.1178205>
- Liu, L., Cao, T., Zhang, Q., & Cui, C. (2018). *Organic Phosphorus Compounds as Inhibitors of Corrosion of Carbon Steel in Circulating Cooling Water : Weight Loss Method and Thermodynamic and Quantum Chemical Studies*. 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/1653484>
- Malaret, F. (2022). Exact calculation of corrosion rates by the weight-loss method. *Experimental Results*, 3, 1–12. <https://doi.org/10.1017/exp.2022.5>
- Maulana, A., Azwar, & Marzuki. (2022). Analisa Laju Korosi Pada Komponen Daun Kemudi (Rudder Blade) Perahu Bermotor Nelayan Tradisional. *Jurnal Mesin Sains Terapan*, 6(1), 22–29.
- Pongsapan, L., & Suhadi, A. (2015). Efektivitas Penggunaan Anoda Korban Paduan Seng Pada Pelat Baja Kapal AISI E 2512 Terhadap Laju Korosi Di Dalam Media Air Laut. *JST (Jurnal Sains Terapan)*, 1(1), 40–47. <https://doi.org/10.32487/jst.v1i1.31>
- Sade, J., & A, M. S. (2024). *Analysis Of Needs And Placement Of Zinc Anode For New Ferry Ship Buildings*. 3(June), 108–117.
- Sudjasta, B., Suranto, P. J., Setiani, H., Studi, P., Perkapalan, T., & Selatan, J. (2018). *MENCEGAH KOROSI PADA LAMBUNG KAPAL KAPAL GENERAL*. 14, 209–215.
- Susilowati, S. E., & Simbolon, J. M. (2019). Analisa Laju Korosi Plat a36 Untuk Deck Floatin G Dock Venture 3 Dengan Perlindungan Zinc Anode Dan Arus Dc Serta Zinc Anode Tanpa Menggunakan Arus Dc. *Jurnal Kajian Teknik Mesin*, 4(2), 108–115. <https://doi.org/10.52447/jktm.v4i2.1814>
- Tonelli, R., & Vogels, R. (2024). *MARIN rudder mathematical model*. 71, 49–86. <https://doi.org/10.3233/ISP-240004>

View of ANALISA KEBUTUHAN ANODA KORBAN ...KAPAL DI PT. INDONESIA MARINA SHIPYARD.pdf. (n.d.).

Vignesh, R. V. (2024). Sacrificial anode materials to protect marine grade steel structures : a review. *Corrosion Reviews*, 42(3), 303–330. <https://doi.org/10.1515/corrrev-2023-0099>

Vourna, P., Ktena, A., Hristoforou, E. V., & Papadopoulos, N. D. (2025). Assessment of Corrosion in Naval Steels Submerged in Artificial Seawater Utilizing a Magnetic Non-Destructive Sensor. *Sensors*, 25(16), 1–36. <https://doi.org/10.3390/s25165015>

LAMPIRAN

Lampiran 1. *Timeline Penelitian*

No.	Jenis Kegiatan	Waktu Penelitian																											
		Desember				Januari				Februari				Maret				April				Mei				Juni			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1	Perumusan Masalah																												
2	Studi Literatur																												
3	Pengumpulan Data																												
4	Penulisan Proposal Penelitian																												
5	Pengajuan dan Revisi Proposal Penelitian																												
6	Pengolahan Data																												
7	Penyusunan BAB IV & BAB V																												
8	Penyusunan Luaran																												
9	Bimbingan dengan dosen pembimbing																												

Lampiran 2. Pengukuran Kehilangan Massa *Zinc Anode Welded*



Lampiran 3. Pengukuran Kehilangan Massa *Zinc Anode Bolted*



Lampiran 4. Pengurangan Massa *Zinc Anode*



Lampiran 5. Pelepasan *Zinc Anode* dari *Rudder Kapal*



Lampiran 6. Modul



MODUL
PERHITUNGAN EFEKTIVITAS ZINC ANODE
BERDASARKAN METODE INSTALASI
MENGGUNAKAN *WEIGHT LOSS METHOD*



Enggal Marta Puspa Wardhani
Dr. Mohd. Ridwan, S.T., M.T.

TEKNOLOGI REKAYASA KONSTRUKSI PERKAPALAN
DEPARTEMEN TEKNOLOGI INDUSTRI
UNIVERSITAS DIPONEGORO
SEMARANG

2026

Lampiran 7. Jurnal

Makara Journal of Technology
<http://journal.ut.ac.id/technology>

EFFICIENCY OF BOLTED AND WELDED ZINC ANODE INSTALLATION ON RUDDER USING WEIGHT LOSS METHOD AND LIFE CYCLE COST ANALYSIS

Enggal Marta Puspa Wardhani¹, Mohd. Ridwan², Muhammad Sawal Baital³, Aulia Widyandari⁴

Naval Construction Engineering Technology, Vocational Collage, Diponegoro University, Jl. Guherguru Mochtar, Tembalang, Kec. Tembalang, Kota Semarang, Jawa Tengah 50275

Email: enggalwerthy@gmail.com

Abstract

Corrosion on ship rudder structures can reduce service life and operational reliability, making cathodic protection using zinc anodes essential. This study aims to evaluate the efficiency of bolted and welded zinc anode installation methods on a ferry ship rudder using the Weight Loss Method and Life Cycle Cost Analysis (LCCA). The research was conducted by comparing the initial and final weights of zinc anodes after 2.5 years of operation. The collected data were used to determine mass loss, consumption rate, estimated service life, and life cycle cost. The LCCA consisted of initial, maintenance, replacement, and operational costs. The results showed that the bolted method produced a higher average zinc anode mass loss of 4.331 kg with a consumption rate of 1.732 kg/year, while the welded method showed a mass loss of 3.476 kg and a consumption rate of 1.390 kg/year. The estimated service life of zinc anodes was 4.41 years for the bolted method and 5.18 years for the welded method. The Life Cycle Cost Analysis indicated that both methods had the same life cycle cost of IDR 2,900,000. Based on these findings, the bolted installation method was identified as the optimal method due to its higher sacrificial anode activity, indicating greater cathodic protection performance without increasing life cycle costs.

Keywords: Zinc anode, rudder, cathodic protection, Weight Loss Method, Life Cycle Cost Analysis, bolted installation, welded installation.

1. Introduction

The use of steel plates in ship structures is a common thing that is used as a material for making ships because they are quite adequate. But iron and steel are so reactive that they have a tendency to corrode in corrosive areas, namely seawater. [1]. Corrosion of steel ships results in a decrease in the strength and service life of the ship, thus reducing the safety of cargo and ship passengers [2]. Ship corrosion can be overcome in various ways, including by using ship carbon anodes [1]. One effective corrosion prevention technique is cathodic protection, which involves making the protected metal act as a cathode in an electrochemical cell, thus preventing oxidation. Cathodic protection can be implemented through Impressed Current Cathodic Protection (ICCP) or Sacrificial Anode Cathodic Protection (SACP) [3]. Cathodic protection It can be defined in the sense of an electrochemical cell to control corrosion by concentrating the oxygen reaction on the galvanized cell and suppressing the corrosion on the cathode in the same cell on the cathodic protection, the metal to be protected is made into a cathode and the oxidation reaction will occur on the anode [4]. This system works by connecting Zinc anode

electrically to the part of the ship to be protected, so that the ship structure becomes a cathode and Zinc anode the more 'reactive' ones will undergo oxidation (Sacrifice) first, suppress the corrosion rate on the main metal of the vessel. This approach is critical to extending the service life of underwater structures and reducing material degradation due to marine corrosion [5].

Choosing the right repair steps is essential not only to ensure that the problem is completely resolved, but also that the cost is not too high to justify the work. Since the remedial measures are associated with significant costs, hence the implementation of Life Cycle Cost Analysis (LCCA) is needed in determining a truly cost-efficient rehabilitation strategy. To obtain a more reliable analysis, LCCA best practices should not only consider agency expenditure but also user costs and analysis Sensitivity Throughout the service life there is no repair. [6].

Weight Loss Method It is still the most widely used way to determine the corrosion rate of metal-based materials, despite being the oldest method currently in use. This method involves exposure specimen The metal is subjected to a specific environment (i.e., corrosive medium) for a sufficient period of exposure, after which the specimen is removed from that environment and the change in weight before and after exposure is then determined, known as Weight Loss [7].

Based on the review, previous research showed that the research conducted focused on the efficiency and materials used in zinc anode. Most studies did not analyze comparisons of methods used in victim anode installations, where there were two methods, namely bolted and welded. By comparing these two methods from a technical and economic point of view, this study aims to provide a decision-making basis for ship owners in choosing a protection system that is not only mechanically reliable in resisting vibration on the rudder, but also more financially efficient in the long run, which ultimately contributes to increasing the competitiveness of the shipping industry through a reduction in annual maintenance costs.

2. Materials and Methods

2.1 Material

This research was conducted on zinc anodes installed on the rudder structure of ferries as part of the cathodic protection system using the sacrificial anode cathodic protection method. The research object consists of two zinc anode installation methods, namely the welded method and the bolted method. The zinc anode welded method uses the Vesca S-8 type with an initial weight of 8 kg, while the bolted method uses the Vesca B-9 type with an initial weight of 8.5 kg.



Figure 1. Zinc Anode di Rudder

The data used in the study included the initial weight of zinc anode, the final weight of zinc anode after 2.5 years of operation, the amount of zinc anode attached to the ship's rudder, and cost data used in the Life Cycle Cost Analysis (LCCA) analysis. The data was obtained through field observation and technical documentation during the docking process of the ship.

Table 1. Zinc Anode Key Data

Installation Method	Type	Dimension (D x W x H) mm	Net Weight (kg)	Gross Weight (kg)
Welded	Vesca S-8	300 x 150 x 25	7.25	8.0
Bolted (bolt)	Vesca B-9	300 x 150 x 30	8.2	8.5
Welded	Vesca S-8	300 x 150 x 25	7.25	8.0
Bolted	Vesca B-9	300 x 150 x 30	8.2	8.5

(bolt)	a B-9	x 30		
Welded	Vesca S-8	300 x 150 x 25	7.25	8.0
Bolted (bolt)	Vesca B-9	300 x 150 x 30	8.2	8.5
Welded	Vesca S-8	300 x 150 x 25	7.25	8.0
Bolted (bolt)	Vesca B-9	300 x 150 x 30	8.2	8.5
Welded	Vesca S-8	300 x 150 x 25	7.25	8.0
Bolted (bolt)	Vesca B-9	300 x 150 x 30	8.2	8.5

Table 2. Zinc Anode Composition

Zinc (Zn)	Alumi num (Al)	Cadm ium (Cd)	Iro n (Fe)	Lea d (Pb)	Cop per (Cu)	Silic on (Si)
Remat nder (±99.9 %)	0.10-0.50	0.025-0.07	≤0.005	≤0.006	≤0.005	≤0.125

Based on table 2, zinc anode is composed of the main element in the form of zinc (Zn) with very high purity, which is about 99.9%. Zinc serves as the main material that undergoes oxidation in the cathodic protection system. Zinc was chosen because it has a more negative electrochemical potential than steel, so it is able to act as a sacrificial anode that protects the main structure from corrosion.

2.2 Weight Loss Analysis

Data processing using the Weight Loss Method was carried out to determine the corrosion rate of zinc anode based on the weight difference before and after the period of wear on the ship's rudder structure. The data used include the initial weight of the zinc anode based on the manufacturer's specifications and the residual weight obtained from the weighing results when the ship docks. The weight difference reflects the amount of material corroded during the operational life, so it can be used as a key indicator in evaluating cathodic protection performance.

Zinc anode mass loss analysis was carried out using the Weight Loss Method. This method is used to determine the amount of zinc anode mass consumed during the ship's operating life. The mass loss is obtained from the difference between the initial weight and the final weight of the zinc anode after the observation period.

The calculation of the corrosion rate using the Weight Loss Method refers to the following standard equations:

$$W = W_0 - W_t$$

W = mass loss (kg)

W₀ = initial weight zinc anode Before use

W_t = final weight zinc anode After Wearing

2.3 Consumption Rate

This parameter is obtained through the weight loss

method, which is by calculating the difference between the initial weight and the final weight of the zinc anode after use, then dividing it by the time of use. The consumption rate reflects the level of anode activity in providing cathodic protection current to the steel structure. The higher the consumption rate, the lighter the mass of the anode used in a given time, which indicates that the anode works more actively in corrosive environments.

$$CR = \frac{W_0 - W_t}{t}$$

CR = Consumption rate zinc anode (kg/year)
 W₀ = Starting weight zinc anode (kg)
 W_t = final weight zinc anode after the period Specific (kg)
 t = Operational time (years)

2.4 Estimated Zinc Anode Useful Life

The service life is greatly influenced by the rate of consumption, where there is an inverse proportional relationship. The service life can be estimated by comparing the initial capacity of the anode to the average consumption rate per year. Thus, zinc anodes that have a higher consumption rate tend to have a shorter service life, while anodes with low consumption rates will have a longer service life.

$$L = \frac{\eta W_0}{CR}$$

L = Zinc anode lifespan (years)
 η = Anode efficiency (0.85-0.95 for zinc)
 W₀ = Starting weight of zinc anode (kg)
 CR = Zinc anode consumption rate (kg/year)

The service life indicates my time efficiency until the zinc anode is exhausted or reaches the minimum limit of effective mass. The formula for zinc anode service life is derived from the concept of balance between available material capacity and consumption rate during operation. Standards such as DNV and ISO explain that in cathodic protection design, the life of the anode is calculated taking into account the effective mass that can be used as well as the efficiency of the anode in generating the protection current. Therefore, the use of efficiency factor (η) is important to describe real conditions in the field, where not all anode masses can be optimally utilized.

2.5 Effect of Discontinuity on Corrosion Rate

Discontinuity in zinc anode installation systems is one of the factors that can affect the effectiveness of cathodic protection and the consumption rate of anodes. The discontinuity in question can be in the form of imperfections in electrical contact, differences in surface conditions, or inuniform distribution of protective currents. In this study, the effect of discontinuity was analyzed based on two installation methods, namely bolted and welded methods, to see how each method affects the corrosion rate of zinc anode on the ship's rudder structure.

2.6 Life Cycle Cost Analysis

Life Cycle Cost Analysis (LCCA) is an economic analysis method used to calculate the total cost of a systems during its operational life, ranging from procurement, installation, maintenance, replacement, to end-of-life costs. In this study, the LCCA method was used to compare the economic efficiency of the use of zinc anodes with bolted and welded installation methods based on service life and frequency of replacement during the ship's operational period.

Using the LCCA method, the evaluation not only focuses on the initial cost, but also considers the costs over the life of the vessel. Therefore, this method is very important in determining technical and economic decisions regarding the selection of the most optimal zinc anode installation method.

Life Cycle Cost Analysis Formula:

$$LCC = C_i + C_m + C_r + C_o$$

LCC = Total lifecycle cost

C_i = Initial cost

C_m = Maintenance cost

C_r = Replacement cost

C_o = Other operational costs

The Life Cycle Cost Analysis formula refers to the concept of life cycle cost analysis developed by:

ISO-ISO 15686-5: Buildings and Constructed Assets – Service Life Planning – Part 5: Life Cycle Costing – ‘Life Cycle Costing is a methodology for systematic economic evaluation of life cycle costs over a period of analysis.’

3. Result and Discussion

3.1 Results of Weight Loss Method Data Processing

Table 3. Results of Weight Loss Method Data Processing

Installation Method	Type	Starting Weight (kg)	Final Weight (kg)	Mass Loss (kg)
Welded	Vesca S-8	8.0	4.910	3.090
Bolted (bolt)	Vesca B-9	8.5	5.822	2.678
Welded	Vesca S-8	8.0	3.835	4.165
Bolted (bolt)	Vesca B-9	8.5	4.036	4.464
Welded	Vesca S-8	8.0	4.725	3.275
Bolted (bolt)	Vesca B-9	8.5	4.320	4.180
Welded	Vesca S-8	8.0	4.475	3.525
Bolted (bolt)	Vesca B-9	8.5	3.325	5.175
Welded	Vesca S-8	8.0	4.674	3.326
Bolted (bolt)	Vesca B-9	8.5	3.340	5.160

Based on Table 3, the results of the measurement of the initial weight and final weight of the zinc anode on the ship's rudder structure are shown with two installation methods, namely bolted and welded, using the zinc anode types Vesca S-8 and Vesca B-9. Measurements were made after the ship's operating period of 2.5 years, so that a mass loss value was obtained as an indicator of the anode consumption rate during use.

In general, the data show that both installation methods experience a significant decrease in mass, which indicates that the zinc anode is actively functioning as a victim anode in the cathodic protection system. Variations in the mass loss values in each data can be caused by differences in operational conditions.

3.2 Consumption Rate Calculation Results

Table 4. Data on the Results of Consumption Rate Calculation

Installation Method	Starting Weight	Final Weight	Length of Operation (years)	Consumption Rate (kg/year)	Consumption (%)
Welded	8.0	4.9	2.5	1,236	38.63
(d)		10			
Bolted (bolt)	8.5	5.8	2.5	1,071	31.51
(d)		22			
Welded	8.0	3.8	2.5	1,666	52.06
(d)		35			
Bolted (bolt)	8.5	4.0	2.5	1,786	52.52
(d)		36			
Welded	8.0	4.7	2.5	1,310	40.94
(d)		25			
Bolted (bolt)	8.5	4.3	2.5	1,672	49.18
(d)		20			
Welded	8.0	4.4	2.5	1,410	44.06
(d)		75			
Bolted (bolt)	8.5	3.3	2.5	2,070	60.88
(d)		25			
Welded	8.0	4.6	2.5	1,330	41.58
(d)		74			
Bolted (bolt)	8.5	3.3	2.5	2,064	60.71
(d)		40			

Based on the results of the calculation of the consumption rate of zinc anode using the Weight Loss Method, it was obtained that the welded installation method had an average consumption rate of 1,390 kg/year, while the bolted method was 1,732 kg/year. This value shows that the zinc anode in the bolted method experiences faster consumption than the welded method during the same operating period.

Table 5. Consumption Rate Recapitulation Based on Installation Method

Parameters	Welded	Bolted
Number of Samples	5	5
Average Mass Loss (kg)	3,476	4,331
Average Consumption Rate (kg/year)	1,390	1,732
Average Consumption (%)	43.45	50.96

3.3 Zinc Anode Lifetime Estimation Results

The estimated service life of zinc anode is based on the average consumption rate of the Weight Loss Method test results in each installation method. The average value is used to obtain a representative service life that can be used as the basis for calculating replacement intervals and Life Cycle Cost Analysis (LCCA).

- a. Calculation of Estimated Service Life of Zinc Anode Welded

$$L = \frac{(\eta W_0)}{CR}$$

$$L = \frac{(0.90 \times 8.0)}{1.390}$$

$$L = 5.18 \text{ years}$$

- b. Calculation of Estimated Service Life of Bolted Zinc Anode

$$L = \frac{(\eta W_0)}{CR}$$

$$L = \frac{(0.90 \times 8.5)}{1.732}$$

$$L = 4.41 \text{ years}$$

3.4 Discontinuity Results to Corrosion Rate

In this study, the effect of discontinuity was analyzed based on two installation methods, namely bolted and welded methods, to see how each method affects the corrosion rate of zinc anode on the ship's rudder structure.

- a. Mechanical Discontinuity (Bolted)

Table 6. Mechanical Discontinuity Results (Bolted)

Conditions That Occur in the Field	Impact on Zinc Anode	Influence on the Cathodic Protection System
Loosening of bolts due to vessel operational vibration.	The electrical contact becomes unstable.	The distribution of protection current is uneven.
The formation of micro-gaps in the connection area.	Increases contact resistance.	Zinc anode consumption becomes faster.
Unevenness of the contact surface between the anode and the rudder.	The effective contact area is reduced.	Protection effectiveness decreases.
The presence of fouling and corrosion products at the joints.	The current flow resistance increases.	The anode consumption rate is unstable.

- b. Thermal Discontinuity (Welded)

Table 7. Thermal Discontinuity Results (Welded)

Conditions That Occur in the Field	Impact on Zinc Anode	Influence on the Cathodic Protection System
The formation of a Heat	Changes in the microstructure	Potential electrochemical

Affected Zone (HAZ) due to welding heat.	of the material.	characteristics.
Residual stress after cooling.	Increases the susceptibility of micro-cracks.	Potential for local degradation of materials.
Coiling is not uniform in the weld area.	Inhomogeneity of material properties.	The distribution of the protective current may change.
Surface oxidation due to high temperatures.	Lowens the quality of electrical contact.	The efficiency of cathodic protection decreases.

3.5 Life Cycle Cost Analysis Results

a. LCCA Calculation of Welded Method

Ci	= Rp. 1.150.000,00
Cm	= Rp. 100.000,00
Cr	= Rp. 1.150.000,00
Co	= Rp. 500.000,00

Based on the data that has been obtained, the calculation of Life Cycle Cost Analysis is as follows:

$$\begin{aligned} LCC &= 1.150.000,00 + 100.000,00 + \\ & 1.150.000,00 + 500.000,00 \\ &= 2.900.000,00 \end{aligned}$$

b. LCCA Calculation Bolted Method

Ci	= Rp. 1.125.000,00
Cm	= Rp. 150.000,00
Cr	= Rp. 1.125.000,00
Co	= Rp. 500.000,00

Based on the data that has been obtained, the calculation of Life Cycle Cost Analysis is as follows:

$$\begin{aligned} LCC &= 1.125.000,00 + 150.000,00 + \\ & 1.125.000,00 + 500.000,00 \\ &= 2.900.000,00 \end{aligned}$$

3.6 Determining the Optimal Installation Method

Table 8. Recapitulation of Analysis Results

Parameters	Welded	Bolted (bolt)
Average mass loss (kg)	3,476	4,331
Average consumption rate (kg/year)	1,390	1,732
Anode starting weight (kg)	8,0	8,5
Anode efficiency (η)	0,90	0,90
Anode service life (years)	5,18	4,41
Initial Cost (Rp)	1.150.000	1.125.000
Maintenance Cost (Rp)	100.000	150.000
Replacement Cost (Rp)	1.150.000	1.125.000
Operational Cost (Rp)	500.000	500.000
Total LCC (Rp)	2.900.000	2.900.000

Based on the results of the calculation of the need for zinc anode welded method on rudders, the costs obtained for the installation of zinc anode on ship rudders are as follows:

$$\begin{aligned} &= \text{Rp. } 1.150.000 \times 16 \text{ pcs} \\ &= \text{Rp. } 18.400.000 \end{aligned}$$

Based on the results of calculating the need for zinc anode bolted on rudders, the costs obtained for installing zinc anodes on ship rudders are as follows:

$$\begin{aligned} &= \text{Rp. } 1.125.000 \times 16 \text{ pcs} \\ &= \text{Rp. } 18.000.000 \end{aligned}$$

So that the results of the analysis of the estimated cost of zinc anode needs on ship rudders using the welded method are Rp. 18,400,000; while using the bolted method, which is Rp. 18,000,000.

The results of the consumption rate calculation also show that the bolted method has a consumption rate of 1,732 kg/year, while the welded method has a consumption rate of 1,390 kg/year. The difference in consumption can be calculated as:

$$\frac{1,732 - 1,390}{1,390} \times 100\% = 24,60\%$$

This means that the bolted method produces zinc anode consumption activity around 24.50% higher than the welded method. This condition shows that the anode sacrifice process in the bolted method takes place more actively so that the protection ability of the rudder structure becomes greater.

4. Conclusion

Based on the results of the research, it can be concluded as follows:

- The results of the analysis using the Weight Loss Method showed that the bolted installation method produced an average zinc anode mass loss of 4,331 kg with a consumption rate of 1,732 kg/year, while the welded method produced an average mass loss of 3,476 kg with a consumption rate of 1,390 kg/year. These results show that the zinc anode in the bolted method experiences higher sacrificial action during the ship's operational life.
- The estimated service life of the zinc anode shows that the welded method has a service life of 5.18 years, while the bolted method is 4.41 years. The difference is influenced by the higher consumption rate of zinc anode in the bolted method than in the welded method.
- The results of the Life Cycle Cost Analysis (LCCA) show that the two installation methods have the same life cycle cost of IDR 2,900,000. In addition, the total cost of procuring zinc anode on ship rudders is IDR 18,400,000 for the welded method and IDR 18,000,000 for the bolted method.
- Based on the results of technical and economic analysis, the bolted installation method is determined as the most optimal method for cathodic protection on ship rudders. This method results in approximately 24.60% higher zinc anode consumption activity than the welded method, which demonstrates greater cathodic protection capabilities without increasing lifecycle costs.

References

-
- [1] S. E. Susilowati and J. M. Simbolan, "Corrosion Rate Analysis of A36 Plate for Floatin G Dock Venture 3 Deck with Zinc Anode Protection and De Current and Zinc Anode Without Using De Current," *J. Study. Tek. Engine*, vol. 4, no. 2, pp. 108-115, 2019, doi: 10.52447/jktm.v4i2.1814.
 - [2] B. Sudjasta, P. J. Suranto, H. Setiati, P. Studi, T. Shipping, and J. South, "PREVENTING CORROSION IN THE HULL OF A GENERAL SHIP," vol. 14, pp. 209-215, 2018.
 - [3] S. Anwar, Y. Octavetri, I. Purnaningratri, and I. M. Sofian, "Electrochemical Performance of Sacrificial Anode Metals in Preventing Corrosion on Ships : A Literature Review," vol. 4, no. 1, pp. 2208-2216, 2025.
 - [4] J. Sade and M. S. A., "Analysis Of Needs And Placement Of Zinc Anode For New Ferry Ship Buildings," vol. 3, no. June, pp. 108-117, 2024.
 - [5] T. Ilza Mahendra and D. Dwisestiono, "Cathodic Protection Using Zinc Anode to Inhibit Corrosion in the Hull of Port Link VII Jakarta," *So. Marine J. Inov. Science and Technology. Marine*, pp. 7-12, 2022, doi: 10.62012/zi.v3i2.19694.
 - [6] H. O. J. I. N. How and A. A. Rahman, "Life Cycle Cost Analysis Case Study on Corrosion Remedial Measures for Concrete Structures," *J. Technn*, 40(B) Jun. 2004 15-26/r© Univ. Technology, Malaysia, vol. 40, pp. 15-26, 2004.
 - [7] L. Liu, T. Cao, Q. Zhang, and C. Cui, "Organic Phosphorus Compounds as Inhibitors of Corrosion of Carbon Steel in Circulating Cooling Water: Weight Loss Method and Thermodynamic and Quantum Chemical Studies," vol. 2018, 2018, doi: 10.1155/2018/1653484.

Lampiran 8. Sertifikat HKI


REPUBLIK INDONESIA
KEMENTERIAN HUKUM

SURAT PENCATATAN CIPTAAN

Dalam rangka perlindungan ciptaan di bidang ilmu pengetahuan, seni dan sastra berdasarkan Undang-Undang Nomor 28 Tahun 2014 tentang Hak Cipta, dengan ini menerangkan:

Nomor dan tanggal permohonan	EC002026079550, 5 Juni 2026
Pencipta	
Nama	Eggal Marta Puspa Wardhani dan Dr. Mohd. Ridwan, S.T., MT
Alamat	RT. 26 RW. 10 Desa Surok, Surok, Kab. Trenggalek, Jawa Timur, 66365
Kewarganegaraan	Indonesia
Pemegang Hak Cipta	
Nama	UNIVERSITAS DIPONEGORO
Alamat	Jl. Prof. Soedarto, SH Tembung, Tembung, Kota Semarang, Jawa Tengah, 50275
Kewarganegaraan	Indonesia
Jenis Ciptaan	Modul
Judul Ciptaan	Perhitungan Efektivitas Zinc Anode Berdasarkan Metode Instalasi Menggunakan Weight Loss Method
Tanggal dan tempat ditemukannya untuk pertama kali di wilayah Indonesia atau di luar wilayah Indonesia	19 Mei 2026, di Kota Semarang
Jangka waktu perlindungan	Berlaku selama 50 (lima puluh) tahun sejak Ciptaan tersebut pertama kali dilakukan Pengumuman.
Nomor Pencatatan	001265113

adalah benar berdasarkan keterangan yang diberikan oleh Pemohon.
Surat Pencatatan Hak Cipta atau produk Hak terkait ini sesuai dengan Pasal 72 Undang-Undang Nomor 28 Tahun 2014 tentang Hak Cipta.

s.d. MENTERI HUKUM
DIREKTUR JENDERAL KEKAYAAN INTELEKTUAL
u/s
Direktur Hak Cipta dan Desain Industri


Agung Demarsesongko, SH, MH
NIP. 196912261994031001




Badan Nasional
Sertifikasi
Elektronik

Dicatat:
1. Dalam hal pemohon memberikan keterangan tidak sesuai dengan surat pernyataan, Menteri berwenang untuk meniadakan surat pencatatan permohonan.
2. Surat Pencatatan ini tidak dapat secara otomatis menggunakan nilai dilindungi yang diberikan oleh Badan Nasional Sertifikasi Elektronik, Badan Siber dan Sandi Negara.
3. Surat Pencatatan ini dapat dibuktikan keabsahannya dengan memindai kode QR pada dokumen ini dan informasi akan ditampilkan dalam layar.
4. Surat Pencatatan ini dapat dibuktikan keabsahannya dengan memindai kode QR pada dokumen ini dan informasi akan ditampilkan dalam layar.

BIODATA PENULIS



Enggal Marta Puspa Wardhani adalah nama lengkap penulis Tugas Akhir ini. Lahir di Trenggalek, Provinsi Jawa Timur, pada tanggal 14 Oktober 2003. Penulis merupakan anak pertama dari dua bersaudara dari pasangan Bapak Martopo dan Ibu Elik Reliana. Penulis memiliki seorang adik laki-laki bernama Pranaya Bintang Wardhana. Penulis menempuh pendidikan formal dimulai dari SDN 2 Suruh (2010-2016), kemudian melanjutkan pendidikan menengah di SMP Negeri 1 Trenggalek (2016-2019), dan SMA Negeri 1 Karanganyar (2019-2022). Setelah menyelesaikan pendidikan menengah, penulis melanjutkan studi di Program Studi Teknologi REkayasa Konstruksi Perkapalan, Departemen Teknologi Industri, Sekolah Vokasi, Universitas Diponegoro, Semarang pada tahun 2022.

Selama masa perkuliahan, penulis aktif dalam organisasi lingkup himpunan mahasiswa jurusan yakni HIMATEKPAL dan pernah menjabat sebagai Ketua Pengembangan Sumber Daya Mahasiswa pada tahun 2024-2025. Penulis pernah melaksanakan magang di PT. Gamatara Trans Ocean Shipyard (GTOS), Cirebon di Departemen Quality Control pada bulan September 2025 – November 2025, lalu dilanjutkan di PT. Samudra Marine Indonesia, Cilegon di Departemen Painting Blating, Steel Work, dan Quality Control pada bulan Desember 2025 – Januari 2026. Penulis juga memiliki sertifikasi kompetensi Perencanaan & Pengendalian Produksi Pembangunan Kapal.

Sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Terapan Teknik (S.Tr.T.) pada Program Studi Teknologi Rekayasa Konstruksi Perkapalan, Departemen Teknologi Industri, Sekolah Vokasi Universitas Diponegoro, penulis menyusun Tugas Akhir dengan judul:

“Efisiensi Instalasi Zinc Anode Bolted dan Welded pada Rudder Menggunakan Weight Loss Method dan Life Cycle Cost Analysis” yang dibimbing oleh Bapak Dr. Mohd. Ridwan, S.T., M.T. Smoga dengan penulisan tugas akhir ini mampu memberikan kontribusi positif bagi dunia pendidikan dan menambah khazanah ilmu pengetahuan serta bermanfaat dan berguna bagi sesama.