

Studi Perbandingan Kinerja Anoda Korban Paduan Aluminium dengan Paduan Seng dalam Lingkungan Air Laut

Juliana Anggono, Soejono Tjitro

Dosen Fakultas Teknik, Jurusan Teknik Mesin – Universitas Kristen Petra

Victor Rizal Palapessy

Alumnus Fakultas Teknik, Jurusan Teknik Mesin – Universitas Kristen Petra

Abstrak

Terdapat dua jenis paduan anoda korban yang digunakan untuk memproteksi struktur baja karbon di lingkungan air laut, yaitu paduan aluminium dan paduan seng. Penelitian ini bertujuan mempelajari kinerja dua jenis anoda korban tersebut dengan melakukan uji korosi galvanik dalam lingkungan pengganti air laut. Kinerja yang diukur adalah potensial proteksi, arus galvanik, kapasitas anoda, efisiensi anoda, laju konsumsi anoda, waktu induksi, dan pola korosi anoda.

Hasil penelitian menunjukkan anoda korban paduan aluminium menghasilkan arus galvanik dan kapasitas anoda yang lebih besar daripada paduan seng. Demikian pula efisiensi paduan aluminium lebih baik dan laju konsumsinya lebih rendah daripada paduan seng. Dengan foto makro tampak bahwa pola korosi yang terjadi pada kedua jenis paduan menunjukkan anoda korban tidak terkorosi secara merata, melainkan terjadinya korosi pitting pada permukaannya.

Kata kunci : proteksi katodik, anoda korban, lingkungan pengganti air laut.

Abstract

There are two kinds of sacrificial anodes available to protect steel structure in the marine environment; they are zinc and aluminum alloy. This research studies their performance by conducting galvanic corrosion test in the substitute ocean water. The performance evaluated covers potential of protection, galvanic current, capacity and efficiency, the rate of anode consumption, the induction time, and their corrosion form.

The result shows that aluminum alloy has galvanic current and anode capacity higher than the zinc alloy. It is also found that this alloy gives the higher efficiency and shows the lower anode consumption rate than the zinc alloy. From the macro photographs, it is found that these two alloys corrode locally by pitting formation.

Keywords : cathodic protection, sacrificial anode, substitute ocean water.

1. Pendahuluan

1.1 Latar Belakang

Wilayah Indonesia yang sebagian besar berupa lautan memiliki banyak sekali struktur atau konstruksi dari bahan logam, terutama baja karbon. Konstruksi tersebut selalu berhubungan dengan air laut yang merupakan elektrolit yang korosif. Hal ini mengandung konsekuensi terjadinya serangan korosi terhadap struktur-struktur tersebut, yang dapat menimbulkan kerugian yang besar baik dari segi teknis maupun ekonomis.

Berbagai metode pencegahan korosi di lingkungan air laut terus dikembangkan. Salah satunya adalah pemakaian anoda korban yang bekerja berdasarkan prinsip proteksi katodik. Permukaan struktur logam di air laut diubah menjadi bersifat katodik melalui pemberian arus yang berasal dari anoda korban tersebut. Jenis anoda korban yang sesuai dipakai di lingkungan air laut adalah anoda korban paduan seng dan paduan aluminium. Tersedianya dua jenis paduan ini memberikan pilihan bagi para pemakai untuk menentukan jenis paduan yang sesuai dengan kebutuhannya. Dasar pemilihan ini seharusnya atas pertimbangan kinerja terbaiknya. Pada penelitian ini akan dilakukan penilaian kinerja kedua paduan tersebut yang meliputi potensial proteksi dan arus galvanik yang dihasilkan, kapasitas,

Catatan : Diskusi untuk makalah ini diterima sebelum tanggal 1 Januari 2000. Diskusi yang layak muat akan diterbitkan pada Jurnal Teknik Mesin Volume 2 Nomor 1 April 2000.

efisiensi, laju konsumsi, waktu induksi, serta pola korosinya. Faktor-faktor lingkungan dan desain, seperti konsentrasi garam terlarut dan variasi luas terproteksi juga dipelajari pengaruhnya terhadap kinerja paduan tersebut.

1.2 Metodologi Penelitian

- Persiapan spesimen anoda korban dan baja karbon.
 - anoda korban : berbentuk *plate* jenis paduan seng tipe ZAP S-3 Zn dan paduan aluminium tipe ZAP S-3 Al dengan ukuran 22x15x10 mm. Tabel 1 menunjukkan komposisi kimia kedua jenis anoda korban tersebut.

Tabel 1. Komposisi Kimia Anoda Korban Paduan Seng dan Paduan Aluminium

Anoda Paduan Seng		Anoda Paduan Aluminium	
Unsur	Komposisi (% berat)	Unsur	Komposisi (% berat)
Kadmium	0.150	Tembaga	0.006
Tembaga	0.005	Besi	0.012
Besi	0.005	Seng	0.150
Silikon	0.125	Silikon	5.000
Aluminium	0.500	Titanium	0.040
Timbal	0.006	Indium	0.030
Seng	Balanced	Aluminium	Balanced

- baja karbon : berbentuk *sheet* tipe AISI SAE 1010 berukuran 31x20x2 mm dengan luasan yang diproteksi bervariasi 1:1, 2:1, 3:1 terhadap luasan anoda. Pada tiap spesimen diberi lubang berdiameter 1,2 mm, kemudian dilakukan pembersihan berdasarkan ASTM G1-90, "Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens".

- Mempersiapkan lingkungan pengganti air laut

Lingkungan air laut divariasikan konsentrasi garamnya dengan salinitas 33‰, 35‰, dan 37‰, sesuai ASTM D1141 - 90, "Standard Specification for Substitute Ocean Water". Tabel 2 menunjukkan kandungan garam terlarut dalam larutan pengganti air laut.

Tabel 2. Kandungan garam terlarut (g/l) dalam larutan pengganti air laut

Salinitas (‰)	NaCl	MgCl ₂	Na ₂ SO ₄	CaCl ₂	KCl	NaHCO ₃	KBr	H ₃ BO ₃	SrCl ₂	NaF
33	23.13	4.900	4.090	1.090	0.660	0.201	0.101	0.027	0.024	0.003
35	24.53	5.200	4.090	1.160	0.695	0.201	0.101	0.027	0.025	0.003
37	25.93	5.497	4.090	1.230	0.735	0.201	0.101	0.027	0.026	0.003

- Melakukan pengujian korosi.

Pengujian korosi dilakukan dengan metode uji celup pasangan anoda dan katoda yang dihubungkan dengan kabel tembaga, mengacu pada standar ASTM G71 - 81, "Standard Guide for Conducting and Evaluating Galvanic Corrosion Tests in Electrolytes". Volume elektrolit yang digunakan sesuai standar tersebut adalah 40 cm³ elektrolit untuk tiap cm² luas tercelup. Kehilangan berat spesimen dipakai menjadi perhitungan laju korosinya.

- Perolehan data

Data-data yang diukur dan dicatat selama penelitian adalah

- potensial setengah sel anoda dan katoda. Pengukuran dilakukan dengan menghubungkan anoda atau katoda dengan potensial standar Ag/AgCl di dalam tiap lingkungan air laut. Voltmeter yang digunakan memiliki jangkauan pengukuran 0,0 volt sampai dengan 1,0 volt dan 1,0 volt sampai dengan 2,0 volt.
- potensial proteksi katoda dan arus galvanik. Pengukuran dilakukan selama satu jam pertama setelah pencelupan dan selanjutnya dilakukan pencatatan data setiap 24 jam. Potensial proteksi diukur dengan peralatan yang sama dengan pengukuran potensial setengah sel, sedangkan arus galvanik diukur dengan amperemeter digital dengan jangkauan pengukuran 0,0-1,0 mA.
- pengurangan berat anoda dan katoda. Kehilangan berat spesimen diperoleh setelah pencelupan selama 10 hari (240 jam) dengan timbangan analitik berketelitian 0.0001 g dan dipakai menjadi perhitungan laju korosinya.
- waktu induksi anoda. Pengukuran waktu induksi dikerjakan dengan stop watch dan dilakukan bersama-sama dengan pengukuran potensial proteksi dan arus galvanik. Perubahan potensial terhadap waktu dicatat untuk mengetahui waktu induksi terbaik.
- pengamatan makro pola korosi anoda. Pengamatan pola korosi anoda melalui foto makro spesimen setelah uji celup.

2. Landasan Teori

2.1 Lingkungan Air Laut

Cara yang paling sering digunakan untuk mengukur kandungan unsur-unsur dalam air laut adalah dengan menentukan salinitasnya. ⁽¹⁾

Salinitas (S) didefinisikan sebagai berat keseluruhan dalam gram garam-garam non organik dalam 1 kg air laut bila seluruh unsur-unsur bromida dan iodida digantikan dengan jumlah yang sesuai dari unsur-unsur klorida dan semua unsur karbonat digantikan dengan unsur-unsur oksida dalam jumlah yang sesuai. Salinitas air laut dinyatakan dengan satuan per seribu (‰). Secara horisontal maupun vertikal salinitas air laut bervariasi dari 32,5 ‰ sampai dengan 37 ‰. ⁽¹⁾

Secara umum laju korosi di lingkungan air laut sangat tinggi. Hal ini disebabkan oleh faktor-faktor berikut :

- Tingginya konsentrasi garam-garam terlarut
Konsentrasi garam-garam terlarut memegang peranan penting disamping faktor-faktor lain yang juga menjadi penunjang kecepatan korosi ini. Konsentrasi ion atau molekul tersebut dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Konsentrasi Ion atau Molekul pada Air Laut dengan Salinitas 35 ‰ ⁽¹⁾

Density of seawater 1.023 g/cm³ at 25 °C (75 °F)

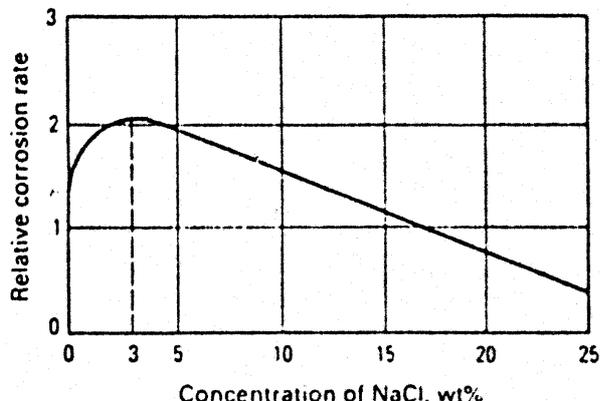
Ion or molecule	Concentration	
	m mol/kg of seawater	g/kg of seawater
Na ⁺	468.5	10.77
K ⁺	10.21	0.399
Mg ²⁺	53.08	1.290
Ca ²⁺	10.28	0.412
Sr ²⁺	0.09	0.008
Cl ⁻	545.9	19.354
Br ⁻	0.84	0.067
F ⁻	0.07	0.0013
HCO ₃ ⁻	2.30	0.140
SO ₄ ²⁻	28.23	2.712
B(OH) ₃	0.416	0.0257

Source: Ref. 3

Meningkatnya kandungan NaCl dalam air laut akan meningkatkan laju korosi baja karbon. Hal ini terlihat pada Gambar 1, di mana laju korosi besi akan meningkat dengan kenaikan kandungan NaCl sampai dengan 3%.

- Perubahan temperatur air laut
Bilamana semua faktor penunjang dalam proses korosi stabil, maka temperatur mempunyai pengaruh yang linier. Dengan naiknya temperatur, kecepatan korosi akan

naik pula. Misalnya kecepatan korosi baja paduan rendah akan naik dua kali dengan kenaikan temperatur setiap 30°C.



Gambar 1. Pengaruh Kandungan NaCl terhadap Laju Korosi Besi ⁽¹⁾

- Kandungan oksigen terlarut
Kecepatan korosi logam seperti besi dan baja dalam larutan yang teraerasi seperti air laut pada temperatur konstan merupakan fungsi linier konsentrasi oksigen terlarut. Untuk semua sistem paduan, umumnya kondisi yang menyebabkan korosi adalah perbedaan dalam kelarutan oksigen. Permukaan logam dengan konsentrasi oksigen terendah menjadi anoda dan akan menyebabkan korosi lokal. Efek ini juga dapat menyebabkan terjadinya korosi lubang pada baja karbon dan baja paduan rendah.

- Keasaman (pH) air laut
Air laut umumnya mempunyai pH lebih besar dari 8 pada permukaan. Pada pH ini, 93% dari total karbon anorganik ada dalam bentuk HCO₃⁻, 6% sebagai CO₃²⁻, dan 1% sebagai CO₂.

Konsentrasi ion karbonat relatif sangat tinggi pada permukaan dan permukaan air hampir selalu jenuh dengan kalsium karbonat. Hal ini menyebabkan terjadinya pengendapan jenuh *calcareous scale* pada permukaan logam. Konsentrasi CO₂ dan O₂ mempunyai hubungan yang erat dengan pH air laut dalam proses fotosintesa dan oksidasi biokimia dengan reaksi sebagai berikut :



Reaksi dari kiri ke kanan, oksigen terlarut dipakai dan CO₂ dihasilkan. Hasil CO₂ akan membuat air lebih asam yang mana hal ini akan menurunkan pH dan juga menurunkan pH kejenuhan terhadap karbonat. Walaupun pH

mempunyai pengaruh yang sangat kecil terhadap kecepatan korosi air laut, tetapi dalam hubungannya dengan deposit *calcareous* mempunyai pengaruh yang harus dipertimbangkan. Pengendapan kerak umumnya terjadi pada pH lebih tinggi, di mana ion OH dihasilkan selama reduksi oksigen terlarut.

- Organisma biologi

Air laut merupakan media yang aktif bagi sejumlah mikro organisma. Mikro organisma ini bersama-sama dengan permukaan logam dalam air laut akan membentuk biofouling menyebabkan terjadinya korosi merata atau lokal. Larutnya beberapa partikel padat pada air laut akan menimbulkan proses dinamik yang terus menerus, dimulai dari adsorpsi material organik terlarut, mati dan terjadi pembentukan lapisan film yang disebabkan oleh ganggang dan bakteri yang mana akan menyebabkan terjadinya tumbuhan hidup. Terbentuknya lapisan film ini hanya dalam waktu relatif singkat, yaitu dua jam dari saat logam dicelupkan ke dalam air laut. Lapisan ini akan mengubah sifat kimia pada permukaan logam dalam elektrolit.

2.2 Proteksi Katodik

Proteksi katodik adalah suatu cara perlindungan korosi secara elektrokimia di mana reaksi oksidasi pada sel galvanik dikonsentrasikan pada anoda dan menghilangkan korosi pada katoda.

Struktur yang akan dilindungi secara listrik dibuat negatif sehingga bertindak sebagai kaatoda. Elektroda yang lain secara listrik dibuat positif dan bertindak sebagai anoda hingga tercipta suatu sistem rangkaian arus listrik searah tertutup sebagaimana halnya bila sepotong logam terkorosi. Sistem ini membutuhkan anoda, katoda, aliran listrik di antara keduanya dan adanya elektrolit. Dengan kata lain, penerapannya hanya mungkin bila struktur yang diproteksi dan anoda berada pada hubungan secara langsung baik secara elektronik maupun elektrolit. Proteksi katodik dapat diterapkan dengan dua cara, yaitu :

a. Cara arus tanding

Keuntungan :

- Jika tersedia cukup tegangan listrik maka arus proteksi dapat ditingkatkan sesuai yang diinginkan, selama material anoda tetap berfungsi.
- Tegangan tidak perlu besar walaupun ada kehilangan karena tahanan, karena hal

ini dapat diatur dengan meningkatkan arus.

Kerugian :

- Membutuhkan pembangkit arus DC yang tersedia cukup dan kontinu.
- Harus selalu memperhatikan arah arus yang diberikan agar tidak terbalik
- Membutuhkan pengawasan tenaga ahli
- Anodanya harus tersekat dan tahan air jika pencelupannya memungkinkan terjadinya korosi pada bagian sekatnya.
- Sistem arus tanding dengan anoda dari logam-logam inert harus ada pelindung arus

b. Cara anoda korban

Keuntungan :

- Dapat digunakan walaupun tidak ada sumber listrik dari luar.
- Tidak mengeluarkan tambahan biaya untuk pemakaian alat-alat listrik
- Sangat mudah pengawasannya sehingga tidak dibutuhkan orang yang benar-benar ahli
- Arus tidak mungkin mengalir pada arah yang salah sehingga proteksi benar-benar terjadi
- Pemasangan anoda korban sederhana

Kerugian :

- Arus yang tersedia bergantung pada luasan anoda, tentunya bersifat lebih konsumtif bila struktur yang diproteksi sangat besar.
- Bila ada sumber arus DC maka energi yang dibutuhkan dapat tersedia dengan biaya lebih murah.

2.3 Proteksi Katodik Anoda Korban

Beberapa kriteria dalam proteksi katodik baja karbon dengan cara anoda korban adalah⁽¹⁾:

1. Potensial negatif (katoda) sekurang-kurangnya $-0,800$ volt diukur antara permukaan struktur dengan elektroda Ag/AgCl yang dihubungkan di dalam air laut.
2. Minimum negatif penyimpangan potensial (katoda) $0,3$ volt yang dihasilkan dari arus proteksi.
3. Minimum negatif penyimpangan potensial (katoda) $0,1$ volt yang diukur dengan adanya gangguan arus dan pengukuran perubahan potensial.

Penilaian kinerja anoda korban dalam memproteksi baja karbon meliputi :

1. Kapasitas anoda, yaitu jumlah arus yang didapat untuk satu satuan waktu yang dihasilkan dari berat anoda tertentu.

Perhitungan kapasitas nyata anoda korban menggunakan persamaan :

$$\text{Kapasitas} = \frac{i \cdot t}{w} \quad (2)$$

dimana:

i = arus galvanik (ampere).

t = waktu pencelupan (jam).

w = kehilangan berat anoda (kg).

2. Laju konsumsi anoda, menunjukkan rata-rata berkurangnya berat anoda karena memproteksi katoda.

Perhitungan laju konsumsi anoda korban menggunakan persamaan :

$$\text{Laju konsumsi} = \frac{w}{i \cdot t} \quad (3)$$

3. Efisiensi anoda, menunjukkan persentase kapasitas anoda teoritis yang dicapai dalam prakteknya.

Perhitungan efisiensi anoda karbon menggunakan persamaan :

$$\text{Efisiensi} = \frac{\text{kapasitas nyata}}{\text{kapasitas teoritis}} \quad (4)$$

4. Waktu induksi anoda, yaitu waktu yang dibutuhkan anoda untuk menghasilkan potensial katoda yang stabil pada nilai potensial proteksi. Merupakan waktu untuk mempolarisasi-negatifkan logam yang dilindungi menjadi katodik.

5. Potensial proteksi, yaitu potensial yang disuguhkan sewaktu memberikan informasi mengenai perilaku perlindungan anoda terhadap katoda dalam suatu kurun waktu.

6. Pola korosi anoda. Anoda harus mempunyai kecenderungan terkorosi sendiri (*parasitic corrosion*) yang kecil, yang berarti anoda harus mempunyai pola korosi yang merata (*uniform corrosion*).

Perhitungan laju korosi anoda dan katoda menggunakan persamaan :

$$\text{LajuKorosi} = \frac{K \times W}{A \times T \times D} \quad (5)$$

dimana :

K = konstanta = $8,76 \times 10^4$ untuk satuan laju korosi mm/y.

W = kehilangan berat (gram).

A = luas spesimen yang tercelup (cm^2).

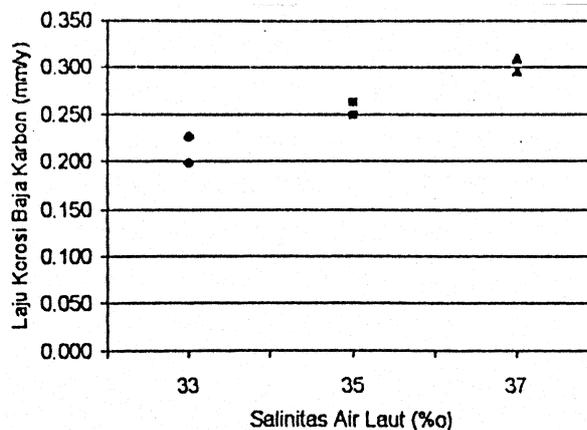
T = waktu pencelupan (jam).

D = densitas (gram/cm^3), untuk baja karbon $D = 7,86 \text{ gr/cm}^3$; paduan Zn, $D = 7,13 \text{ gr/cm}^3$ dan paduan Al, $D = 2,7 \text{ gr/cm}^3$.

3. Hasil Penelitian

3.1 Korosi Baja Karbon

Hasil uji celup terhadap baja karbon tanpa proteksi menunjukkan adanya kehilangan berat seperti tercantum pada Gambar 2.



Gambar 2. Grafik Laju Korosi Baja Karbon terhadap Salinitas

3.2 Potensial Setengah Sel Anoda Dan Katoda

Pada Tabel 4 diberikan data pengukuran potensial setengah sel anoda dan katoda yang dipakai pada penelitian.

Tabel 4. Potensial Setengah Sel Elektroda Terhadap Ag/AgCl

SALINITAS (%)	ELEKTRODA	POTENSIAL SETENGAH SEL (volt)	NILAI TENGAH POT. SETENGAH SEL (volt)
33	Fe	-0.3740 -- -0.6150	-0.4945
	Zn	-0.9890 -- -1.0355	-1.0123
	Al	-0.9250 -- -0.9310	-0.9280
35	Fe	-0.5850 -- -0.6205	-0.5938
	Zn	-0.9525 -- -1.0550	-1.0038
	Al	-0.9285 -- -0.9350	-0.9318
37	Fe	-0.4025 -- -0.6880	-0.5453
	Zn	-1.0335 -- -1.0720	-1.0528
	Al	-0.9310 -- -0.9468	-0.9389

3.3 Uji Celup Anoda Dan Katoda

Pengujian celup pasangan anoda dan katoda selama sepuluh hari menunjukkan data-data seperti ditunjukkan pada Tabel 5 dan 6.

Tabel 5. Hasil Uji Celup Pasangan Anoda Zn dan Katoda Fe

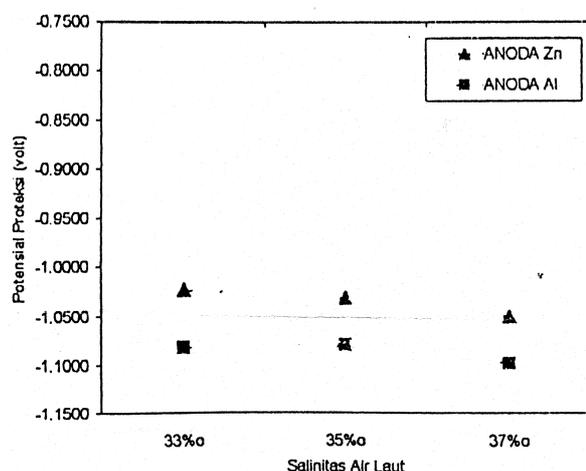
SALINITAS (%)	RATIO LUAS A : K	BERAT AWAL (gr)		BERAT AKHIR (gr)		LAJU KOROSI ANODA (mm/y)
		ANODA	KATODA	ANODA	KATODA	
33	1 : 1	18.3728	6.5929	18.3443	6.5780	0.1122
	1 : 2	18.4253	12.7093	18.3692	12.6775	0.1146
	1 : 3	18.3466	19.0685	18.3155	19.0207	0.1225
35	1 : 1	18.3517	6.5903	18.3277	6.5723	0.1141
	1 : 2	18.3821	12.7155	18.3514	12.6831	0.1209
	1 : 3	18.3359	19.0535	18.3057	19.0033	0.1189
37	1 : 1	18.3323	6.5895	18.3055	6.5703	0.1055
	1 : 2	18.3402	12.7090	18.3125	12.6730	0.1091
	1 : 3	18.3219	19.0620	18.2934	19.0030	0.1122

Tabel 6. Hasil Uji Celup Pasangan Anoda Al dan Katoda Fe

SALINITAS (%)	RATIO LUAS A : K	BERAT AWAL (gr)		BERAT AKHIR (gr)		LAJU KOROSI ANODA (mm/y)
		ANODA	KATODA	ANODA	KATODA	
33	1 : 1	18.3728	6.5929	18.3443	6.5780	0.1122
	1 : 2	18.4253	12.7093	18.3692	12.6775	0.1146
	1 : 3	18.3466	19.0685	18.3155	19.0207	0.1225
35	1 : 1	18.3517	6.5903	18.3277	6.5723	0.1141
	1 : 2	18.3821	12.7155	18.3514	12.6831	0.1209
	1 : 3	18.3359	19.0535	18.3057	19.0033	0.1189
37	1 : 1	18.3323	6.5895	18.3055	6.5703	0.1055
	1 : 2	18.3402	12.7090	18.3125	12.6730	0.1091
	1 : 3	18.3219	19.0620	18.2934	19.0030	0.1122

3.4 Potensial Proteksi

Pengukuran potensial proteksi terhadap pasangan anoda dan katoda yang tercelup selama sepuluh hari memberikan hasil rata-rata besarnya potensial proteksi pada Gambar 3.



Gambar 3. Grafik Perubahan Potensial terhadap Salinitas

3.5 Arus Galvanik

Pengukuran arus galvanik dilakukan bersama-sama dengan pengukuran potensial proteksi selama sepuluh hari. Hasilnya ditunjukkan pada Tabel 7 dan Tabel 8.

Tabel 7. Arus Galvanik (mA) Anoda Korban Zn

WAKTU (jam)	SALINITAS 33‰			SALINITAS 35‰			SALINITAS 37‰		
	1:1	1:2	1:3	1:1	1:2	1:3	1:1	1:2	1:3
24	0.0720	0.0719	0.0730	0.0730	0.0725	0.0730	0.0760	0.0764	0.0765
48	0.0722	0.0720	0.0725	0.0733	0.0733	0.0760	0.0753	0.0761	0.0750
72	0.0715	0.0722	0.0726	0.0735	0.0730	0.0750	0.0749	0.0755	0.0755
96	0.0712	0.0715	0.0732	0.0733	0.0740	0.0733	0.0748	0.0754	0.0758
120	0.0712	0.0713	0.0730	0.0731	0.0744	0.0735	0.0746	0.0751	0.0755
144	0.0709	0.0716	0.0730	0.0733	0.0741	0.0740	0.0746	0.0752	0.0755
168	0.0705	0.0717	0.0732	0.0732	0.0738	0.0748	0.0743	0.0751	0.0752
192	0.0712	0.0717	0.0727	0.0732	0.0740	0.0750	0.0743	0.0751	0.0756
216	0.0710	0.0719	0.0728	0.0733	0.0738	0.0742	0.0745	0.0752	0.0758
240	0.0710	0.0715	0.0730	0.0733	0.0743	0.0742	0.0746	0.0752	0.0762
RATA-RATA	0.0713	0.0717	0.0729	0.0733	0.0737	0.0743	0.0748	0.0754	0.0757

Tabel 8. Arus Galvanik (mA) Anoda Korban Al

WAKTU (jam)	SALINITAS 33‰			SALINITAS 35‰			SALINITAS 37‰		
	1:1	1:2	1:3	1:1	1:2	1:3	1:1	1:2	1:3
24	0.3102	0.3222	0.3290	0.3225	0.3212	0.3358	0.3170	0.3473	0.3488
48	0.3130	0.3294	0.3315	0.3257	0.3261	0.3350	0.3250	0.3485	0.3515
72	0.3190	0.3312	0.3302	0.3262	0.3285	0.3375	0.3272	0.3498	0.3670
96	0.3250	0.3305	0.3310	0.3222	0.3320	0.3591	0.3402	0.3512	0.3700
120	0.3218	0.3388	0.3380	0.3290	0.3298	0.3570	0.3455	0.3506	0.3612
144	0.3268	0.3360	0.3390	0.3327	0.3351	0.3483	0.3500	0.3598	0.3640
168	0.3270	0.3392	0.3485	0.3338	0.3354	0.3477	0.3518	0.3642	0.3660
192	0.3280	0.3380	0.3584	0.3352	0.3373	0.3472	0.3615	0.3655	0.3672
216	0.3285	0.3376	0.3587	0.3352	0.3375	0.3472	0.3657	0.3663	0.3696
240	0.3288	0.3377	0.3597	0.3355	0.3372	0.3473	0.3661	0.3660	0.3678
RATA-RATA	0.3228	0.3341	0.3424	0.3298	0.3320	0.3462	0.3450	0.3569	0.3633

3.6 Kapasitas, Efisiensi Dan Laju Konsumsi Anoda

Hasil perhitungan kapasitas, efisiensi dan laju konsumsi anoda korban paduan seng ditunjukkan pada Tabel 9 dan untuk paduan aluminium ditunjukkan pada Tabel 10.

Tabel 9. Kapasitas, Laju Konsumsi dan Efisiensi Anoda Korban Zn

SALINITAS (%)	RATIO LUAS A : K	PENGURANGAN BERAT (gram)	ARUS (mA)	KAPASITAS (A.jam / kg)	EFISIENSI (%)	KONSUMSI (Kg / A.Thn)
33	1 : 1	0.0285	0.0713	600.4211	73.2489	14.5898
	1 : 2	0.0291	0.0717	591.3402	72.1411	14.8138
	1 : 3	0.0311	0.0729	562.5723	68.6315	15.5713
	Rata-Rata :	0.0296	0.0720	584.7779	71.3405	14.9916
35	1 : 1	0.0290	0.0733	606.6207	74.0052	14.4407
	1 : 2	0.0307	0.0737	576.1564	70.2887	15.2042
	1 : 3	0.0302	0.0743	590.4636	72.0341	14.8358
	Rata-Rata :	0.0300	0.0738	591.0802	72.1093	14.8269
37	1 : 1	0.0268	0.0748	669.8507	81.7190	13.0775
	1 : 2	0.0277	0.0754	653.2852	79.6981	13.4092
	1 : 3	0.0285	0.0757	637.4737	77.7691	13.7417
	Rata-Rata :	0.0277	0.0753	653.5365	79.7287	13.4095

Tabel 10. Kapasitas, Laju Konsumsi dan Efisiensi Anoda Korban Al

SALINITAS (%)	RATIO LUAS A : K	PENGURANGAN BERAT (gram)	ARUS (mA)	KAPASITAS (A.jam / kg)	EFISIENSI (%)	KONSUMSI (Kg / A.Thn)
33	1 : 1	0.0341	0.3228	2271.9062	76.2794	3.8558
	1 : 2	0.0338	0.3341	2372.3077	79.6504	3.6926
	1 : 3	0.0351	0.3424	2341.1966	78.6058	3.7417
	Rata-Rata :	0.0343	0.3331	2328.4701	78.1786	3.7634
35	1 : 1	0.0352	0.3298	2248.6364	75.4981	3.8957
	1 : 2	0.0350	0.3320	2276.5714	76.4361	3.8479
	1 : 3	0.0356	0.3462	2333.9326	78.3620	3.7533
	Rata-Rata :	0.0353	0.3360	2286.3801	76.7654	3.8323
37	1 : 1	0.0350	0.3450	2365.7143	79.4290	3.7029
	1 : 2	0.0363	0.3569	2359.6694	79.2261	3.7124
	1 : 3	0.0373	0.3633	2337.5871	78.4847	3.7475
	Rata-Rata :	0.0362	0.3551	2354.3236	79.0466	3.7209

3.7 Laju Korosi Pada Proteksi Anoda Korban

Pada Tabel 11 dan 12 berikut ini ditunjukkan laju korosi yang masih terjadi pada baja karbon yang dilindungi dengan anoda korban.

Tabel 11. Laju Korosi Baja Karbon yang Dilindungi Anoda Korban Zn

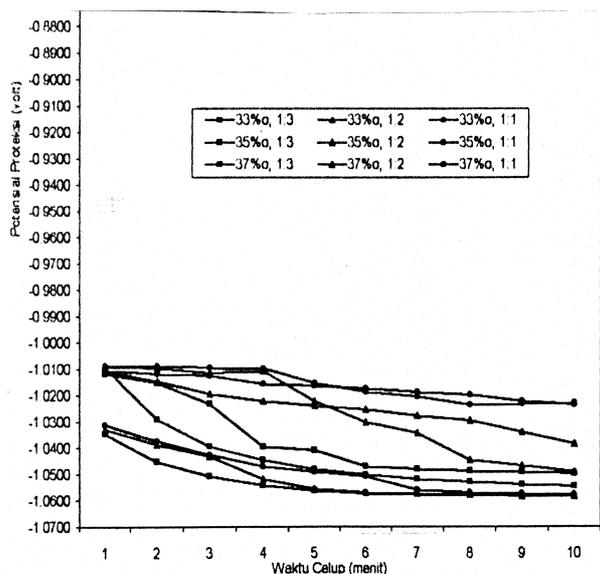
SALINITAS (%)	RATIO LUAS A : K	PENGURANGAN BERAT (gr)	LUAS (cm ²)	LAJU KOROSI (mm/y)	KETAHANAN LAJU KOROSI (%)
33	1 : 1	0.0149	14.66	0.0472	77.7683
	1 : 2	0.0318	29.18	0.0506	76.1624
	1 : 3	0.0478	43.90	0.0508	76.1832
35	1 : 1	0.0180	14.58	0.0573	77.5527
	1 : 2	0.0324	29.30	0.0514	79.8939
	1 : 3	0.0502	43.58	0.0535	79.0557
37	1 : 1	0.0192	14.54	0.0813	79.6480
	1 : 2	0.0360	29.20	0.0573	80.9984
	1 : 3	0.0590	43.64	0.0528	79.1628

Tabel 12. Laju Korosi Baja Karbon yang Dilindungi Anoda Korban Al

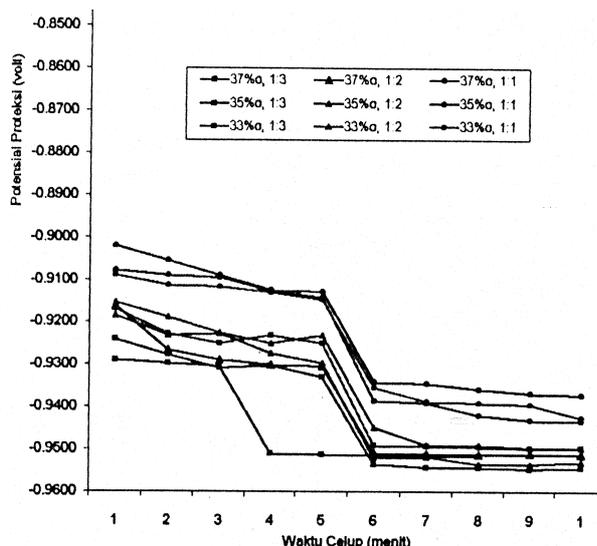
SALINITAS (%)	RATIO LUAS A : K	PENGURANGAN BERAT (gr)	LUAS (cm ²)	LAJU KOROSI (mm/y)	KETAHANAN LAJU KOROSI (%)
33	1 : 1	0.0112	14.60	0.0356	83.2202
	1 : 2	0.0260	29.08	0.0415	80.4431
	1 : 3	0.0377	43.12	0.0406	80.8758
35	1 : 1	0.0125	14.50	0.0400	84.3256
	1 : 2	0.0277	29.22	0.0440	82.7635
	1 : 3	0.0400	43.04	0.0432	83.1019
37	1 : 1	0.0160	14.46	0.0514	82.9461
	1 : 2	0.0300	28.96	0.0481	84.0341
	1 : 3	0.0500	43.24	0.0537	82.1780

3.8 Waktu Induksi

Pada Gambar 4 dan 5 ditunjukkan waktu induksi anoda korban paduan seng dan paduan aluminium yang diukur selama sepuluh menit pertama setelah pencelupan.



Gambar 4. Grafik Hubungan Potensial Proteksi Anoda Zn terhadap Waktu Celup



Gambar 5. Grafik Hubungan Potensial Proteksi Anoda Al terhadap Waktu Celup

4. Analisa Data

4.1 Laju Korosi Baja Karbon Tanpa Proteksi

Dari perhitungan korosi baja karbon tanpa proteksi yang ditunjukkan pada Gambar 2, laju korosi bervariasi dari 0,1975 mm/y sampai dengan 0,3077 mm/y. Laju korosi meningkat dengan naiknya salinitas air laut dimana terjadi peningkatan kandungan garam-garam klorida, khususnya NaCl. Kandungan NaCl merupakan bagian terbesar dari garam-garam terlarut yang terdapat di dalam larutan pengganti air laut. Air laut dengan salinitas 33‰ mengandung 2,244% NaCl, pada salinitas 35‰ terkandung 2,370% NaCl, dan pada salinitas 37‰ terkandung 2,501% NaCl untuk tiap liter larutan pengganti air laut. Meningkatnya kandungan NaCl dalam air laut akan meningkatkan laju korosi baja karbon. Hal ini terlihat pada Gambar 1, dimana laju korosi besi akan meningkat dengan kenaikan kandungan NaCl sampai dengan 3%.

Ion Cl⁻ yang berperan dalam proses korosi tersebut bekerja dengan memecahkan lapisan pasif atau mencegah pembentukan lapisan pasif ini pada besi (20). Ion Cl⁻ lebih mudah melakukan penetrasi melalui lapisan film pasif melalui pori-pori atau cacat pada permukaan logam bila dibandingkan dengan ion-ion lainnya, misalnya SO₄²⁻. Atau ion Cl⁻ akan membentuk koloid yang menyebar pada lapisan film oksida dan meningkatkan permeabilitasnya.

Menurut teori penyerapan, ion Cl⁻ akan bersaing dengan oksigen terlarut atau ion OH⁻

untuk terserap ke permukaan logam. Saat bersentuhan dengan permukaan logam, ion Cl⁻ cenderung melarutkan ion-ion logam dan memudahkan ion-ion tersebut masuk ke larutan. Hal ini berlawanan dengan pengaruh penyerapan oksigen yang menurunkan laju pelarutan suatu logam. Dengan kata lain, ion Cl⁻ yang terserap meningkatkan perpindahan arus untuk pelarutan anodik logam-logam tersebut melebihi kemampuan oksigen. Dengan demikian nyata bahwa besi tidak mudah terpasivasi secara anodik dalam larutan yang mengandung banyak ion Cl⁻.

Pemecahan lapisan pasif oleh ion-ion Cl⁻ terjadi pada bagian-bagian tertentu permukaan logam (tidak merata). Kemungkinan bagian-bagian tersebut adalah pada lapisan pasif yang strukturnya sedikit bervariasi dan lapisannya tipis⁽²⁰⁾. Selanjutnya akan terjadi beda potensial pada permukaan logam yang berarti terjadi aliran arus. Rapat arus yang besar pada anoda akan meningkatkan laju penetrasi pada permukaan logam. Penetrasi ini menyebabkan terjadinya korosi *pitting* yang berlangsung dengan sendirinya, atau yang disebut proses *autocatalytic*.

4.2 Potensial Setengah Sel Anoda dan Katoda

Hasil pengukuran pada Tabel 4 menunjukkan adanya fluktuasi penunjukkan pada voltmeter. Hal ini disebabkan belum stabilnya gaya gerak listrik pada permukaan anoda dan katoda sebagai akibat terjadinya reaksi anodik dengan lingkungan.

Besarnya potensial tersebut bergantung pada jenis anoda dan katoda serta lingkungannya. Pada deret Galvanik dapat diketahui bahwa potensial besi paling positif kemudian potensial aluminium, sedangkan potensial seng paling negatif.

4.3 Hasil Uji Celup Anoda Dan Katoda

Dari hasil uji celup pasangan anoda dan katoda, dapat diketahui bahwa :

- Potensial proteksi baja karbon oleh paduan aluminium lebih negatif daripada yang dihasilkan oleh paduan seng, seperti terlihat pada Gambar 3. Demikian pula arus galvanik yang dihasilkan paduan aluminium lebih besar daripada yang dihasilkan paduan seng, seperti tampak pada Tabel 7 dan 8. Hal ini dapat terjadi karena pada paduan seng terdapat pengotor (*impurities*) seperti besi, tembaga dan timbal. Yang paling berpengaruh adalah besi karena kelarutannya

dalam seng sedemikian rendah, yaitu kurang dari 0,0014%⁽¹⁹⁾. Sedangkan pada paduan aluminium dengan penambahan seng dan indium akan mencegah terbentuknya lapisan oksida yang merata pada permukaan aluminium yang dapat membatasi arus galvanik antara anoda dan katoda. Penambahan komposisi seng sampai dengan 5% dan indium sampai dengan 0,0484% akan menghasilkan potensial proteksi yang lebih negatif⁽⁵⁾. Dari penjelasan ini diketahui bahwa laju korosi paduan aluminium lebih besar daripada laju korosi paduan seng, hal ini tampak pada Tabel 5 dan 6.

- Bila ditinjau dari variasi salinitas, laju korosi pada paduan aluminium meningkat dengan naiknya salinitas air laut karena pengaruh garam-garam klorida seperti yang terjadi pada korosi baja karbon. Hal ini juga terjadi pada paduan seng, dimana garam-garam klorida dan sulfat berpengaruh meningkatkan laju korosi. Tetapi dengan adanya ion-ion Mg²⁺ dan Ca²⁺ dapat mencegah terjadinya korosi pada paduan seng⁽¹⁾. Sehingga terlihat pada Tabel 5 laju korosi yang terjadi pada paduan seng sedikit meningkat pada salinitas 35‰ tetapi menurun pada salinitas 37‰.
- Bila ditinjau dari perbandingan luas A : K, terlihat pada Tabel 7 dan 8 bahwa terjadi peningkatan arus galvanik pada perbandingan 1 : 3. Disini luasan anoda yang kecil bertindak sebagai subyek yang harus mengeluarkan arus untuk melindungi luasan katoda yang besar. Dengan demikian potensial proteksi juga lebih besar sehingga terjadi laju korosi yang besar pada anoda. Dari variasi salinitas, terlihat bahwa arus galvanik yang dihasilkan anoda korban paduan seng maupun paduan aluminium terus meningkat pada salinitas yang lebih tinggi. Hal ini disebabkan konduktivitas larutan yang semakin tinggi dengan naiknya salinitas.

4.4 Analisa Kapasitas, Efisiensi dan Laju Konsumsi Anoda

Dari Tabel 9 terlihat bahwa kapasitas anoda paduan seng tidak ada yang mencapai nilai kapasitas teoritisnya (819,7 A.jam/kg). Demikian pula paduan aluminium tidak ada yang mencapai kapasitas teoritis 2978,4 A.jam/kg, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 10. Dengan demikian efisiensi anoda juga tidak ada yang mencapai 100%. Hal ini disebabkan anoda terkorosi sendiri dan tidak merata sehingga pengurangan berat anoda yang terjadi

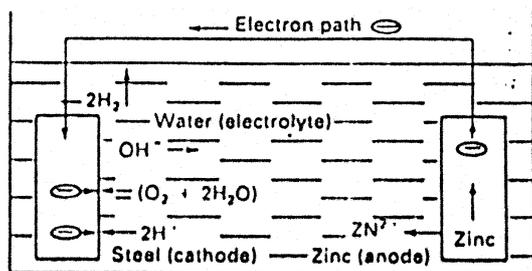
tidak selalu disertai pengeluaran arus galvanik yang sesuai.

Efisiensi anoda paduan aluminium lebih baik daripada paduan seng. Walaupun perbedaannya tidak terlalu jauh tetapi bila dilihat dari laju konsumsi anoda maka anoda paduan aluminium mempunyai laju konsumsi yang jauh lebih baik atau lebih rendah daripada paduan seng.

4.5 Ketahanan Laju Korosi Baja Karbon

Baja karbon yang bertindak sebagai struktur yang dilindungi (katoda), seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6, ternyata masih juga mengalami korosi. Tetapi seperti yang terdapat pada Tabel 11 dan 12, laju korosi yang terjadi pada baja karbon yang dilindungi dengan anoda korban sudah jauh menurun. Laju korosi baja karbon tidak dapat hilang sama sekali (laju korosi nol) karena adanya kehilangan arus proteksi pada hubungan galvanik anoda dan katoda. Hal ini dapat terjadi karena faktor-faktor sebagai berikut :

- adanya tahanan dalam kabel tembaga yang menghubungkan anoda dan katoda.
- adanya tahanan elektrolit antara anoda dan katoda.
- adanya tahanan yang terjadi pada produk korosi di permukaan logam yang disebabkan proses *autocatalytic*.
- pengaruh pembentukan gas hidrogen pada permukaan katoda, dimana pembentukan gas hidrogen ini dapat meningkatkan tahanan pada katoda yang dapat menurunkan arus dari anoda⁽¹⁾.



Gambar 6. Mekanisme Perlindungan Korosi pada Baja oleh Seng⁽¹⁾.

Secara umum baja karbon yang terlindungi paduan aluminium mempunyai ketahanan laju korosi yang lebih baik bila dibandingkan dengan struktur yang dilindungi paduan seng.

Bila dilihat dari segi variasi salinitas, ketahanan korosi meningkat pada salinitas yang tinggi. Hal ini diperkirakan karena konduktivitas larutan yang tinggi karena banyaknya kandungan garam-garam terlarut. Sehingga arus dari anoda dapat menghantarkan ion ke permukaan katoda.

Dari segi perbandingan luas A : K, dengan bertambahnya arus dari anoda berarti bertambah pula perlindungan yang dapat diberikan pada permukaan katoda.

4.6 Waktu Induksi

Dari Gambar 4 terlihat bahwa anoda paduan seng mempunyai waktu induksi yang sangat baik, yaitu pada menit pertama telah melewati batas potensial proteksi -0,800 volt. Anoda paduan aluminium juga mencapai potensial proteksi pada menit pertama, seperti terlihat pada Gambar 5, tetapi dengan nilai potensial proteksi yang lebih positif daripada yang dihasilkan paduan seng. Baik dan tidaknya waktu induksi ini ditentukan oleh kecepatan stabilnya gaya gerak listrik permukaan anoda terhadap larutan.

Berdasarkan salinitas terlihat kecenderungan bahwa semakin tinggi salinitas semakin negatif potensial proteksi yang dihasilkan dan waktu induksinya semakin baik.

Pada perbandingan luas A : K yang semakin besar, potensial proteksi semakin negatif dan waktu induksinya semakin cepat. Hal ini disebabkan banyaknya ion yang mengalir dari anoda ke permukaan katoda sehingga mempercepat terjadinya polarisasi negatif pada permukaan katoda.

4.7 Pola Korosi Anoda

Hasil foto makro pada Lampiran menunjukkan bahwa pola korosi anoda paduan seng tidak merata (Gambar A1-A3). Hal ini ditandai dengan terjadinya korosi *pitting* (warna gelap/hitam pada foto). Naiknya salinitas air laut diikuti dengan kecenderungan berkurangnya korosi *pitting*, hal ini berhubungan dengan kehadiran ion Mg^{2+} dan ion Ca^{2+} yang telah dibahas di depan. Korosi *pitting* terbanyak terjadi pada kondisi salinitas 33‰ dengan ratio luasan 1 : 3 (Gambar A3) dan pada kondisi salinitas 35‰ dengan ratio luasan 1 : 2.

Pada paduan aluminium, juga terlihat bahwa korosi terjadi tidak merata. Dengan bertambahnya salinitas maka *pitting* yang terjadi semakin banyak, seperti yang tampak pada Gambar B1-B3, dimana hal ini juga menunjukkan terjadinya laju korosi yang semakin tinggi. Gejala ini erat kaitannya dengan kerja ion-ion Cl^- yang mempunyai kecenderungan untuk terus membuat terjadinya korosi *pitting*. Pada perbandingan luasan A:K terdapat kecenderungan meningkatnya korosi *pitting* dengan bertambah besarnya perbandingan luasan tersebut.

5. Kesimpulan dan Saran

5.1 Kesimpulan

- Peningkatan salinitas dari 33 %o menuju 37 %o secara umum meningkatkan kinerja anoda korban paduan seng maupun paduan aluminium.
- Peningkatan luas struktur yang diproteksi akan menyebabkan peningkatan arus galvanik yang terjadi, yang secara umum akan menurunkan kapasitas dan efisiensi, serta meningkatkan laju konsumsi anoda korban.
- Kinerja anoda korban paduan aluminium lebih baik daripada paduan seng, seperti ditunjukkan pada Tabel 13.

Tabel 13. Penilaian Kinerja Anoda Korban Paduan Al dan Paduan Zn

NO	PARAMETER KINERJA	PENILAIAN KINERJA	
		Paduan Al	Paduan Zn
1	Potensial Proteksi	**	*
2	Arus Galvanik	**	*
3	Kapasitas Anoda	**	*
4	Efisiensi Anoda	**	*
5	Laju Konsumsi Anoda	**	*
6	Waktu Induksi	*	*

Keterangan : * kinerja baik
** kinerja lebih baik

- Pola korosi yang terlihat dari pengamatan foto makro menunjukkan pada anoda korban paduan seng maupun paduan aluminium terjadi korosi yang tidak merata dengan adanya korosi lubang (*pitting*) di permukaannya.

5.2 Saran

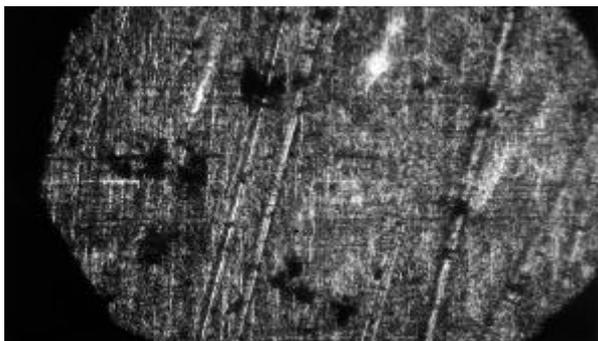
Untuk penelitian lebih lanjut dapat dilakukan dengan mengkombinasikan metode proteksi katodik anoda korban ini dengan metode lain, misalnya pengecatan.

Daftar Pustaka

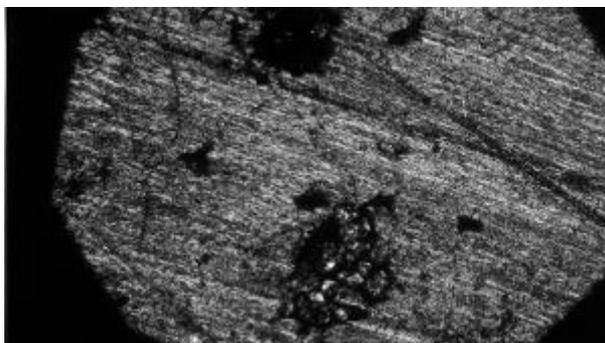
1. _____, *Corrosion*, 3rd ed., ASM Handbook, New York : ASM International, 1992.
2. _____, *Wear and Erosion; Metal Corrosion*, ASM Standards, vol 03.02, New York: ASTM International, 1990.
3. _____, *Water (II)*, ASTM Standards, vol 11.02. New York : ASTM International, 1990.
4. Chandler, K. Alexander, *Marine and Offshore Corrosion*, 3rd ed. New York : Butterword and Co.Ltd, 1985.
5. Djaprie, Sriati dan D.M.F. Luhulima, *Standardisasi dan Penilaian Kinerja Anoda Korban Paduan Aluminium pada Proteksi Katodik*. Jakarta : Seminar Korosi '92 Universitas Indonesia, 1992, Proceedings.
6. Fontana, Mars, *Corrosion Engineering*, 3rd ed. New York : Mc Graw-Hill Book Company, 1987.
7. Jones, Denny, *Principles and Prevention of Corrosion*, 3rd ed. New York : Macmillan Publishing Company, 1992.
8. Laque, L. Francis, *Marine Corrosion, Causes and Prevention*, 3rd ed. New York : John Wiley & Sons, 1975.
9. Lenox, T.J. Jr., *Electrochemical Properties of Magnesium, Zinc, and Aluminum Galvanic Anodes in Sea Water*, New York : Third International Congress on Marine Corrosion and Fouling, 1975, Proceedings.
10. _____, *Properties and Selection of Metals*, Metals Handbook, 8th ed. Ohio : ASM International, 1975.
11. Morgan, John, *Cathodic Protection*, 2nd ed. Texas : National Association of Corrosion Engineers, 1987.
12. Myers, J. John, et al., *Handbook of Ocean and Underwater Engineering*, 4th ed. New York : Mc Graw-Hill Book Company, 1985.
13. Nayar, Alok, *The Metals Databook*, 2nd ed. New Delhi : Tata McGraw-Hill Publishing Company Ltd, 1997.
14. Peabody, William, *Cathodic Protection for Pipeline*, 4th ed. Texas : National Association of Corrosion Engineers, 1970.
15. Sabariman, et al., *Penelitian Terhadap Sistem Proteksi Katodik di Petrokimia Gresik*. Jakarta : Lembaga Metalurgi Nasional-Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia, 1982, Proceedings.
16. Srijono, Bambang, et al., *Penelitian Pembuatan Anoda Aluminium untuk Kapal Laut*. Jakarta : Lembaga Metalurgi Nasional-Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia, 1985, Proceedings.
17. Sulaiman, A., dan A. Rustandi, *Material Untuk Proteksi Katodik*. Jakarta : Seminar Korosi '92 Universitas Indonesia, 1992, Proceedings.

18. Sundjono, *Lapis Lindung Cat*, Surabaya : Seminar Sehari Ketangguhan Baja Lapis Lindung Yang Unik dan Estetik Terhadap Serangan Korosi, 1995, Proceedings.
19. Tretthewey, R. Keneth and J. Chamberlain, *Korosi untuk Mahasiswa dan Rekayasawan*, edisi ke-2. Jakarta : PT. Gramedia, 1991.
20. Uhlig, H. Herbert and R. Winston Revie, *Corrosion and Corrosion Control*, 3rd ed. New York : John Wiley & Sons, 1991.

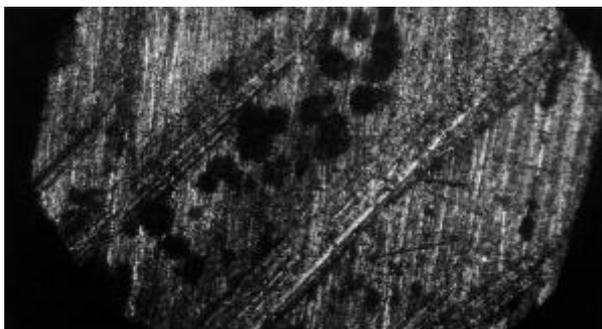
Lampiran :



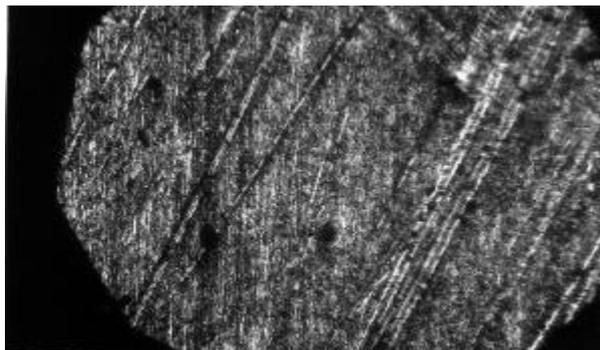
Gambar A1 Foto Makro Korosi Lubang pada Anoda Zn dengan perbandingan luas A:K= 1:1 pada Salinitas 33 ‰



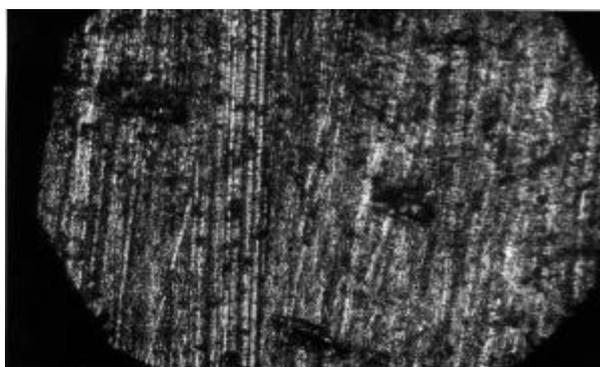
Gambar A2 Foto Makro Korosi Lubang pada Anoda Zn dengan perbandingan luas A:K= 1:2 pada Salinitas 33 ‰



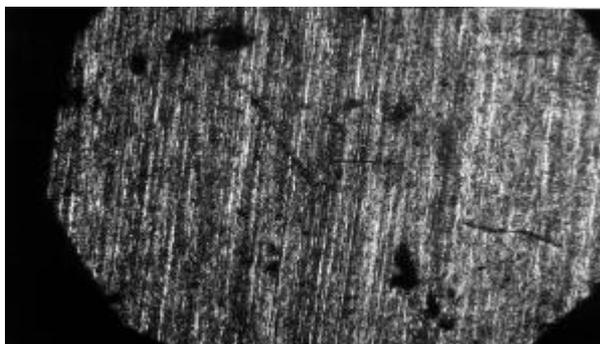
Gambar A3 Foto Makro Korosi Lubang pada Anoda Zn dengan perbandingan luas A:K= 1:3 pada Salinitas 33 ‰



Gambar B1 Foto Makro Korosi Lubang pada Anoda Al dengan perbandingan luas A:K= 1:1 pada Salinitas 37 ‰



Gambar B2 Foto Makro Korosi Lubang pada Anoda Al dengan perbandingan luas A:K= 1:2 pada Salinitas 37 ‰



Gambar B3 Foto Makro Korosi Lubang pada Anoda Al dengan perbandingan luas A:K= 1:3 pada Salinitas 37 ‰