

Analisis Teknis dan Ekonomis Perbandingan Laju Korosi Material Galvanis dan Aluminium untuk Memprediksi Umur dan Biaya Reparasi Lambung Kapal

M.Rafee Revaldi Marcell, Heri Supomo, dan Mohammad Sholikhon Arif
Departemen Teknik Perkapalan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
e-mail: hsupomo@na.its.ac.id

Abstrak—Konstruksi pada lambung kapal memegang peranan penting dalam pembangunan kapal. Diperlukan material dengan karakteristik yang tepat untuk dijadikan sebagai bahan lambung kapal. Ketahanan korosi yang buruk pada material baja menjadi salah satu kekurangan yang menyebabkan banyaknya kerugian. Adapun keunggulan material aluminium yaitu massa jenis yang lebih ringan dan memiliki daya tahan korosi yang tinggi. Namun, salah satu kekurangan aluminium adalah nilai jualnya yang tinggi serta memerlukan biaya yang mahal dalam proses pembangunan, pemeliharaan, dan perbaikan kapal. Galvanisasi pada material baja dapat dilakukan untuk melindungi material baja dan meningkatkan daya tahan korosi yang hampir sama baiknya dengan material aluminium sehingga baja galvanis dapat dijadikan alternatif material lambung kapal. Oleh karena itu, pada penelitian ini dilakukan pengujian untuk menganalisis perbandingan korosi Material Baja ASTM A36 Galvanis dan Aluminium 5083 untuk memprediksi umur material dan biaya reparasi yang dihasilkan pada lambung kapal. Rata-rata nilai laju korosi korosi yang diperoleh dari hasil pengujian laju korosi metode sel tiga elektroda adalah sebesar 0,03726 mmpy pada Material Baja ASTM A36 Galvanis dan 0,02592 mmpy pada Material Aluminium 5083. Berdasarkan rata-rata nilai laju korosi yang telah diperoleh, material baja galvanis berumur 32 tahun pada pelat lunas, 21 tahun pada pelat alas dan bilga, dan 24 tahun pada pelat sisi dengan, sedangkan material aluminium berumur 41 tahun pada pelat lunas, 31 tahun pada pelat alas dan bilga, dan 38 tahun pada pelat sisi. Material baja galvanis berumur lebih singkat jika dibandingkan dengan material aluminium, namun proses galvanisasi dan lapisan galvanis yang melindungi Material Baja ASTM A36 terbukti dapat memperpanjang umur material tersebut. Akumulasi total biaya pembangunan dan reparasi kapal penumpang baja galvanis adalah sebesar Rp9.244.130.509,24 sedangkan pada kapal penumpang aluminium adalah sebesar Rp11.799.608.666,56. Perbedaan akumulasi total biaya memiliki persentase sebesar 21,66%.

Kata Kunci—Baja Galvanis, Aluminium, Laju Korosi, Lifetime Material, Biaya Reparasi.

I. PENDAHULUAN

KONSTRUKSI pada lambung kapal memegang peranan penting dalam pembangunan kapal. Sebab berdasarkan segi konstruksi, lambung kapal adalah daerah yang pertama kali terkena air laut. Air laut yang dikenal bersifat korosif dapat merusak lambung kapal apabila lambung kapal tidak dirawat dengan baik dan diperbaiki. Sangat penting bagi lambung kapal agar memiliki konstruksi yang kuat sehingga kapal dapat beroperasi dengan baik ketika melintasi perairan laut yang luas dalam jangka waktu yang lama. Maka dari itu diperlukan material dengan karakteristik yang tepat untuk dijadikan sebagai bahan lambung kapal [1].

Tabel 1.
Ketebalan Minimum yang Dijinkan untuk Bagian Badan Kapal

Bagian Badan Kapal	Safety Factor
Pelat Kulit Lambung:	
1. Keel Plate, Bottom Plate, Bilge Plate	20%
2. Side Plate	20%
3. Sheer strake	20%
Tank Top dan Margin Plate	20%
Main Deck:	
1. Stringer plate dan lajur pelat antara geladak antara lambung dengan ambang palkah	20%
2. Pelat geladak antara lubang palkah	30%
Geladak bangunan atas dan rumah geladak	30%
Dinding sekat memanjang dan melintang	30%



Gambar 1. Potensiostat Autolab dan Tabung Reaksi.

Material pada proses pembangunan kapal bermacam-macam seperti kayu, *fiberglass*, baja, aluminium, dan sebagainya. Setiap material memiliki kelebihan dan kekurangan masing-masing dari segi teknis produksi maupun segi ekonomis dalam pembangunan. Material sangat berpengaruh dalam proses pembangunan kapal karena dari karakteristik material itu kekuatan dan umur kapal dapat diperkirakan. Kekuatan kapal dapat diperkirakan dengan *mechanical properties* yang dimiliki material yang digunakan, sedangkan untuk umur kapal dapat diperkirakan dengan ketahanan material yang digunakan terhadap proses kerusakan material yaitu pelapukan atau korosi.

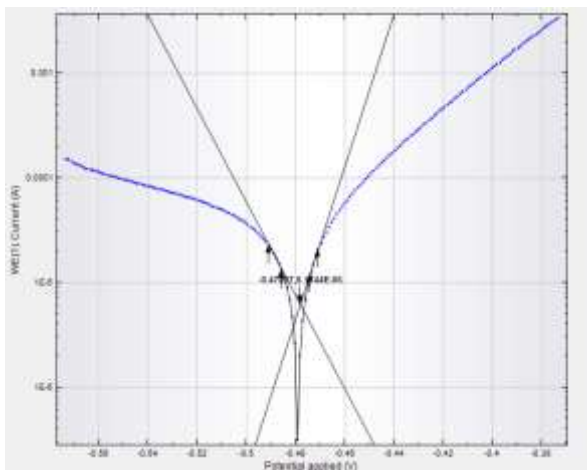
Pada umumnya pembangunan kapal menggunakan material baja sebagai bahan konstruksi lambung kapal, mengingat karakteristik mekaniknya yang kuat dan tahan akan tubrukan. Namun, terdapat beberapa kekurangan baja, salah satunya adalah daya tahan korosi yang kurang baik [2]. Adapun material aluminium yang lebih ringan dan memiliki daya tahan korosi yang tinggi serta *ductility* yang baik pada kondisi dingin sehingga dalam pembangunan kapal, aluminium lebih diunggulkan dari baja. Namun aluminium memiliki nilai jual yang tinggi sehingga memerlukan biaya yang mahal dalam proses pembangunan kapal.

Tabel 2.

Ketebalan Lapisan Galvanis pada Spesimen Uji Baja Galvanis		
Spesimen Uji	Ketebalan Lapisan	Satuan
B1	93,38	µm
B2	73,14	µm
B3	47,59	µm

Tabel 3.
Hasil Pengujian Laju Korosi

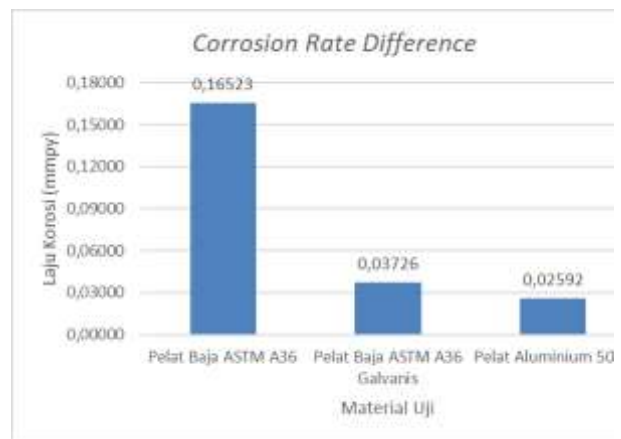
Material Uji	Spesimen Uji	Potensial (mV)	Kerapatan Arus ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	Laju Korosi (mmpy)	Rata-Rata (mmpy)
Pelat Baja ASTM A36	A1	-478,070	9,526	0,11081	0,16523
	A2	-457,600	18,516	0,21539	
	A3	-480,830	14,569	0,16948	
Pelat Baja ASTM A36 Galvanis	B1	-579,56	0,855	0,01158	0,03726
	B2	-619,56	2,569	0,03478	
	B3	-610,18	4,524	0,06543	
Aluminium 5083	C1	-685,420	0,969	0,01090	0,02592
	C2	-703,500	3,033	0,03414	
	C3	-683,780	2,907	0,03271	



Gambar 2. Grafik Tafel Pengujian Spesimen A1.

Salah satu metode perlindungan material baja dari korosi adalah galvanisasi. Galvanisasi adalah proses pelapisan logam induk dengan logam lain yang lebih mudah terkorosi, dengan tujuan untuk melindungi logam induk dari korosi, baik terlindungi secara posisi juga secara kimia. Pada umumnya dalam industri perkapalan, galvanisasi hanya dilakukan pada konstruksi dalam lambung kapal dengan Material Baja ASTM A36 untuk melindungi bagian dalam kapal dari korosi tanpa melindungi bagian luar lambung kapal yang secara langsung tercelup air. Salah satu kelemahan dari galvanisasi adalah lapisan galvanis yang melindungi logam induk mudah rusak apabila tergores atau terbentur dengan tekanan tinggi yang dapat mengakibatkan kerusakan berupa pelapukan atau korosi menjadi lebih parah sehingga galvanisasi pada bagian luar lambung kapal jarang dilakukan untuk menghindari risiko kerusakan lapisan galvanis yang melindungi permukaan pelat kapal.

Oleh karena itu, pada penelitian ini penulis melakukan pengujian laju korosi untuk menganalisis dan membandingkan laju Material Baja ASTM A36 Galvanis dan Aluminium 5083 sesuai standar teknis pengujian laju korosi untuk memprediksi umur material dan biaya reparasi yang dihasilkan pada lambung kapal, sehingga dapat ditentukan material mana yang lebih baik untuk digunakan sebagai bahan lambung kapal.



Gambar 3. Grafik Perbandingan Laju Korosi.



Gambar 4. Grafik Pengaruh Ketebalan Lapisan Galvanis Terhadap Laju Korosi.



Gambar 5. Grafik Perbandingan Umur Material Pelat Kapal.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Korosi

Korosi adalah peristiwa rusaknya logam karena reaksi dengan lingkungannya. Definisi lainnya adalah proses perusakan logam, dimana logam akan mengalami penurunan mutu karena bereaksi dengan lingkungan baik itu secara kimia maupun elektrokimia pada saat pemakaiannya. Korosi pada logam terjadi akibat interaksi antara logam dan lingkungan yang bersifat korosif, yaitu lingkungan yang lembap (mengandung uap air) dan diinduksi oleh adanya gas O_2 , CO_2 , atau H_2S [3].

B. Perhitungan Laju Korosi

1) Metode Elektrokimia

Metode elektrokimia adalah metode mengukur laju korosi dengan mengukur beda potensial objek hingga didapat laju

Tabel 5.
Perhitungan Umur Pelat Kapal

Material Kapal	Laju Korosi (mmpy)	Bagian Kapal	Tebal Pelat (mm)	Safety Factor	Batas Ketebalan (mm)	Umur Pakai
Baja Karbon	0,21539	Lunas	12	20%	9,6	11
		Alas	8	20%	6,4	7
		Bilga	8	20%	6,4	7
		Sisi	6	30%	4,2	8
Baja Galvanis	0,06543	Lunas	12	20%	9,6	37
		Alas	8	20%	6,4	24
		Bilga	8	20%	6,4	24
		Sisi	6	30%	4,2	28
Aluminium	0,03414	Lunas	8	20%	6,4	47
		Alas	6	20%	4,8	35
		Bilga	6	20%	4,8	35
		Sisi	5	30%	3,5	44



Gambar 6. Grafik Perbandingan Umur Material Pelat Kapal.

Tabel 6.
Perhitungan Umur Pelat Kapal pada Kondisi Perairan Laut yang Diidealkan

Material Kapal	Laju Korosi (mmpy)	Bagian Kapal	Tebal Pelat (mm)	Safety Factor	Batas Ketebalan (mm)	Umur Pakai
Baja Karbon	0,24770	Lunas	12	20%	9,6	10
		Alas	8	20%	6,4	6
		Bilga	8	20%	6,4	6
		Sisi	6	30%	4,2	7
Baja Galvanis	0,07524	Lunas	12	20%	9,6	32
		Alas	8	20%	6,4	21
		Bilga	8	20%	6,4	21
		Sisi	6	30%	4,2	24
Aluminium	0,03926	Lunas	8	20%	6,4	41
		Alas	6	20%	4,8	31
		Bilga	6	20%	4,8	31
		Sisi	5	30%	3,5	38

korosi yang terjadi. Kelemahan metode ini adalah tidak dapat menggambarkan secara pasti laju korosi yang terjadi secara akurat karena hanya dapat mengukur laju korosi hanya pada waktu tertentu saja. Kelebihan metode ini dapat langsung mengetahui laju korosi pada saat di ukur, hingga waktu pengukuran tidak memakan waktu yang lama. Rumus untuk menghitung laju korosi berdasarkan Hukum Faraday:[4-5].

$$CR (mmpy) = K \frac{i_{kor}}{D} EW, EW = \frac{a}{n} \dots\dots\dots(II.2)$$

- CR = Laju Korosi (mpy atau mmpy)
- K = 0,00327, mm g/ μA cm yr
- EW = Equivalent Weight (dimensionless)
- a = Berat atom logam (gram/mol)
- i_{kor} = Kerapatan arus (μA/cm²)
- n = Elektron valensi logam
- D = Massa jenis logam (gram/cm³)

C. Metode Sel Tiga Elektroda

Pengujian laju korosi dengan menggunakan sel tiga elektroda merupakan pengujian laju korosi yang dipercepat dengan polarisasi dan potensial korosi bebasnya. Dari percobaan ini akan diperoleh data besarnya arus untuk setiap tegangan. Sel tiga elektroda adalah perangkat laboratorium baku untuk penelitian kuantitatif terhadap sifat-sifat korosi bahan. Sel tiga elektroda adalah versi penyempurnaan dari sel korosi basah. Sel ini dapat digunakan dalam berbagai macam percobaan korosi. Standar pengujian laju korosi dengan metode sel tiga elektroda diatur pada ASTM G5-94[6].

Tabel 4.
Perbandingan Metode dan Kebutuhan Docking Repair

Pekerjaan	Kapal Penumpang			
	Baja Galvanis		Aluminium	
	Metode	Kebutuhan	Metode	Kebutuhan
Replating	SMAW	Electrode	TIG	Filler Rod Gas Argon
	Perbaikan hot dip galvanizing	Cold Galvanize	Primer	Pure Epoxy
Painting	Primer	Epoxy Polyamide	Sealer Antifouling	Epoxy TBT Free
	Sealer Antifouling	Epoxy TBT Free Aliphatic Polyurethanes	Sealer Antifouling	Epoxy TBT Free
	Topcoat		Topcoat	Epoxy

D. Baja Galvanis

Galvanisasi merupakan proses pelapisan logam induk dengan logam lain yang lebih mudah terkorosi, dengan tujuan untuk melindungi logam induk dari korosi, baik terlindungi posisi juga secara kimia. Galvanisasi dapat dijadikan terobosan agar pelat baja dapat memiliki umur yang lebih lama. Galvanisasi pada pelat baja dapat dilakukan dengan beberapa cara. Salah satu metode galvanisasi pada pelat baja adalah dengan zinc spray atau penyemprotan seng cair [7].

E. Batas Ketebalan Minimum Pelat

Ketebalan minimum pelat ditentukan oleh persentase keausan dibanding dengan ketebalan pelat yang didesain dan disetujui Klasifikasi. Berikut mengenai keausan maksimal pelat yang diijinkan klasifikasi [8]. Ketebalan minimum yang diijinkan untuk bagian badan kapal dapat dilihat pada Tabel 1.

III. METODOLOGI PENELITIAN

A. Pemodelan Eksperimen

Penulis melakukan penelitian dengan metode eksperimen. Penulis melakukan pemodelan eksperimen untuk menentukan langkah eksperimen dan mendapatkan data melalui pengujian.

B. Pembuatan Spesimen

Penulis melakukan pembuatan dan persiapan spesimen untuk pengujian laju korosi metode sel tiga elektroda. Pengujian dilakukan dengan 3 material uji yang masing-



Gambar 7. Grafik Perbandingan Akumulasi Total Biaya Pembangunan Kapal Tahun 0.



Gambar 8. Grafik Perbandingan Akumulasi Total Biaya Reparasi Kapal Tahun 1 – 20.

masing terdiri dari 3 spesimen uji. Material yang digunakan adalah Pelat Baja ASTM A36 dan Pelat Aluminium 5083 dengan berdimensi 300 mm x 10 mm x 10 mm yang kemudian dipotong menjadi 10 bagian dengan ukuran 20 mm x 10 mm x 10 mm. Pada Pelat Baja ASTM A36 yang telah dipotong kemudian dilakukan penyemprotan dengan cat galvanis pada 3 spesimen uji.

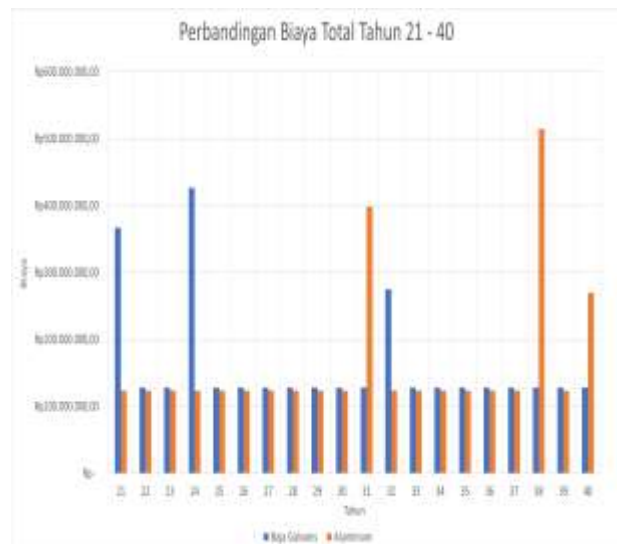
C. Pengukuran Ketebalan Lapisan Galvanis

Penulis melakukan pengukuran ketebalan lapisan galvanis pada spesimen uji Pelat Baja ASTM A36 Galvanis dengan alat uji ketebalan MiniTest600 untuk mendapatkan perbandingan ketebalan lapisan tiap spesimen uji.

D. Pengujian Laju Korosi

Penulis melakukan pengujian laju korosi untuk mendapatkan nilai laju korosi dari setiap spesimen uji. Pengujian laju korosi dilakukan dengan standar ASTM G5-94 dengan metode sel tiga elektroda. Tahapan-tahapan pengujian laju korosi adalah sebagai berikut: [6].

1. Persiapan spesimen uji, peralatan tabung reaksi yaitu *reference electrode* dan *auxiliary electrode*, larutan NaCl sebagai media korosi dan seperangkat Potensiostat Autolab sebagai sumber potensial yang juga terhubung pada *Software NOVA*.
2. Pemilihan metode polarisasi linear pada *Software NOVA*
3. Pengaturan parameter pengujian laju korosi
 - a. Potensial yang diberikan = -0,1 V sampai 0,1 V
 - b. Step potensial = 0,01 V



Gambar 9. Grafik Perbandingan Akumulasi Total Biaya Reparasi Kapal Tahun 21 – 40.

Tabel 7. Akumulasi Total Biaya Pembangunan (Tahun 0) dan Reparasi Kapal Penumpang (Tahun 1 - 40)

Tahun	Biaya per Tahun Kapal Penumpang (Rp)	
	Baja Galvanis	Aluminium
0	3.450.435.000,00	6.043.860.000,00
1 - 40	5.793.695.509,24	5.755.748.666,56
Total	9.244.130.509,24	11.799.608.666,56

- c. Scan rate = 0,01 V/s
- d. RE = Ag/AgCl (KCl 3 M), AE = Pt, WE = Spesimen A1-C3
- e. Media korosi = NaCl 3,5%

4. Klik tanda “Start” untuk memulai pengujian laju korosi. Proses *scanning* bertujuan untuk mencari nilai potensial yang akan digunakan untuk running pengujian spesimen tersebut.
5. *Software NOVA* melakukan proses *running* garis diagram potensial terhadap kerapatan arus.
6. Setelah grafik Tafel terbentuk, masukkan data massa jenis material yang diuji (g/cm^3), berat ekuivalen logam (g/mol), serta luas permukaan material uji (cm^2).
7. Pengeplotan dan ekstrapolasi terhadap diagram tafel untuk mendapatkan nilai rapat arus (i_{corr}) dan laju korosi ($mm/year$). Potensiostat autolab dan tabung reaksi dapat dilihat pada Gambar 1.

E. Analisis Perbandingan Laju Korosi

Penulis melakukan analisis perbandingan nilai laju korosi yang telah didapatkan pada pengujian laju korosi. Nilai laju korosi yang telah didapatkan dibuatkan nilai rata-rata untuk setiap material uji.

F. Analisis Pengaruh Ketebalan Lapisan Galvanis Terhadap Laju Korosi

Penulis melakukan analisis mengenai pengaruh ketebalan lapisan galvanis pada material baja galvanis terhadap nilai laju korosi yang didapatkan pada masing-masing spesimen uji Pelat Baja ASTM A36 Galvanis.

G. Analisis Perbandingan Umur Material Pelat Kapal

Penulis melakukan analisis perhitungan estimasi umur

material berdasarkan laju korosi tiap material uji dan *safety factor* pengurangan ketebalan pelat untuk menentukan waktu pergantian pelat kapal.

H. Analisis Teknis Docking Repair Kapal Penumpang

Penulis melakukan analisis teknis *docking repair* kapal penumpang baja galvanis serta pekerjaan apa saja yang akan ditinjau.

I. Analisis Teknis Perbandingan Docking Repair Kapal Penumpang

Penulis melakukan perbandingan teknis, metode, dan kebutuhan tiap pekerjaan yang ditinjau pada *docking repair* kapal penumpang baja galvanis dan kapal penumpang aluminium.

J. Analisis Ekonomis

Penulis melakukan analisis ekonomis perhitungan akumulasi total biaya pembangunan dan reparasi kapal penumpang dengan material baja galvanis dan aluminium. Akumulasi biaya total kemudian dibandingkan untuk menentukan material mana yang lebih ekonomis.

K. Kesimpulan

Penulis melakukan perbandingan terhadap hasil analisa yang telah dilakukan dengan hipotesis yang sebelumnya telah dibuat, kemudian dapat ditarik kesimpulan apakah penggunaan baja galvanis sebagai material kapal lebih ekonomis dibandingkan penggunaan aluminium sebagai material kapal.

IV. HASIL PENGUJIAN

A. Ketebalan Lapisan Galvanis

Setelah dilakukan pengujian ketebalan lapisan galvanis pada spesimen uji Pelat Baja ASTM A36 Galvanis, didapatkan data ketebalan lapisan untuk setiap spesimen yang telah diuji. Pengukuran ketebalan lapisan galvanis pada spesimen uji Pelat Baja ASTM A36 Galvanis dilakukan untuk mengetahui pengaruh ketebalan lapisan galvanis pada spesimen uji Pelat Baja ASTM A36 Galvanis terhadap laju korosi yang terjadi. Hasil pengukuran ketebalan lapisan dapat dilihat pada Tabel 2.

B. Hasil Pengujian Laju Korosi

Setelah dilakukan pengujian laju korosi, didapatkan data-data hasil analisis polarisasi linier dari seperangkat peralatan Potensiostat Autolab (PGSTAT30) dan *software* NOVA, Data-data tersebut meliputi nilai kerapatan arus, potensial arus, hambatan dan laju korosi. Data-data yang diperoleh dari *output* peralatan dan *software* NOVA ini juga disertai dengan grafik Tafel. Grafik tersebut menunjukkan potensial dan kerapatan arus yang digunakan oleh peralatan uji korosi,

Setelah pengujian berhenti, grafik Tafel akan membentuk dua garis lurus yang saling memotong. Dari potongan garis ini didapatkan nilai rapat arus korosi yang didesain sendiri dengan mencari nilai paling presisi, yaitu nilai yang paling dekat atau tepat dengan pada potongan garis tersebut. Berikut adalah salah satu contoh grafik Tafel pada salah satu spesimen uji serta rekapitulasi hasil pengujian laju korosi ditunjukkan pada Tabel 3. Grafik tafel pengujian spesimen A1 dapat dilihat pada Gambar 2.

V. ANALISA TEKNIS DAN EKONOMIS

A. Analisis Perbandingan Laju Korosi

Berdasarkan Gambar 3, Pelat Baja ASTM A36 memiliki rata-rata nilai laju korosi tertinggi dan Pelat Aluminium 5083 memiliki rata-rata nilai laju korosi terendah, serta Pelat Baja ASTM A36 Galvanis memiliki rata-rata nilai laju korosi yang jauh lebih rendah dibandingkan Pelat Baja ASTM A36.

Grafik perbandingan laju korosi menunjukkan bahwa proses galvanisasi yang diterapkan pada Pelat Baja ASTM A36 terbukti dapat meningkatkan ketahanan korosi baja itu sendiri. Lapisan galvanis yang menutupi permukaan pelat baja melindungi pelat tersebut dari air laut yang korosif, sehingga dapat meningkatkan ketahanan korosi dari material itu sendiri. Rata-rata nilai laju korosi Pelat Baja ASTM A36 Galvanis tidak lebih baik dari Pelat Aluminium 5083 yang memiliki rata-rata nilai laju korosi terbaik di antara ketiga material uji. Namun, nilai tersebut mendekati rata-rata nilai laju korosi Pelat Aluminium 5083 sehingga Material Baja ASTM A36 Galvanis terbukti dapat dijadikan sebagai alternatif material lambung kapal. Grafik perbandingan laju korosi dapat dilihat pada Gambar 3.

B. Analisis Pengaruh Ketebalan Lapisan Galvanis Terhadap Laju Korosi

Berdasarkan grafik pada Gambar 4, spesimen uji Pelat Baja ASTM A36 Galvanis B1 dengan ketebalan lapisan sebesar 98,38 μm memiliki nilai laju korosi sebesar 0,01158 mmpy; spesimen uji Pelat Baja ASTM A36 Galvanis B2 dengan ketebalan lapisan sebesar 73,14 μm memiliki nilai laju korosi sebesar 0,03478 mmpy; dan spesimen uji Pelat Baja ASTM A36 Galvanis B3 dengan ketebalan lapisan sebesar 47,59 μm memiliki nilai laju korosi sebesar 0,06543 mmpy. Spesimen B1 dengan ketebalan lapisan paling besar memiliki nilai laju korosi paling rendah sedangkan spesimen B3 dengan ketebalan lapisan paling rendah memiliki nilai laju korosi paling besar.

Pada Gambar 4 ditunjukkan bahwa ketebalan lapisan galvanis berbanding terbalik dengan nilai laju korosi yang dihasilkan. Semakin besar ketebalan lapisan galvanis maka semakin rendah nilai laju korosi yang dihasilkan dan semakin rendah ketebalan lapisan galvanis maka semakin besar nilai laju korosi yang dihasilkan.

C. Analisis Perbandingan Umur Material Pelat Kapal

Untuk melakukan perhitungan umur pelat, terlebih dahulu ditentukan *safety factor* pengurangan ketebalan pelat yang masih dalam toleransi pengurangan ketebalan pelat. Ketebalan minimum pelat ditentukan oleh persentase keausan dibanding dengan ketebalan pelat yang didesain dan disetujui BKI [8]. Berdasarkan data hasil pengujian rata-rata laju korosi tiap material uji, maka didapatkan prediksi umur tiap jenis material pelat kapal, seperti pada Tabel 5.

Dapat diketahui umur masing-masing material uji pada setiap bagian pelat kulit kapal. Semakin besar nilai laju korosi maka semakin cepat umur materialnya. Oleh karena itu, nilai laju korosi yang digunakan dalam perhitungan estimasi umur material adalah nilai laju korosi terbesar yang didapatkan dari hasil pengujian laju korosi. Pada perhitungan umur material, perlu ditambahkan persentase faktor penyesuaian kondisi lingkungan perairan laut sebesar 15% pada setiap nilai laju korosi material uji agar kondisi lingkungan perairan laut

tempat kapal beroperasi menjadi lebih ideal, dimana dalam faktor tersebut mencakup perbedaan temperatur, salinitas, dan keadaan lingkungan air laut seperti *biofouling* dan sebagainya sehingga umur material yang didapatkan mengalami sedikit pengurangan seperti terlihat pada Tabel 6. Grafik perbandingan umur material pelat kapal dapat dilihat pada Gambar 5.

Umur material baja karbon adalah 10 tahun pada pelat lunas dengan tebal pelat sebesar 12 mm, 6 tahun pada pelat alas dan bilga dengan tebal pelat sebesar 8 mm, dan 7 tahun pada pelat sisi dengan tebal pelat sebesar 6 mm. Umur material baja galvanis adalah 32 tahun pada pelat lunas dengan tebal pelat sebesar 12 mm, 21 tahun pada pelat alas dan bilga dengan tebal pelat sebesar 8 mm, dan 24 tahun pada pelat sisi dengan tebal pelat sebesar 6 mm. Umur material aluminium adalah 41 tahun pada pelat lunas dengan tebal pelat sebesar 8 mm, 31 tahun pada pelat alas dan bilga dengan tebal pelat sebesar 6 mm, dan 38 tahun pada pelat sisi dengan tebal pelat sebesar 5 mm. Baja karbon berumur paling singkat sedangkan aluminium berumur paling panjang serta baja galvanis berumur lebih panjang dibandingkan dengan baja karbon. Lapisan galvanis yang melindungi permukaan pelat baja dapat memperpanjang umur material itu sendiri secara signifikan meskipun tidak lebih lama dari aluminium. Apabila ketebalan pelat sudah mendekati atau melebihi batas minimum yang telah ditentukan, maka pelat kapal harus segera di-*replate*.

D. Analisis Teknis Docking Repair Kapal Penumpang

Berdasarkan ketentuan klasifikasi kapal, kapal yang dibangun dibawah badan klasifikasi kapal yang diakui harus dilaksanakan pemeriksaan secara berkala diatas *dock* dengan tujuan memelihara kapal dan mengembalikan suatu struktur maupun peralatan menjadi sediakala pada kondisi laik laut dan siap beroperasi, serta dari segi pemilik kapal atau operator dapat memenuhi jadwal pemuatan tepat pada waktunya tanpa suatu kendala apapun. Di samping itu pihak klasifikasi menetapkan beberapa periode survey yang harus dipenuhi pemilik kapal untuk terjaminnya kelaiklautan kapal. Periode survey tersebut telah ditetapkan secara periodik sejak kapal tersebut diluncurkan pertama kali dari galangan kapal pembuatnya, diantara beberapa survey kapal untuk kapal yang sudah beroperasi dengan kelas BKI untuk kapal dengan notasi A100SM. Dalam satu periode masa berlaku kelas (lima tahun) kapal harus melaksanakan 2 kali survey pengedokan yaitu; survey pengedokan I (survey pengedokan antara/*intermediate*) dan survey pengedokan II (survey pengedokan *special survey*). Survey pengedokan II merupakan salah satu *item* pemeriksaan survey pembaruan kelas. Khusus untuk kapal penumpang, survey pengedokan merupakan salah satu *item* pemeriksaan survey tahunan [9].

Kapal penumpang merupakan kapal yang digunakan untuk mengangkut penumpang yang berjumlah lebih dari 12 orang. Berdasarkan ketentuan klasifikasi kapal, kapal penumpang wajib melaksanakan survey pengedokan setiap tahunnya sebagai salah satu *item* pemeriksaan survey tahunan. Pada umumnya, perbaikan dan pemeliharaan kapal dilakukan berdasarkan *repair list* yang diberikan oleh pihak *owner* kapal dan hasil dari pemeriksaan ketebalan pelat (*Ultrasonic Test*) yang dilakukan pada saat *docking* oleh pihak kelas. Pada penelitian ini diasumsikan ketebalan pelat kulit kapal

dihitung berdasarkan umur material pelat kapal. Penggantian pelat kapal dilakukan pada pelat kulit yang sudah mendekati atau melewati batas pengurangan ketebalan minimum yang telah ditetapkan oleh pihak kelas.

Pekerjaan reparasi kapal yang akan ditinjau pada penelitian ini meliputi:

1. Pengedokan
2. Pembersihan badan kapal
3. Pemotongan dan penggantian pelat
4. Pengecatan badan kapal

Perbaikan kapal penumpang diawali dengan proses *docking* atau masuknya kapal ke dalam *dock*. Teknis pengedokan kapal penumpang pada umumnya sama seperti kapal lainnya pada saat kapal akan *docking*. Pembersihan badan kapal dilakukan setelah kapal selesai *docking*. Pembersihan badan kapal diawali dengan *scrapping*. *Scrapping* dilakukan dengan menggunakan kapi untuk mengelupas tritip dan *fouling* yang menempel setelah air dalam *dock* surut. Permukaan pelat lambung kapal yang masih basah oleh air laut memudahkan pengerjaan *scrapping*. Setelah *scrapping* selesai dilanjutkan dengan penyemprotan air pada badan kapal atau *waterjetting* untuk menghilangkan bekas tritip dan *fouling* yang masih menempel. Air yang digunakan pada *waterjetting* adalah air tawar. Tahapan selanjutnya adalah *sandblasting*. Metode yang digunakan adalah *full blast* yaitu seluruh permukaan pelat kulit yang dibersihkan di-*blast* sampai cat pada pelat terkelupas. Bahan yang digunakan pada *sandblasting* adalah pasir vulkanik.

Proses *hull replating* kapal penumpang ditinjau berdasarkan pemotongan pelat kulit (*fitting*) dan pengelasan untuk menyambungkan pelat yang telah dipasang (*welding*). Sebelum dilakukan pemotongan, terlebih dahulu dilakukan *marking* atau penandaan pada pelat kulit yang akan dipotong berdasarkan data *shell expansion* atau bukaan kulit. Peralatan kerja dan mesin yang digunakan pada kapal penumpang baja galvanis dan aluminium diasumsikan sama yaitu dengan menggunakan *blander* las. Pada pemotongan pelat kulit baja galvanis, lapisan galvanis akan menguap dikarenakan titik didih dari *zinc* adalah sebesar $\pm 900^{\circ}\text{C}$ dimana lebih kecil dari suhu pemanasan pada material baja yang mencapai suhu $\pm 1500^{\circ}\text{C}$ sehingga asap yang dihasilkan akan sangat banyak. Oleh karena itu, dibutuhkan sirkulasi udara dan peralatan *safety* yang baik bagi *fitter*. Pada pemotongan pelat kulit aluminium, perlu diperhatikan panas yang dihasilkan *blander* las pada saat dilakukannya pemotongan. Aluminium memiliki titik lebur dan titik didih yang lebih rendah dari baja, sehingga perlu diperhatikan *output* panas yang dihasilkan dari *blander* las agar tidak terjadi kesalahan dalam memotong pelat kulit.

Pada proses pengelasan, metode yang digunakan pada baja galvanis adalah *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW). Pada saat proses pengelasan baja galvanis berlangsung, lapisan galvanis pada daerah sambungan las akan menguap dan menghasilkan asap yang sangat banyak sehingga diperlukan sirkulasi udara dan peralatan *safety* yang baik bagi *welder* pada saat pengelasan berlangsung. Setelah proses pengelasan telah dilakukan, perlu dilakukan pelapisan kembali pada material di daerah las yang kehilangan lapisan galvanis karena proses pengelasan dengan menggunakan *zinc spray cold galvanize*. Pada pengelasan aluminium, metode yang disarankan oleh Biro Klasifikasi Indonesia adalah

Tungsten Inert Gas (TIG). Metode pengelasan TIG umumnya digunakan pada pengelasan material aluminium atau *stainless steel*. Pada pengelasan TIG, *electrode* tidak ikut mencair dikarenakan *electrode* hanya berfungsi sebagai penghasil busur listrik saat bersentuhan dengan benda kerja, sedangkan untuk logam pengisi yang digunakan adalah *filler rod*. Pengelasan TIG menggunakan gas argon sebagai gas pelindung untuk melindungi material pada saat proses pengelasan berlangsung. Pengelasan TIG memiliki kelebihan dimana hasil pengelasan tidak menghasilkan *slag*, tidak menghasilkan percikan las sehingga hasil las lebih bersih, dan karena adanya gas pelindung maka tidak ada reaksi oksidasi yang disebabkan oleh oksigen dan nitrogen pada material las. Namun, pengelasan TIG memiliki kecepatan pengelasan yang rendah dibandingkan dengan metode pengelasan lainnya dan metode pengelasan ini membutuhkan ruangan tertutup agar gas pelindung tidak terganggu dengan angin sehingga dapat memberikan perlindungan maksimal.

Proses pengecatan ditujukan sebagai *finishing* pada perbaikan kapal untuk memberikan perlindungan tambahan pada material dan penambah estetika kapal. Pengecatan dilakukan setelah seluruh proses pengelasan selesai dilaksanakan dan kapal telah jadi secara keseluruhan. Pengecatan dilakukan di bawah garis air menggunakan 3 jenis lapisan cat yaitu primer, *sealer*, dan *antifouling* dan di atas garis air menggunakan 2 jenis lapisan cat yaitu primer dan *top coat*. Lapisan primer adalah lapisan pertama pada proses pengecatan yang berfungsi untuk menutup pori-pori material dan sekaligus memberikan daya lekat dengan lapisan berikutnya. Lapisan *sealer* adalah lapisan penghubung yang berfungsi memberi daya rekat lebih antar lapisan cat lainnya. Lapisan *antifouling* adalah lapisan terakhir pada pengecatan bagian kapal bawah air yang berfungsi sebagai pelindung badan kapal dari biota laut yang menempel ketika kapal sedang beroperasi. Pada bagian di atas garis air lapisan primer akan dilapisi oleh lapisan *topcoat* sebagai lapisan *finishing* yang memiliki fungsi utama sebagai lapisan yang memberikan estetika pada kapal.

E. Analisis Teknis Perbandingan Docking Repair Kapal Penumpang

Pekerjaan *docking repair* yang ditinjau pada penelitian ini dimulai dari pengedokan, pembersihan badan kapal, pergantian pelat, dan pengecatan badan kapal. Pada pengedokan dan pembersihan badan kapal tidak terdapat perbedaan metode dan kebutuhan. Pembersihan badan kapal terdiri dari *scrapping*, *waterjetting*, dan *sandblasting*. *Scrapping* hanya dilakukan pada bagian kapal di bawah garis air, sedangkan *waterjetting* dan *sandblasting* dilakukan pada seluruh permukaan pelat kulit kapal.

Pada Tabel 6 dapat dilihat perbedaan metode dan kebutuhan pada *docking repair* terdapat pada pergantian pelat dan pengecatan badan kapal. Pada pergantian pelat, metode pengelasan yang digunakan pada kapal penumpang aluminium adalah TIG sehingga kebutuhan pengelasannya juga berbeda dengan kapal penumpang baja galvanis yang mana metode pengelasannya adalah SMAW. Kemudian pada pengecatan badan kapal juga terdapat perbedaan pada kebutuhan cat, dimana pada kapal penumpang baja galvanis membutuhkan cat galvanis sebagai pelapis pertama pelat untuk perbaikan pada *steel hot dip galvanized*. Pengecatan badan

kapal dilakukan rutin setiap tahun kapal *docking* pada seluruh permukaan pelat kulit kapal.

Salah satu kelebihan yang dimiliki material baja galvanis adalah peningkatan ketahanan korosi pada material induk baja meskipun nilai laju korosi material baja galvanis yang didapatkan pada pengujian laju korosi masih lebih rendah dari material aluminium. Nilai laju korosi kedua material masih tergolong sangat baik. Adapun salah satu kekurangan dari material aluminium adalah rawan terjadinya korosi galvanik apabila kapal aluminium sedang sandar atau parkir berdekatan dengan kapal baja. Hal ini disebabkan karena aluminium memiliki nilai potensial elektrovolt yang jauh lebih rendah dibandingkan dengan baja sehingga mengakibatkan laju korosi bertambah dan memicu terjadinya korosi galvanik pada permukaan lambung kapal aluminium. [10]. Pada kapal dengan material baja galvanis apabila disandarkan atau parkir berdekatan dengan kapal baja, tidak terdapat perbedaan potensial elektrovolt yang terjadi dikarenakan material kapal yang digunakan yang sama.

F. Analisis Ekonomis

Perhitungan biaya pembangunan kapal penumpang ditinjau berdasarkan 3 faktor yaitu biaya material, biaya tenaga kerja, dan biaya habis pakai [1]. Pada *docking repair* kapal penumpang yang dilakukan setiap tahunnya, perhitungan biaya dilakukan dengan acuan Pedoman Standar dan Tarif Pemeliharaan dan Perbaikan IPERINDO [11]. Biaya total pembangunan dan reparasi kapal penumpang baja galvanis dan aluminium diakumulasikan dan dibandingkan selama 8 periode kelas kapal yaitu sampai dengan tahun ke-40. Perbandingan biaya total pembangunan dan reparasi kapal penumpang baja galvanis dan aluminium dapat dilihat pada Gambar 6, Gambar 7, dan Gambar 8.

Pada tahun ke-0 terdapat perbedaan biaya yang signifikan. Tahun ke-0 adalah tahun kapal telah selesai dibangun. Perbedaan biaya pembangunan disebabkan oleh mahalannya harga aluminium serta kebutuhan pengelasannya. Pada tahun pertama sampai tahun ke-20 tidak terdapat perbedaan biaya yang signifikan. Perbedaan biaya *docking repair* disebabkan oleh perbedaan kebutuhan cat kapal. Pada tahun 21 – 40 terdapat beberapa perbedaan yang cukup signifikan. Perbedaan biaya terdapat pada tahun dimana masing-masing kapal penumpang melakukan pergantian pelat. Pada tahun ke-21 sampai tahun ke-40 kapal penumpang baja galvanis melakukan pergantian pelat sebanyak 3 kali dan kapal penumpang aluminium juga melakukan pergantian pelat sebanyak 3 kali. Puncak tertinggi biaya reparasi kapal penumpang baja galvanis terjadi pada tahun ke-24 dan pada kapal penumpang aluminium terjadi pada tahun ke-38. Puncak tertinggi biaya reparasi disebabkan oleh besarnya beban kerja pada pergantian pelat kapal.

Pada Tabel 7 didapatkan akumulasi biaya total pembangunan dan reparasi kapal penumpang baja galvanis adalah sebesar Rp9.244.130.509,24 sedangkan pada kapal penumpang aluminium adalah sebesar Rp11.799.608.666,56. Perbedaan pada biaya total akumulasi memiliki persentase sebesar 21,66% dengan selisih biaya sebesar Rp2.555.478.157,32. Perbedaan biaya total disebabkan oleh mahalannya harga aluminium serta biaya produksi dan perbaikannya. Penggunaan baja galvanis sebagai material

kapal memiliki biaya yang lebih ekonomis dibandingkan aluminium.

VI. KESIMPULAN

Setelah dilakukan perhitungan dan analisis maka kesimpulan dari penelitian ini adalah sebagai berikut; (1) Rata-rata nilai laju korosi korosi yang diperoleh dari hasil pengujian laju korosi metode sel tiga elektroda adalah sebesar 0,03726 mmpy pada Material Baja ASTM A36 Galvanis dan 0,02592 mmpy pada Material Aluminium 5083. Material Baja ASTM A36 Galvanis memiliki rata-rata nilai laju korosi yang mendekati rata-rata nilai laju korosi Material Aluminium 5083 meskipun rata-rata nilai laju korosi yang didapatkan lebih rendah. Rata-rata nilai laju korosi baja galvanis memenuhi kategori *excellent* (0,02 – 0,1 mmpy) pada standar laju korosi yang diijinkan untuk sebuah material pelat kapal; (2) Berdasarkan perhitungan estimasi umur material pelat kapal dari nilai laju korosi material uji yang telah diperoleh dan *safety factor* pengurangan ketebalan pelat, umur material baja galvanis adalah 32 tahun pada pelat lunas dengan tebal pelat sebesar 12 mm, 21 tahun pada pelat alas dan bilga dengan tebal pelat sebesar 8 mm, dan 24 tahun pada pelat sisi dengan tebal pelat sebesar 6 mm. Umur material aluminium adalah 41 tahun pada pelat lunas dengan tebal pelat sebesar 8 mm, 31 tahun pada pelat alas dan bilga dengan tebal pelat sebesar 6 mm, dan 38 tahun pada pelat sisi dengan tebal pelat sebesar 5 mm. Material baja galvanis lebih singkat jika dibandingkan dengan material aluminium, namun proses galvanisasi dan lapisan galvanis yang melindungi material baja terbukti dapat memperpanjang umur material tersebut; (3) Akumulasi total biaya pembangunan dan reparasi kapal penumpang baja galvanis adalah sebesar Rp9.244.130.509,24 sedangkan pada kapal

penumpang aluminium adalah sebesar Rp11.799.608.666,56. Perbedaan pada biaya total akumulasi memiliki persentase sebesar 21,66% dengan selisih biaya sebesar Rp2.555.478.157,32. Perbedaan biaya total disebabkan oleh mahalnya harga aluminium serta biaya produksi dan perbaikannya. Penggunaan baja galvanis sebagai material kapal memiliki biaya yang lebih ekonomis dibandingkan aluminium.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. B. Bimantara and H. Supomo, "Analisa Teknis dan Ekonomis Penggunaan Steel Hot Dip Galvanized untuk Pembangunan Kapal Patroli," Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, 2019.
- [2] P. W. Kusumah, S. R. W. Pribadi, and I. Baihaqi, "Analisa Kecepatan Laju Korosi Pada Pelat Kapal Astm a36 Pasca Terbakar Dengan Pendekatan Eksperimen," Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, 2017.
- [3] M. G. Fontana, *Corrosion Engineering*. New York: McGraw-Hill Book Company, Inc, 1987.
- [4] ASTM, "Standard Practice for Calculation of Corrosion Rates and Related Information," *ASTM G102-89*, vol. 89, no. Reapproved, pp. 1–7, 1999, doi: 10.1520/G0102-89R10.
- [5] Y. C. Surbakti, S. Purwono, and H. Prastowo, "Analisa Laju Korosi pada Pipa Baja Karbon dan Pipa Galvanis dengan Metode Kehilangan Berat," Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, 2017.
- [6] A. International, *Standard Reference Test Method for Making Potentiostatic and Potentiodynamic Anodic*, *ASTM G5-94*, Vol. 94. West Conshohocken: ASTM International, 2004.
- [7] F. C. Porter, *Corrosion Resistance of Zinc and Zinc Alloys*. New York: CRC Press Taylor & Francis Group, 1994.
- [8] B. K. Indonesia, *Rules for Hull*, Vol II. Jakarta: Biro Klasifikasi Indonesia, 2006.
- [9] B. K. Indonesia, "Rules for Classification And Construction Consolidated Edition 2021," vol. II, 2021.
- [10] H. F. H. Rahman, H. Supomo, and I. Baihaqi, "Studi Laju Korosi Kapal Aluminium Akibat Proses Galvanik Dengan Kapal Baja Di Lingkungan Air Laut Dengan Pendekatan Pemodelan Eksperimen," Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, 2019.
- [11] IPERINDO, "Pedoman Standard Tarip Pemeliharaan Dan Perbaikan Kapal." IPERINDO, Jakarta, 2019.