

## 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)

W<sub>0</sub> = berat awal *zinc anode* sebelum pemakaian

W<sub>t</sub> = 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)

**W<sub>0</sub>** = Berat awal *zinc anode* (kg)

**W<sub>t</sub>** = 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 (%)
----	------------------	------	------------	-------------	------------------	-------------	---------------	--------------

						<b>i</b> <b>(tahun)</b>	<b>(kg/tahun)</b>	
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)

<b>Parameter</b>	<b>Welded</b>	<b>Bolted</b>
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)  
 $\eta$  = 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 ( $\eta$ ) 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*

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

$$= \frac{(0,90 \times 8,0)}{1,390}$$

$$= 5,18 \text{ tahun}$$

#### 4.3.1.2 Perhitungan Estimasi Umur Pakai *Zinc Anode Bolted*

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

$$= \frac{(0,90 \times 8,5)}{1,733}$$

$$= 4,41 \text{ tahun}$$

### 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)

<b>Metode Instalasi</b>	<b>Jenis Diskontinuitas</b>	<b>Kondisi yang Terjadi di Lapangan</b>	<b>Kondisi Zinc Anode</b>	<b>Keterangan</b>
<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)

<b>Parameter</b>	<b>Welded (Las)</b>	<b>Bolted (Baut)</b>
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> ( $\eta$ )	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.