

ANALISIS PENGARUH PENAMBAHAN UNSUR TANAH JARANG YTTERBIUM TERHADAP LAJU KOROSI ANODA KORBAN ALUMINIUM DI LINGKUNGAN AIR LAUT PADA TEMPERATUR RUANG

Tubagus Noor Rohmannudin ¹⁾ ✉, Budi Agung Kurniawan ¹⁾, Faisal Nurdiansyah ¹⁾, Bima Tegar Pribadi ¹⁾.

Teknik Material dan Metalurgi
Institut Teknologi Sepuluh November
roma@mat-eng.its.ac.id
budiagungk@gmail.com
faisalnurdiansyah9@gmail.com
bimategar1717@gmail.com

Abstract

Corrosion is a degradation process on metal that happen naturally. Corrosion is one of the most common problems in the industry, resulting the corrosion prevention much needed to increase the lifetime of a material. One of the methods of corrosion prevention is cathodic protection using a sacrificial anode. This research was conducted to analyze the effect of ytterbium rare earth to the corrosion rate of sacrificial anode aluminium in seawater environment. In this research, the ytterbium rare earth used using variety of 14%, 21%, and 22%. The alloy was made using a casting process with a mini furnace, and was characterized using XRF, XRD, SEM-EDX, and Metallographic Tests. Then an immersion test was carried out for 10 days and a tafel test using the Corrtest tool and the CS Studio5 application. The electrolyte solution used is 3.5% NaCl and SCE as a reference electrode. The results show that as the element Ytterbium(Yb) increases, the grain size becomes smaller and finer. This is because Ytterbium(Yb) has a role as a grain refiner. Based on the results of the corrosion rate calculation, the lowest corrosion rate value was sample B with a Yb percentage of 21%, which had a corrosion rate value of 0.005 mm/year on the tafel test. Whereas for the 10-day immersion test, the lowest corrosion rate value was also obtained from sample B with a Yb percentage of 21%, namely 1.030 mm/year. The addition of the element Ytterbium(Yb) decreases the potential value of the sacrificial anode in seawater at room temperature with 22% Al-Yb alloy which has a potential value of the criterion of -821mV, so that only 22% Al-Yb alloy can protect the cathode..

Keywords: Cathodic Protection, Corrosion Rate, Sacrificial Anode, Ytterbium

1. PENDAHULUAN

Saat ini, material struktur yang diterapkan pada kapal laut berkembang ke arah yang ringan, kekuatan tinggi, ketahanan aus yang tinggi dan ketahanan korosi yang baik^[1]. Untuk mendapatkan ketahanan korosi yang baik, terdapat beberapa metode pengendalian korosi seperti melakukan pelapisan pada material yang ingin diproteksi, menambahkan inhibitor, pemilihan material serta perancangan yang sesuai dengan alat yang dibuat, serta proteksi katodik. Proteksi katodik adalah teknik yang paling penting digunakan untuk melindungi

Corresponding Author:
✉ **Tubagus Noor Rohmannudin**
Received on: 2023-04 -10
Revised on: 2024-02-22
Accepted on: 2024-02-22

struktur baja dari serangan korosi di lingkungan yang berbeda. Saat ini proteksi katodik menggunakan metode anoda korban di lingkungan laut telah diterapkan secara luas [2].

Proteksi katodik diperlukan pada proses pengendalian korosi pada bagian terendam dari monopil baja yang digunakan untuk menopang turbin angin di *offshore*. Desain dan penerapan metode pengendalian korosi ditetapkan oleh beberapa standar, diantaranya BS EN ISO 12473:2017, NACE SP0176-2007-SG, VGB/BAW-S-021-04-2018-07-EN, dan DNVGL- RP-B401. Tujuannya adalah untuk memberikan panduan untuk desain yang kuat dan andal serta mencegah penerapan desain yang salah, yang dapat menyebabkan biaya tambahan untuk pemeliharaan dan perbaikan, dan juga mengurangi masa pakai [3].

Anoda korban aluminium memiliki beberapa kelebihan, diantaranya kapasitas arus dan life time yang tinggi, tetapi beratnya ringan dan polarisasi rendah. Penambahan elemen paduan diperlukan pada aluminium untuk menghambat atau merusak proses terbentuknya lapisan pasif. Unsur paduan yang biasa digunakan pada logam aluminium diantaranya adalah In, Zn, Bi, Cu, dan Sn. Anoda korban tidak dapat bekerja secara efektif tanpa adanya elemen paduan tersebut. Seiring berjalannya waktu, anoda korban terus mengalami pengembangan, diantaranya adalah paduan unsur Al-Zn-Cu untuk menggantikan penggunaan unsur Indium. Penambahan unsur Cu berguna untuk pembentukan presipitat dan merusak lapisan pasif aluminium [4].

Unsur tanah jarang (RE) memiliki aktivitas kimia yang tinggi dan sifat fisik & kimia khusus. Struktur metalik beberapa paduan menjadi murni dan homogen karena penambahan unsur tanah jarang ke dalamnya. Pada penelitian ini, unsur logam lain seperti unsur logam tanah jarang ytterbium yang ditambahkan dalam anoda korban paduan aluminium dan diharapkan dapat meningkatkan efisiensi dari anoda korban [5].

2. METODE DAN BAHAN

2.1. Bahan dan alat penelitian

Dalam penelitian ini bahan yang digunakan berupa aluminium ingot, ytterbium ingot, aquades, NaCl 3,5%, kertas amplas grade 80-1500, larutan keller, dan ethanol 99%. Sedangkan alat yang digunakan berupa mesin gerinda, timbangan digital, *furnace*, penjepit, pengaduk, cetakan, *crucible*, *thermocouple*, *blower*, dan gelas bekal 10 ml.

2.2. Metode penelitian

Dalam melakukan penelitian ini metode penelitian yang digunakan terdiri dari beberapa langkah yang meliputi perhitungan neraca massa, prosedur pengecoran anoda korban, dan prosedur pengujian sampel.

A. Perhitungan Neraca Massa

Adapun langkah pertama untuk perhitungan neraca disajikan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Perhitungan neraca massa

No.	Sampel	Massa AL	Massa YB
1.	A	74,60 (gr)	2,257 (gr)
2.	B	65,73 (gr)	3,280 (gr)
3.	C	51,86 (gr)	3,640 (gr)

B. Prosedur Perhitungan Anoda Korban

Tahap pertama adalah ingot dari material Aluminium dipotong terlebih dahulu menjadi bentuk kecil kecil untuk mempermudah proses penimbangan dan proses memasukkan ingot ke dalam krusibel. Setelah dipotong, ingot dikeringkan dan ditimbang dengan massa sesuai

persentase berat dari setiap sampel yang akan difabrikasi. Ingot aluminium yang telah terpotong kecil-kecil kemudian dimasukkan ke dalam krusibel yang berada di dalam *furnace* dan dilelehkan dengan temperatur 750°C selama 30 menit. Pelelehan aluminium dibantu dengan pengadukan menggunakan batang grafit agar lelehan terhomogenisasi dengan baik. Ketika lelehan aluminium sudah larut sempurna, lelehan perlu dibersihkan dari dross yang terlihat di permukaan lelehan. Setelah itu *Ytterbium* ditambahkan ke dalam lelehan dan dipanaskan hingga *temperature* 850°C. Lelehan diaduk agar homogen dan ditahan pada temperatur tersebut selama 10 menit. Kemudian paduan Al-Yb dituangkan ke dalam cetakan.

C. Proses Pengujian

Pada penelitian ini 6 proses pengujian dilakukan terhadap total 22 sampel yang terdiri dari pengujian XRF, XRD, SEM-EDX, Metalografi, Imersi, Potensiostat, dan Potensial.

1. Pengujian XRF

X-Ray Fluorescence (XRF) merupakan teknik analisa non-destruktif yang digunakan untuk identifikasi serta penentuan konsentrasi elemen yang ada pada padatan, bubuk ataupun sample cair. XRF mampu mengukur elemen dari berilium (Be) hingga Uranium pada level trace element, bahkan di bawah level ppm. Secara umum, XRF spektrometer mengukur panjang gelombang komponen material secara individu dari emisi fluoresensi yang dihasilkan sampel saat diradiasi dengan sinar-X. Metode XRF secara luas digunakan untuk menentukan komposisi unsur suatu material. Karena metode ini cepat dan tidak merusak sampel, metode ini dipilih untuk aplikasi di lapangan dan pecimen untuk pecime material.

2. Pengujian XRD

Pengujian XRD digunakan untuk analisis komposisi fasa atau senyawa pada material dan juga karakterisasi kristal. Prinsip dasar XRD adalah mendifraksi cahaya yang melalui celah kristal. Difraksi cahaya oleh kisi-kisi atau kristal ini dapat terjadi apabila difraksi tersebut berasal dari radius yang memiliki pecime gelombang yang setara dengan jarak antar atom, yaitu sekitar 1 Angstrom. Radiasi yang digunakan berupa radiasi sinar-X, pecimen, dan neutron. Sinar-X merupakan foton dengan energi tinggi yang memiliki pecime gelombang berkisar antara 0.5 sampai 2,5 amstrong. Ketika berkas sinar-X berinteraksi dengan suatu material, maka spesimen berkas akan diabsorpsi, ditransmisikan, dan spesimen lagi dihamburkan terdifraksi. Hamburan terdifraksi inilah yang dideteksi oleh XRD. Berkas sinar X yang dihamburkan tersebut ada yang saling menghilangkan karena fasanya berbeda dan ada juga yang saling menguatkan karena fasanya sama. Berkas sinar X yang saling menguatkan itulah yang disebut sebagai berkas difraksi. Hukum Bragg merumuskan tentang persyaratan yang harus dipenuhi agar berkas sinar X yang dihamburkan tersebut merupakan berkas difraksi.

3. Pengujian SEM-EDX

SEM bekerja dengan menembakkan electron berenergi tinggi yang dipancarkan dari *electron gun*. Elektron yang dipancarkan kemudian diperkuat oleh kumparan dan difokuskan oleh *fineprobe*. Elektron yang mengenai spesimen berukuran kira-kira 10 Å dihamburkan dan dipantulkan kepada *backscattered electron detector* dan *secondary electron detector*. *Backscattered electron* menampakkan bagian yang memiliki berat atom lebih besar akan berwarna terang dan berat atom yang lebih kecil berwarna lebih gelap. Adapun *secondary electron* menghasilkan informasi topografi dari sampel, di mana dari topografi tersebut diketahui perkiraan permukaan yang lebih tinggi dan lebih rendah. Selanjutnya hasilnya akan ditampilkan di layer.

4. Pengujian Metalografi

Pengujian metalografi dilakukan untuk mengetahui struktur dari logam dengan

menggunakan mikroskop optik. Struktur yang terlihat pada mikroskop optik merupakan struktur mikro dari logam tersebut. Pengamatan dengan mikroskop optik dapat dilakukan pada spesimen yang telah diproses terlebih dahulu, yaitu mounting, grinding, dan etching. Pengujian ini dilakukan di Laboratorium Metalurgi di Departemen Teknik Material dan Metalurgi FT-IRS ITS Surabaya menggunakan mikroskop optik OLYMPUS GX71.

5. Pengujian Imersi

Pengujian Imersi dilakukan untuk mengetahui weight loss dari sampel. Pengujian dilakukan di laboratorium korosi Departemen Teknik Material dan Metalurgi ITS. Pengujian dilakukan dengan mencampurkan aquades 100ml dengan 3,5gr NaCl kemudian diaduk. Tahap ini diulangi sebanyak 4 kali untuk masing-masing sampel pengujian. Masing- masing sampel ditimbang massa awalnya agar dapat dibandingkan dengan massa setelah pengujian. Selanjutnya sampel dicelupkan pada masing-masing gelas beker yang telah berisi larutan NaCl. Pengujian berlangsung selama 7 hari dengan pengecekan massa masing masing pada hari ke-3, 5, dan 7.

6. Pengujian Potensiostat

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui perilaku suatu paduan dalam sebuah media tertentu secara elektrokimia. Dalam pengujian ini menggunakan 3 elektroda yaitu grafit sebagai *auxiliary electrode* (AE), *saturated calomel electrode* (SCE) sebagai *reference electrode* (RE) dan sampel anoda korban sebagai *working electrode* (WE). Larutan elektrolit yang digunakan berupa NaCl 3,5% dan kemudian dianalisis menggunakan aplikasi CS Studio5. Fenomena polarisasi yang digambarkan pada diagram evans menunjukkan hubungan antara potensial elektroda dengan densitas arus dari sampel. Kurva yang bergeser kearah negative dibawah Ecorr disebut polarisasi katodik, dan kurva yang bergeser kearah positif diatas Ecorr disebut polarisasi anodik [6].

7. Pengujian Potensial

Pengujian ini dilakukan dengan mengubungnkan anoda dan katoda Fe menggunakan kabel dan kemudian dihubungkan dengan Ag/AgCl sebagai reference electrode yang telah terhubung pada multimeter. Anoda dan katoda dicelupkan kedalam larutan elektrolit NaCl 3,5% kemudian potensial dari anoda diukur menggunakan multimeter untuk menentukan nilai OCP dan pengaruh penambahan unsur tanah jarang Ytterbium (Yb) terhadap potensial dari anoda korban aluminium dan kemampuannya dalam memproteksi katoda pada lingkungan air laut.

3. HASIL DAN DISKUSI

3.1. Hasil penelitian XRF

Pengujian *X-Ray Fluorescence* (XRF) dilakukan untuk mengetahui komposisi kimia dari sampel aluminium dan paduan aluminium ytterbium. Pengujian dilakukan di Laboratorium Energi Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya untuk mengetahui hasil pengecoran telah sesuai atau tidak. Berdasarkan hasil pengujian menggunakan *X-Ray Fluorescence* (XRF) didapatkan hasil pengujian untuk sampel pertama yaitu logam Al tanpa campuran memiliki nilai kemurnian sebesar 77%. Hasil selengkapnya dari pengujian sampel 1 dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil pengujian XRF sampel 1

Sampel	Jenis unsur	Pembacaan 1 (%)	Pembacaan 2 (%)	Metode pengujian
Logam Al	Al	77	76	<i>X-Ray Fluorescence</i>
	Zn	6,66	6,58	

Sampel	Jenis unsur	Pembacaan 1 (%)	Pembacaan 2 (%)	Metode pengujian
	P	5	5,5	
	Ca	4,5	4,9	
	Fe	5,01	4,93	
	Cu	0,88	0,9	
	S	0,5	0,7	

Selanjutnya untuk sampel 2 yaitu logam paduan Al-Yb dengan campuran *Ytterbium* sebesar 2,257gr didapatkan hasil pengujian yaitu logam Al sebesar 68% dan kadar Yb sebesar 14% yang dapat dilihat pada Tabel 3 berikut.

Tabel 3. Hasil pengujian XRF sampel A

Sampel	Jenis unsur	Pembacaan 1 (%)	Pembacaan 2 (%)	Metode pengujian
	Al	68,3	68	
	Yb	14,7	14,4	
	Zn	5,66	5,54	
Al-Yb	P	3,8	4	<i>X-Ray Fluorescence</i>
	Ca	2,3	2,3	
	Fe	4,1	4,05	
	Cu	0,74	0,74	

Sampel ketiga yaitu paduan Al dan Yb dengan kadar Yb sebesar 3,280gr didapatkan hasil pengujian XRF yaitu Al sebesar 60% dan Yb sebesar 22% dengan hasil lengkapnya tertera pada tabel 4.3 sebagai berikut. Berikutnya yaitu hasil pengujian XRF untuk sampel keempat yaitu paduan Al dan Yb dengan massa Yb sebesar 3,640gr didapatkan nilai Al sebesar 66% dan Yb sebesar 21% yang dapat dilihat pada Tabel 4 berikut.

Tabel 4. Hasil pengujian XRF sampel B

Sampel	Jenis unsur	Pembacaan 1 (%)	Pembacaan 2 (%)	Metode pengujian
	Al	66,3	66,6	
	Yb	21,8	21,6	
	Zn	5,82	5,83	
Al-Yb	P	0,76	0,79	<i>X-Ray Fluorescence</i>
	Ca	1	0,96	
	Fe	3,22	3,2	
	Cu	0,618	0,614	

Tabel 5. Hasil pengujian XRF sampel C

Sampel	Jenis unsur	Pembacaan 1 (%)	Pembacaan 2 (%)	Metode pengujian
	Al	60,3	60,4	
	Yb	22,8	22,7	
	Zn	11,7	11,7	
Al-Yb	P	1,7	1,5	<i>X-Ray Fluorescence</i>
	Ca	2,85	2,84	
	Fe	0,35	0,35	
	Cu	0,18	0,17	

Dapat dilihat pada Tabel 2-5 didapatkan presentase *Ytterbium* pada sampel A, B, dan C

lebih besar dari perhitungan neraca massa diawal penelitian sebelum proses pengecoran. Hal ini dapat disebabkan karena persebaran unsur *Ytterbium* (Yb) yang tidak homogen pada saat proses pengecoran. Hal ini dapat diakibatkan oleh kurangnya durasi dalam proses pengadukan dan juga dapat diakibatkan oleh cetakan yang berbentuk silinder memanjang yang membuat unsur *Ytterbium* (Yb) berkumpul di bagian bawah cetakan. Sehingga pada saat proses pemotongan sampel hasil cor didapatkan presentase *Ytterbium* (Yb) yang lebih tinggi pada bagian bawah sampel jika dibandingkan dengan bagian atas. Berdasarkan Tabel 2-5 didapatkan bahwa terdapat unsur-unsur pengotor yang terkandung pada selurus sampel. Unsur-unsur pengotor tersebut diantara lain Fosfor (P), Kalsium (Ca), Besi (Fe), Cu (Tembaga), dan Belerang (S). Unsur-unsur pengotor tersebut dapat berasal dari ingot aluminium dan juga pada proses pengecoran. Pada proses pengecoran, unsur pengotor dapat berasal dari *crucible*, pengaduk, dan cetakan yang digunakan secara berulang-ulang^[7]. Berikut merupakan komposisi elektrokimia standar untuk anoda korban aluminium ditunjukkan dalam Tabel 6.

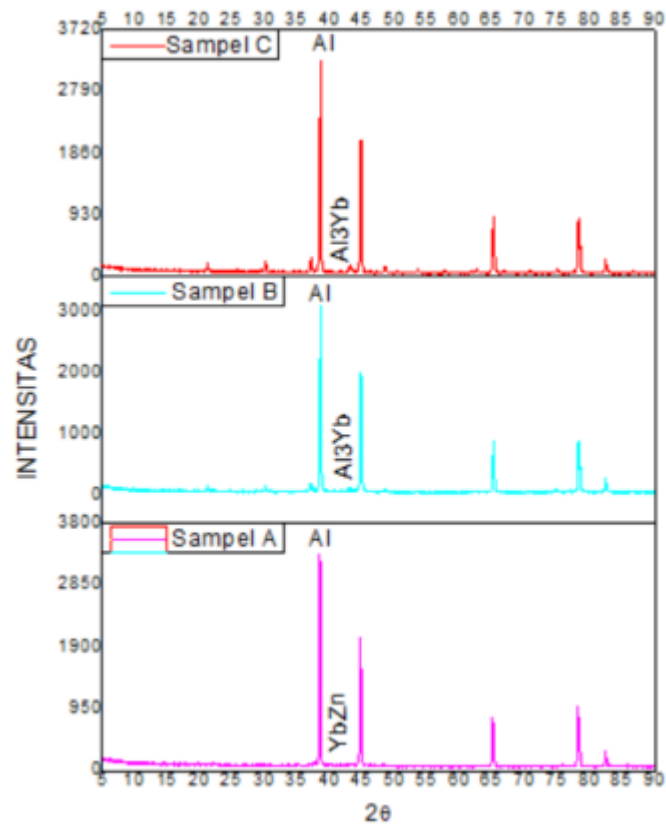
Tabel 6. Komposisi kimia anoda korban aluminium

Sifat	Nilai
Tegangan dorong (V)	0,25
Efisiensi (%)	50-95
Kerapatan (kg/m ³)	2695
Kapasitas arus (kg/A.Y)	2640
Pengausan (kg/A.tahun)	3.2
Pengausan (m ³ /A.tahun)	1.180 x 10 ⁻³
Keluaran arus (A/m ²)	6.5
Potensial larutan terhadap SSC (mV)	-1050
Potensial larutan terhadap CSE (mV)	-1100

3.2. Hasil Pengujian XRD

Pengujian *X-Ray Diffraction* (XRD) dilakukan untuk menganalisis suatu unsur atau senyawa pada sampel paduan Al-Yb. Pengujian ini menggunakan alat XRD Pananalytical. Pengujian XRD dilakukan di Departemen Teknik Material dan Metalurgi ITS yang hasil pengujiannya kemudian dianalisis menggunakan *software HighScore Plus* dan kemudian diplot menggunakan *OriginPro 8.5*. Berikut merupakan hasil pengujian XRD pada sampel A, B, dan C.

Pada Gambar 1 menunjukkan hasil pengujian XRD untuk sampel A dengan paduan Yb 14% didapatkan puncak Al pada posisi $2\theta = 38,471$ dengan intensitas dan nilai d spacing sebesar $2,338\text{\AA}$ sedangkan untuk Yb didapatkan puncak pada posisi $2\theta = 28,177$ dengan nilai d spacing sebesar $3,16446\text{\AA}$. Untuk Sampel B menunjukkan hasil pengujian XRD untuk sampel B dengan paduan Yb 21% didapatkan puncak Al pada posisi $2\theta = 38,508$ dengan nilai d spacing sebesar $2,33596\text{\AA}$ sedangkan untuk Yb didapatkan puncak pada posisi $2\theta = 39,202$ dengan nilai d spacing sebesar $2,29617\text{\AA}$. Dan untuk Sampel C menunjukkan hasil pengujian XRD untuk sampel B dengan paduan Yb 22% didapatkan puncak Al pada posisi $2\theta = 38,508$ dengan intensitas dan nilai d spacing sebesar $2,33596\text{\AA}$ sedangkan untuk Yb didapatkan puncak pada posisi $2\theta = 39,202$ dengan intensitas dan nilai d spacing sebesar $2,29617\text{\AA}$.

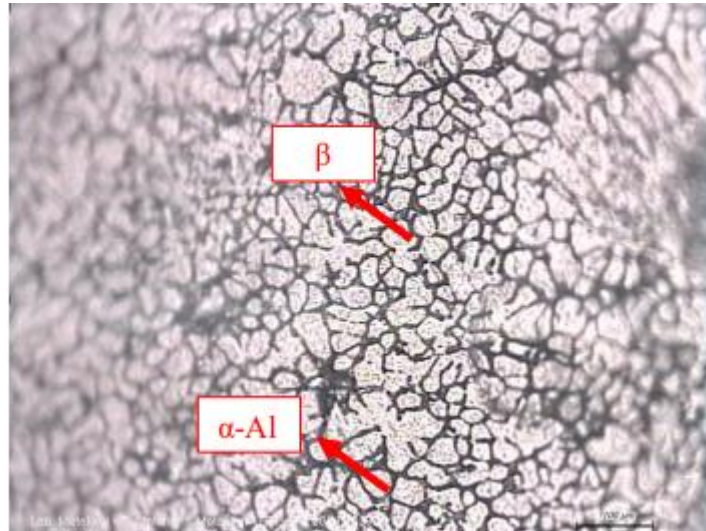


Gambar 1. Hasil pengujian XRD sampel A, B, dan C

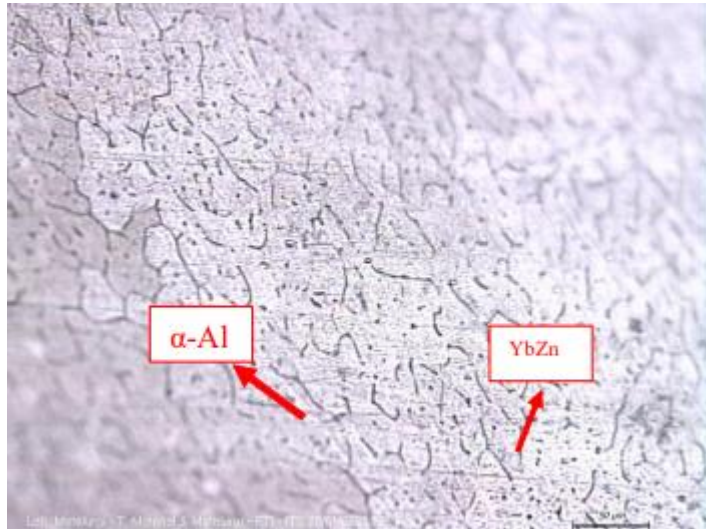
Dapat dilihat pada Gambar 1 yaitu paduan Al-Yb 14% terdeteksi sampel YbZn dalam jumlah yang sangat kecil. Sebagian besar dari *Ytterbium*(Yb) terdeteksi dalam bentuk unsur dan tidak berikatan dengan Al dikarenakan presentase Yb yang ditambahkan tidak sebesar sampel B dan C. Dapat dilihat pada gambar untuk sampel B dan C sebagian besar fasa yang teridentifikasi adalah berupa Al₃Yb dan YbZn.

3.3. Hasil Pengujian Metalografi

Pengujian metalografi dilakukan untuk mengetahui distribusi fasa dan morfologi butir dan fasa yang terbentuk. Pengujian ini dilakukan di Laboratorium Metalurgi Departemen Teknik Material dan Metalurgi Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya dan digunakan menggunakan mikroskop dengan perbesaran 10x dan 20x, sebelumnya sampel telah dicelupkan kedalam larutan etsa Keller sesuai dengan standar ASTM E3. Perhitungan presentase fasa menggunakan aplikasi ImageJ. Dari pengujian tersebut didapatkan hasil yang ditunjukkan pada Gambar 2, 3, 4, dan 5.

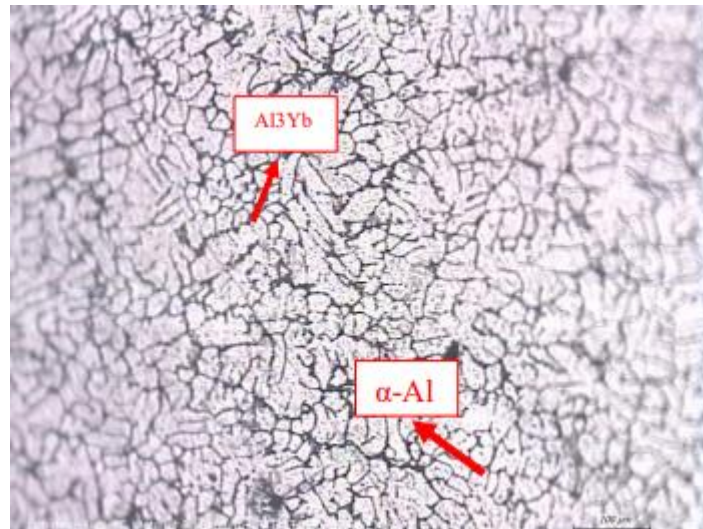


Gambar 2. Hasil metalografi sampel Al tanpa campuran

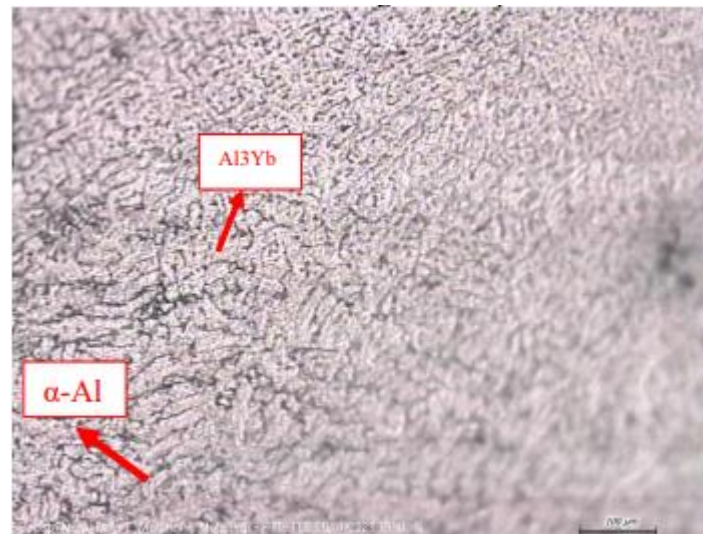


Gambar 3. Hasil metalografi sampel Al-Yb 14%

Pada Gambar 2 menunjukkan struktur mikro sampel aluminium tanpa campuran dimana fasa α -Al berbentuk dendritik dan terdistribusi secara tidak teratur. Pada sampel ini didapatkan presentase fasa antara α sebesar 74,61% dan β sebesar 25,39%. Dengan adanya unsur seng (Zn) pada paduan Al dapat membentuk β phase yang tidak larut dalam matriks aluminium yang dapat meningkatkan sifat elektrokimia secara signifikan. Dimana β -phase akan merusak lapisan pasif pada anoda korban aluminium^[8]. Sedangkan pada Gambar 3 dimana terdapat kandungan *Ytterbium* (Yb) sebesar 14%, struktur paduan tersebut meningkat secara signifikan. Dimana dengan meningkatnya kadar *Ytterbium* (Yb) fasa α -Al menjadi lebih halus dan terdistribusi secara merata. Presentase yang didapatkan pada sampel A untuk fasa α adalah sebesar 82,6% dan fasa β sebesar 17,4%.



Gambar 4. Hasil metalografi sampel Al-Yb 21%



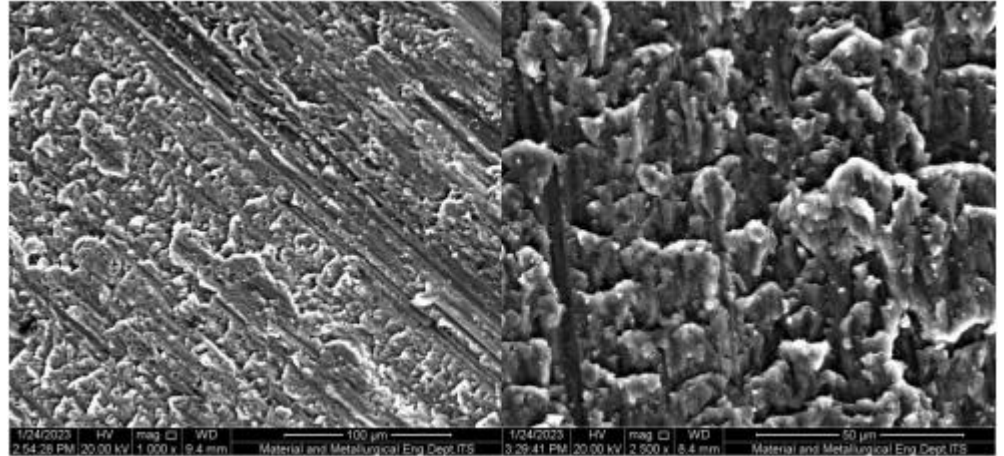
Gambar 5. Hasil metalografi sampel Al-Yb 22%

Hasil perhitungan presentase fasa pada Gambar 4 untuk sampel B didapatkan presentase α sebesar 79,11% dan fasa β sebesar 20,89%. Untuk gambar 5 dengan sampel C didapatkan hasil presentase fasa α sebesar 78,02% dan β sebesar 21,98%. Gambar 3 – 5 menunjukkan bahwa senyawa intermetalik menjadi lebih halus dengan meningkatnya kandungan unsur tanah jarang *Ytterbium*(Yb). Hal ini karena kelarutan unsur tanah jarang *Ytterbium*(Yb) dalam Al dapat diabaikan dan akan memadat di batas *interface liquid-solid*. Fasa intermetallic merupakan fasa kedua yang mengendap pada struktur mikro pada paduan aluminium. Fasa ini dapat terbentuk karena komposisi kimia yang melebihi batas kelarutan. Selain itu penambahan unsur tanah jarang *Ytterbium*(Yb) menghambat proses difusi unsur-unsur(Cu, Fe, Si, dll) ^[9]. Terbentuknya fasa Al_3Yb mengindikasikan bahwa Al_3Yb dapat menjadi inti yang efektif untuk Al pada proses nukleasi. Hal ini dikarenakan Al_3Yb dan Al memiliki energi interfacial yang rendah karena keduanya memiliki struktur kristal yang serupa yakni *face centered cubic* (fcc). Energi *interfacial* pada material dengan butir yang kasar lebih rendah jika dibandingkan dengan material dengan butir yang lebih halus, karena luas total *boundary* yang lebih kecil. Oleh karena itu, pertumbuhan butir dapat terjadi pada

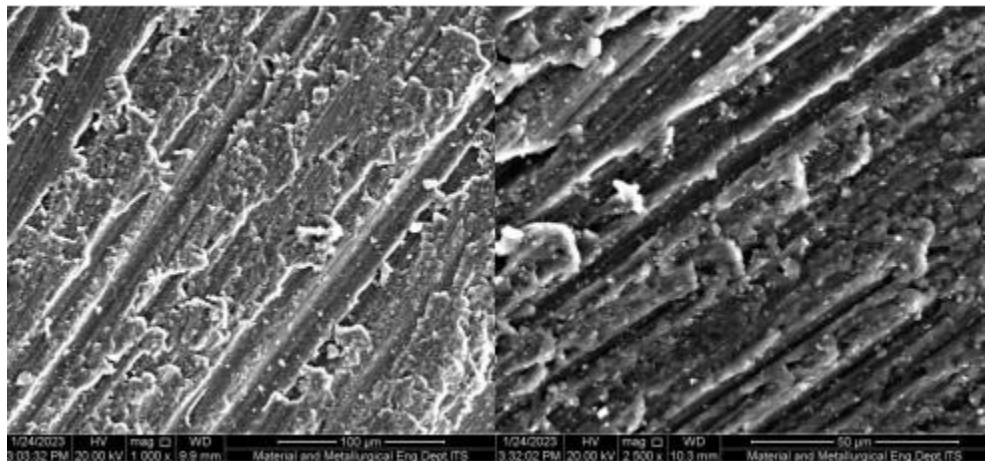
suhu diatas suhu yang diperlukan untuk berlangsungnya proses difusi sebagai mekanisme alami untuk mengurangi energi total *boundary* [10].

3.4. Hasil Pengujian SEM-EDX

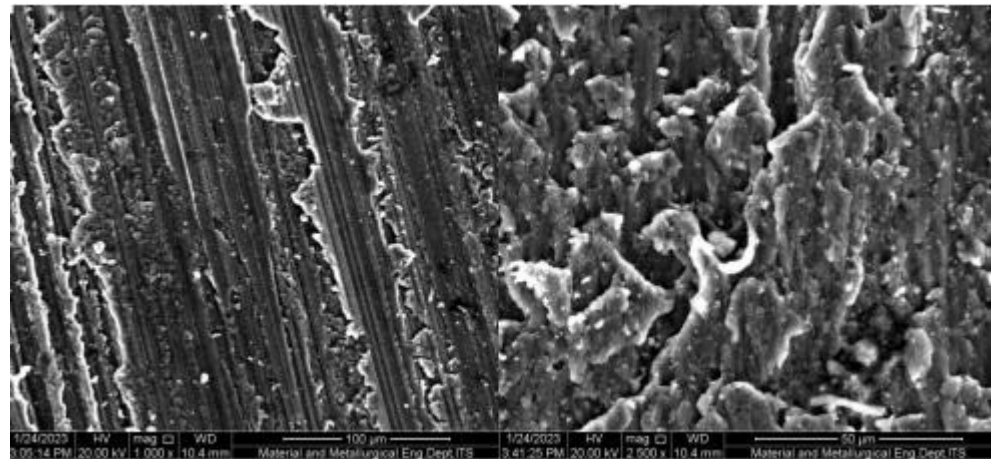
Pengujian *Scanning Electron Microscope* (SEM) dilakukan untuk mengetahui bentuk morfologi dari masing-masing permukaan sampel. Pengujian ini dilakukan pada sampel A, B, dan C. Sedangkan pengujian *Energy Dispersive Spectroscopy* bertujuan untuk mengetahui seberapa besar jumlah unsur penyusun dari suatu sampel.



Gambar 6. Hasil pengujian SEM sampel A dengan perbesaran (a) 1000x dan (b) 2500x

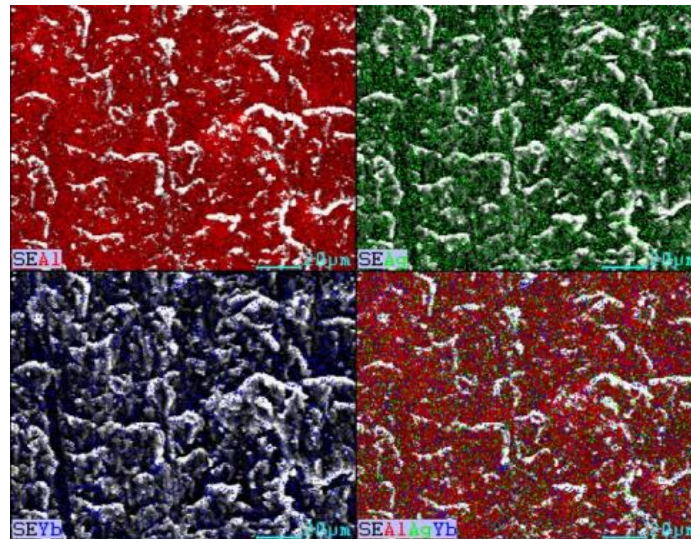


Gambar 7. Hasil pengujian SEM sampel B dengan perbesaran (a) 1000x dan (b) 2500x

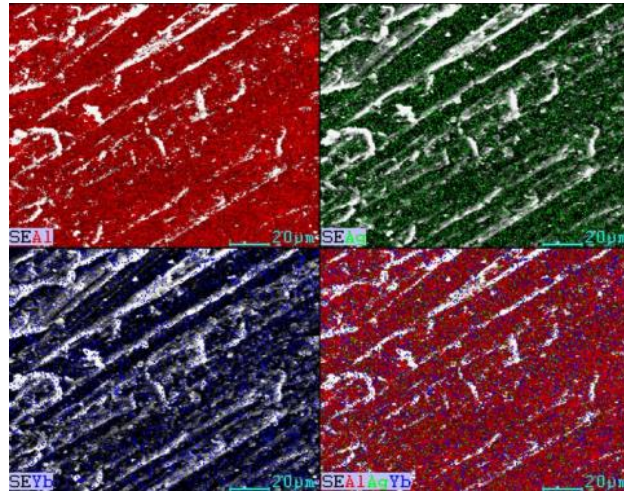


Gambar 8. Hasil pengujian SEM sampel C dengan perbesaran (a) 1000x dan (b) 2500x

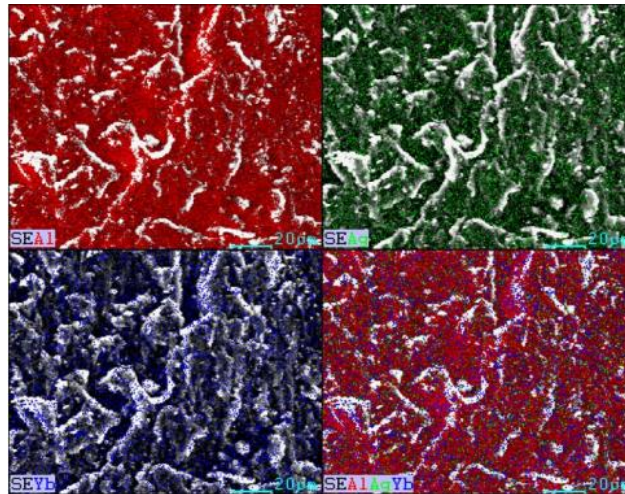
Pada gambar 6-8 menunjukkan hasil pengamatan SEM pada sampel A, B, dan C masing-masing pada perbesaran 1000x dan 2500x. Pada bagian yang berwarna abu-abu gelap diasumsikan sebagai matriks sedangkan bagian yang berwarna putih cerah diasumsikan sebagai presipitat. Dapat dilihat bahwa terdapat fasa yang berbentuk seperti jarum berwarna cerah yang mungkin merupakan senyawa intermetalik yang kaya akan kandungan *Ytterbium*(Yb).



Gambar 9. Hasil pemetaan EDX sampel A



Gambar 10. Hasil pemetaan EDX sampel B



Gambar 11. Hasil pemetaan EDX sampel C

Pada gambar 9-11 di atas merupakan hasil pemetaan EDX pada sampel A, B, dan C yang merupakan paduan Al-Yb dan didapatkan hasil pemetaan distribusi partikel dalam paduan Al-Yb. Dimana dapat dilihat bahwa partikel berwarna merah yang merupakan Aluminium (Al) sangat dominan dan persebarannya merata. Hal ini menunjukkan bahwa aluminium bertindak sebagai matriks dalam paduan. Selain itu, dapat dilihat persebaran partikel dengan warna hijau yang merupakan Ag yang cukup merata yang menunjukkan partikel ini mudah larut pada matriks aluminium Al. Partikel dengan warna biru yang merupakan Ytterbium (Yb) dapat dilihat juga memiliki persebaran yang cukup merata ^[11].

Tabel 7. Komposisi hasil EDX

Sampel	Alk		AgI		Ybl	
	Wt%	Wt%	Wt%	Wt%	Wt%	Wt%
A	83.19	95.5	13.78	3.96	3.03	0.54
B	83.83	95.91	11.18	3.20	4.99	0.89
C	85.43	96.32	10.58	2.98	3.99	0.70

Berdasarkan hasil pengujian komposisi EDX didapatkan presentase berat dan atom dari sampel A, B, dan C. Didapatkan presentase berat hasil pengujian EDX sesuai dengan perhitungan neraca massa yang dilakukan sebelum proses pengecoran.

3.5. Hasil Pengujian Imersi

Berikut merupakan hasil pengujian imersi sampel Al tanpa campuran, A, B, dan C. Pengujian imersi dilakukan dengan mencampurkan 100ml Aquades dan 3,5gr NaCl kedalam gelas beker dan berlangsung selama 10 hari. Kemudian dilakukan perhitungan weight loss pada hari ke-3, 5, 7, dan 10.

Tabel 8. Hasil pengujian imersi

Sampel	Massa (gram)				
	Hari ke-0	Hari ke-3	Hari ke-5	Hari ke-7	Hari ke-10
Al	1,018	1,018	1,017	1,016	1,016
A	0,762	0,762	0,762	0,761	0,758
B	0,914	0,913	0,911	0,910	0,905
C	0,922	0,921	0,921	0,920	0,920

Dari data tersebut kemudian dilakukan perhitungan laju korosi menggunakan persamaan 1 sebagai berikut.

$$CPR = \frac{KW}{\rho At} \quad (1)$$

Keterangan :

K = Konstanta ($87,6 \times 10^4$)

W = Berat anoda yang hilang (gram)

ρ = Densitas anoda (gr/cm^3)

A = Luas permukaan terekspos (cm^2)

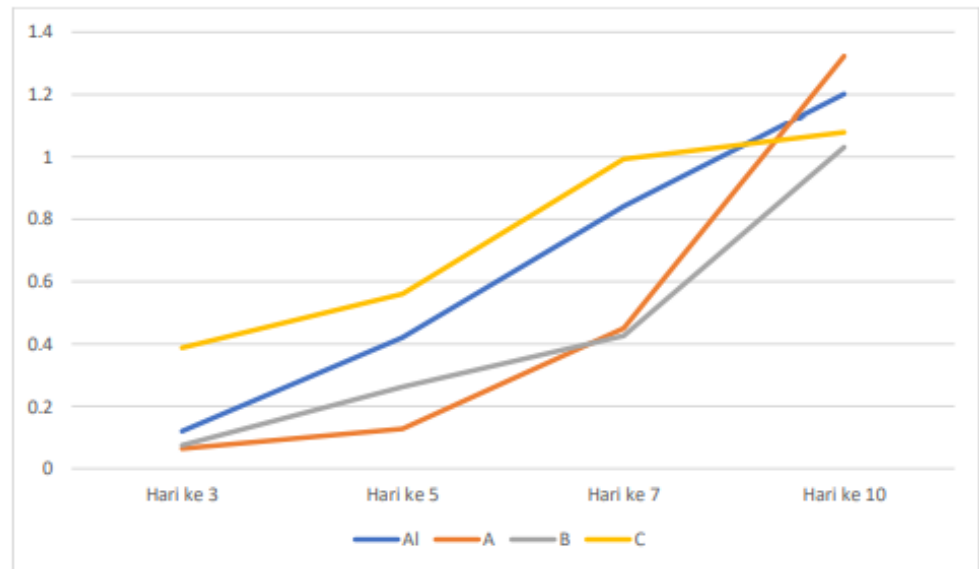
T = Total waktu (*hour*)

Sehingga didapatkan nilai *corrosion rate* untuk masing-masing sampel sebagai berikut.

Tabel 9. *Corrosion rate* hasil pengujian imersi

Sampel	<i>Corrosion rate (mm/year)</i>			
	Hari ke-3	Hari ke-5	Hari ke-7	Hari ke-10
Al	0.119	0.419	0.840	1.201
A	0.064	0.128	0.450	1.323
B	0.074	0.262	0.425	1.030
C	0.387	0.560	0.992	1.078

Dari hasil perhitungan *corrosion rate* diatas dapat diketahui bahwa nilai laju korosi seiring berjalannya waktu pengujian semakin meningkat. Nilai laju korosi sampel dengan paduan *Ytterbium*(Yb) cenderung lebih rendah jika dibandingkan dengan sampel tanpa paduan, terkecuali untuk sampel C dengan kandungan *Ytterbium*(Yb) sebesar 22%. Hal ini dapat terjadi dikarenakan rendahnya akurasi dari pengujian imersi yang hanya berlangsung selama 10 hari.

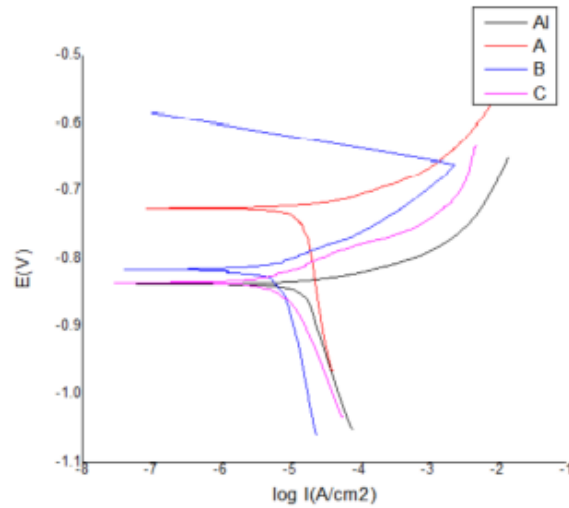


Gambar 12. Grafik laju korosi berdasarkan hasil uji imersi

Pada proses solidifikasi, nukleasi yang terjadi adalah nukleasi heterogen dimana adanya pengotor atau beberapa bahan struktural lain yang mengurangi energi bebas untuk membentuk nucleus yang stabil. Reaksi terjadi secara endoterm dikarenakan adanya energi eksternal yang diberikan. Pada proses nukleasi heterogen, energi Gibbs yang dibutuhkan tidak sebesar pada reaksi homogen. *Ytterbium*(Yb) menjadi zat aktif yang memiliki kecenderungan untuk berkonsentrasi pada permukaan dan membentuk lapisan oksida yang padat dan seragam. Lapisan oksida ini dapat mencegah pengotor ke dalam bagian paduan dan berakibat hilangnya proses oksidasi dan korosi. Dari ukuran butir yang kecil dari penambahan *Ytterbium*(Yb) akan membuat proses pasivasi lebih efisien yang mengakibatkan proses oksidasi aluminium melambat karena potensial bergerak ke arah negatif yang mengakibatkan potensial bergerak ke arah pasivasi ^[12]. Hasil perhitungan laju korosi anoda korban aluminium dengan penambahan *Ytterbium*(Yb) menunjukkan hasil yang lebih rendah dibandingkan dengan Aluminium tanpa paduan menunjukkan bahwa proses korosi dikendalikan oleh reaksi katodik sehingga terjadi penurunan kadar oksigen. Hal ini mengakibatkan menurunnya laju korosi dan meningkatnya ketahanan korosi ^[13].

3.6. Hasil Pengujian Potensiostat

Pengujian Potensiostat dilakukan dengan menghubungkan 3 elektroda yang berupa grafit, SCE, dan anoda korban serta menggunakan larutan elektrolit NaCl yang kemudian dianalisis menggunakan *CorrTest* dan *software* CS Studio5. Pengujian dilakukan di laboratorium korosi dan kegagalan Departemen Teknik Material dan Metalurgi ITS. Pengujian Potensiostat dilakukan untuk mengetahui grafik dan laju korosi dari sampel Al tanpa campuran, Sampel A, Sampel B, dan Sampel C. Dari hasil pengujian potensiostat didapatkan grafik seperti pada gambar 13 sebagai berikut.



Gambar 13. Grafik perbandingan hasil pengujian potensiostat sampel Al, A, B, dan C

Gambar 13 menunjukkan diagram Evans yang diperoleh dengan memplot tabel pendekatan kurva polarisasi untuk kedua reaksi katodik dan anodik dari suatu grafik. Nilai potensial korosi (E_{corr}) dan Rapat arus korosi (I_{corr}) diperoleh dari persimpangan antara dua kurva. Dapat dilihat pada gambar bahwa grafik polarisasi tabel untuk sampel B memiliki grafik yang kurang sesuai dengan kriteria pemetaan tabel. Hal ini dapat diakibatkan oleh adanya porositas yang terjadi pada sampel B. Porositas ini dapat terjadi karena adanya shrinkage dan adanya gas yang terperangkap yang terjadi pada daerah interdendritik yaitu daerah yang mengalami pembekuan terakhir. Sehingga pada sampel B, pada potensial rendah pada diagram *pourbaix* berada di wilayah aktif. Semakin bertambahnya potensial, laju korosi semakin berkurang dan bergeser ke daerah pasif pada diagram *pourbaix* [14].

Tabel 10 menunjukkan Kepadatan arus korosi (I_{corr}) yang diperoleh dari ekstrapolasi tabel. Diperoleh hasil yaitu dengan meningkatnya kandungan *Ytterbium* (Yb), potensial korosi (E_{corr}) cenderung menurun, namun tidak konstan dan untuk nilai kepadatan arus korosi (I_{corr}) cenderung menurun kecuali pada sampel B yaitu dengan kandungan Yb sebesar 21%. Berdasarkan tabel 9 dapat diketahui nilai laju korosi dari anoda korban Aluminium semakin rendah seiring dengan bertambahnya presentase penambahan unsur *Ytterbium* (Yb). Didapatkan nilai laju korosi paling rendah adalah pada sampel B dengan presentase *Ytterbium* (Yb) sebesar 21% memiliki nilai laju korosi sebesar 0.005306 mm/year yang diasumsikan merupakan titik minimal, dikarenakan pada sampel C dengan presentase unsur *Ytterbium* (Yb) sebesar 22% nilai laju korosi mulai meningkat yaitu sebesar 0.14682 mm/year.

Tabel 10. Hasil pengujian potensiostat

Sampel	E_{corr} (v vs sce)	I_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	Corrosion rate (mm/year)
Al-Zn	-0,838	3,130	0.340
Al-Zn-Yb 14%	-0,726	2,878	0.313
Al-Zn-Yb 21%	-0,774	4,871	0.0053
Al-Zn-Yb 22%	-0,835	1,347	0.146

Sampel Al tanpa penambahan *Ytterbium* (Yb) memiliki nilai laju korosi yang lebih tinggi dan kerapatan arus yang cenderung lebih tinggi jika dibandingkan dengan sampel paduan

Al-Zn-Yb. Hal ini menunjukkan bahwa sampel Al tanpa tambahan *Ytterbium*(Yb) tidak dapat menahan reaksi korosi yang terjadi di permukaan aluminium karena memiliki nilai tahanan polarisasi yang rendah ^[15].

3.7. Hasil Pengujian Potensial

Pengujian potensial dilakukan dengan menghubungkan multimeter ke elektroda referensi Ag/AgCl yang kemudian dihubungkan pada anoda dan katoda. Anoda dan katoda dihubungkan menggunakan kabel dan dicelupkan kedalam larutan elektrolit NaCl 3,5%. Kemudian dilakukan pengukuran potensial anoda sesuai hasil yang tertera pada multimeter. Setelah didapat nilai potensial dihitung juga laju konsumsi anoda untuk mengetahui kemampuan anoda korban paduan Al-Yb dalam memproteksi katoda di lingkungan air laut.

Tabel 11. Hasil perhitungan potensial anoda dan laju konsumsi anoda

Sampel	Potensial (mv)	Laju konsumsi anoda (kg/ay)
Aluminium	-588	0,00003
A	-686	0,00026
B	-670	0,00171
C	-821	0,00008

Berdasarkan Tabel 11 diketahui nilai potensial anoda korban semakin bergeser menjadi negatif seiring dengan bertambahnya presentase penambahan unsur *Ytterbium*(Yb). Didapatkan nilai potensial paling negatif adalah pada sampel C dengan presentase penambahan unsur *Ytterbium*(Yb) sebesar 22%. Sedangkan untuk nilai laju konsumsi anoda cenderung naik seiring dengan bertambahnya unsur *Ytterbium*(Yb) pada paduan yaitu didapatkan nilai maksimum laju konsumsi anoda adalah pada sampel B yaitu dengan laju konsumsi anoda 0,001711277 kg/AY ^[16]. Tabel 11 menunjukkan nilai potensial dari sampel Al, A, dan B memiliki nilai potensial yang kurang dari kriteria anoda korban yaitu sebesar -800mV, hal ini menunjukkan anoda korban Aluminium tanpa paduan tidak dapat memproteksi katoda. Begitu juga dengan anoda korban dengan paduan *Ytterbium* sebesar 14% dan 21%. Hanya anoda korban dengan penambahan unsur *Ytterbium*(Yb) sebesar 22% yang dapat memproteksi katoda karena memiliki nilai potensial yang sesuai dengan kriteria anoda korban.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan dengan penambahan unsur tanah jarang *Ytterbium* (Yb) pada anoda korban Aluminium, dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut

1. Pengaruh penambahan unsur tanah jarang *Ytterbium* (Yb) dengan presentase 14%, 21%, dan 22% terhadap proses solidifikasi paduan Aluminium adalah dapat menghasilkan ukuran butir yang semakin kecil dan halus. Unsur *Ytterbium* (Yb) diindikasikan berperan sebagai grain refiner.
2. Pengaruh penambahan unsur tanah jarang *Ytterbium* (Yb) dengan presentase 14%, 21%, dan 22% terhadap laju korosi anoda korban aluminium adalah penambahan unsur *Ytterbium* (Yb) dapat menurunkan nilai laju korosi anoda korban aluminium dengan nilai laju korosi paling rendah adalah sampel B dengan presentase Yb 21% memiliki nilai laju korosi sebesar 0,005 mm/year pada uji potensiostat. Sedangkan untuk uji imersi selama 10 hari didapatkan nilai laju korosi paling rendah juga merupakan sampel B dengan presentase Yb 21% yaitu sebesar 1.030 mm/year.

3. Pengaruh penambahan unsur tanah jarang *Ytterbium* (Yb) dengan presentase 14%, 21%, dan 22% terhadap potensial anoda korban adalah penambahan unsur *Ytterbium* (Yb) dapat menaikkan nilai potensial anoda korban aluminium di lingkungan air laut. Didapatkan hanya anoda korban dengan paduan *Ytterbium* (Yb) 22% yang memiliki nilai potensial diatas kriteria yaitu sebesar -821 mV. Sehingga dapat disimpulkan hanya anoda korban dengan paduan *Ytterbium* (Yb) 22% yang dapat memproteksi katoda.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] National Energy Board, “*Stress Corrosion Cracking on Canadian Oil and Gas Pipelines.*” MH-2-95, NEB, Calgary, Alberta, Canada, 1996.
- [2] Sadawy, M., Saad, S., and Abdel-karim, R., “Effect of Zn/Mg ratio on cathodic protection of carbon steel using Al–Zn–Mg sacrificial anodes”, v. 30, n. 8, pp. 2067-2078, 2020.
- [3] Mathiesen, T., Black, A., and Gronvold, F., “Monitoring and inspection options for evaluating corrosion in offshore wind foundations”, In: Corrosion 2016.
- [4] Iqbal, A.H., “Pengaruh Penambahan Elemen Paduan Logam Tanah Jarang Neodimium Terhadap Proses Solidifikasi Anoda Korban Paduan Al-5Zn-0,5Cu”, Skripsi, Universitas Indonesia, 2018.
- [5] Zhang, X., Wang, Z., Zhou, Z., Xu, J., “Effect of Cerium and Lanthanum on the Corrosion Behaviour of Al 3.0-wt%Mg Alloy. Journal of Materials Engineering and Performance”, Journal of Materials Engineering and Performance, v. 25, pp. 1122-1128, 2016.
- [6] Rakhman, D., “Pengaruh Penambahan Unsur Logam Dispersium(Dy) Terhadap Mikrostruktur dan Sifat Korosi Paduan Al-Zn-Sn Sebagai Kandidat Anoda Korban”, Skripsi, Universitas Indonesia, 2021.
- [7] Ardiansyah, M.H., "Studi Pengecoran Aluminium dengan Metode Sand Casting dan Centrifugal Casting terhadap Komposisi Kimia, Massa Jenis, Porositas, dan Struktur Mikro", Skripsi, Universitas Muhammadiyah Surakarta, 2020.
- [8] Hou, X., Gao, L., Cui, Z., and Yin, J., “Corrosion and Protection of Metal in the Seawater Desalination” In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, v.108, no.2, 2018.
- [9] Zou, Y., Yan, H., Yu, B., and Hu, Z., “Effect of rare earth Yb on microstructure and corrosion resistance of ADC12 aluminum alloy”, Intermetallics, vol. 110, p. 106487, 2019.
- [10] Britton, J., and Taylor, M.L., “Advancements in Cathodic Protection of offshore structures. in Woodhead Publishing Series in Energy”, Trends in Oil and Gas Corrosion Research and Technologies, pp.593-612, 2017.
- [11] Nguyen, V.N., and Blum, L., “Reversible fuel cells. in Compendium of Hydrogen Energy”, pp.115-145, 2016.
- [12] Alif, Z.A., “Pengaruh Penambahan Logam Tanah Jarang terhadap Laju Korosi dan Konduktivitas”, Skripsi, Universitas Indonesia, 2022.
- [13] Yang, H., et al., “Evaluating simulations of interhemispheric transport: Interhemispheric exchange time versus SF6 age”, Geophysical Research Letters, 2019.
- [14] Santos, W.J., Brasil, S.L.D.C., Santiago, J.A.F., and Telles, J.C.F., “A new solution technique for cathodic protection systems with homogeneous region by the boundary element method”, European Journal of Computational Mechanics, v.27, pp.368-382, 2018.

- [15] Ukpong, I., Bangboye, O., Soriyan, O., "Synergistic Inhibition of Mild Steel Corrosion in Seawater and Acidic Medium by Cathodic Protection and *Monodora myristica* Using Zinc Anode. International Journal of Corrosion", International Journal of Corrosion, 2018.
- [16] Popov, B.N., "Corrosion engineering : principles and solved problems", Elsevier; 1st edition, 2015.