

## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1. Hasil Pengujian Komposisi Anoda Korban

Penelitian ini menggunakan bahan *Velg* Aluminium, Aluminium Ingot 99,72%, Seng (Zn), dan Indium sebagai bahan utama pembuatan anoda korban. Proses peleburan menggunakan tungku gas dan pengecoran menggunakan metode sand casting. Pengujian komposisi anoda korban dilakukan untuk selanjutnya dilakukan analisis pengaruhnya terhadap karakteristik proteksi anoda korban. Tabel 4.1 menunjukkan komposisi rancangan serta aktual hasil pengujian komposisi kimia menggunakan *X-Ray Fluorescence* (XRF) pada anoda korban.

**Tabel 4.1** Komposisi Kimia Sampel Anoda Korban

Sampel	Elemen (%)								
	Al	Zn	In	Si	Fe	Cu	Cd	Ti	
Rancangan	I	rem.	3,000	0,040	0,120	0,090	0,003	0,002	-
	II	rem.	4,000	0,040	0,120	0,090	0,003	0,002	-
	III	rem.	5,000	0,040	0,120	0,090	0,003	0,002	-
Aktual	I	94,972	2,696	0,033	1,031	1,126	0,024	-	0,024
	II	94,404	3,692	0,008	1,024	0,805	0,004	-	0,023
	III	92,785	5,099	0,040	1,086	0,902	0,000	-	0,022

Dapat dilihat pada Tabel 4.1 menunjukkan tiga variasi komposisi Zn pada sampel I, II, dan III. Komposisi aktual anoda korban memiliki beberapa perbedaan dengan komposisi rancangannya. Perbedaan komposisi ini dapat disebabkan oleh proses peleburan dimana didalamnya terdapat proses pengadukan menggunakan batang pengaduk dan mesin bor yang kurang merata sehingga paduan tidak mengalami keseragaman komposisi. Perbedaan komposisi rancangan dan aktual

juga dapat disebabkan oleh proses pengadukan yang cepat sehingga paduan aluminium mengalami reaksi oksidasi dengan udara yang menyebabkan oksida tersebut terpisah sebagai lapisan diatas aluminium sehingga berkurang konsentrasinya ketika proses pengecoran.

Komposisi aktual Zn pada sampel I yaitu 5,099% Zn mencapai komposisi rancangan Zn pada sampel tersebut, sedangkan komposisi aktual Zn pada sampel II yaitu 3,692% Zn dan III yaitu 2,696% Zn tidak mencapai komposisi rancangan Zn sampel tersebut. Akan tetapi, komposisi aktual Zn sampel II dan III masih memenuhi standar DNV-RP-B401 maka kedua sampel tersebut diterima dan tetap dilakukan pengujian galvanik dan tafel polarisasi untuk mengetahui karakteristik proteksi anoda korban.

Hasil komposisi aktual In pada sampel I yaitu 0,04% In dan sampel III yaitu 0,033% In memenuhi standar DNV-RP-B401 yaitu 0,015-0,04% In, namun pada sampel II tidak memenuhi standar yaitu 0,008% In. Ketidaksesuaian komposisi aktual ini dapat disebabkan kesalahan pada saat proses pengadukan manual atau penuangan yang dapat menyebabkan paduan tidak homogen. Namun perbedaan ini dapat diterima, karena fokus penelitian ini adalah pengaruh kadar Zn. Perbedaan komposisi aktual In ini pun dapat diteliti pengaruhnya terhadap nilai efisiensi, *open circuit potential* dan laju korosi.

#### **4.2. Hasil Pengujian Galvanik**

Tabel 4.2 menampilkan data hasil pengujian galvanik anoda korban. Tabel 4.2 menunjukkan data berupa arus sel galvanik antara anoda korban dan katoda baja karbon rendah serta massa hilang terkorosi anoda dari data massa awal dan

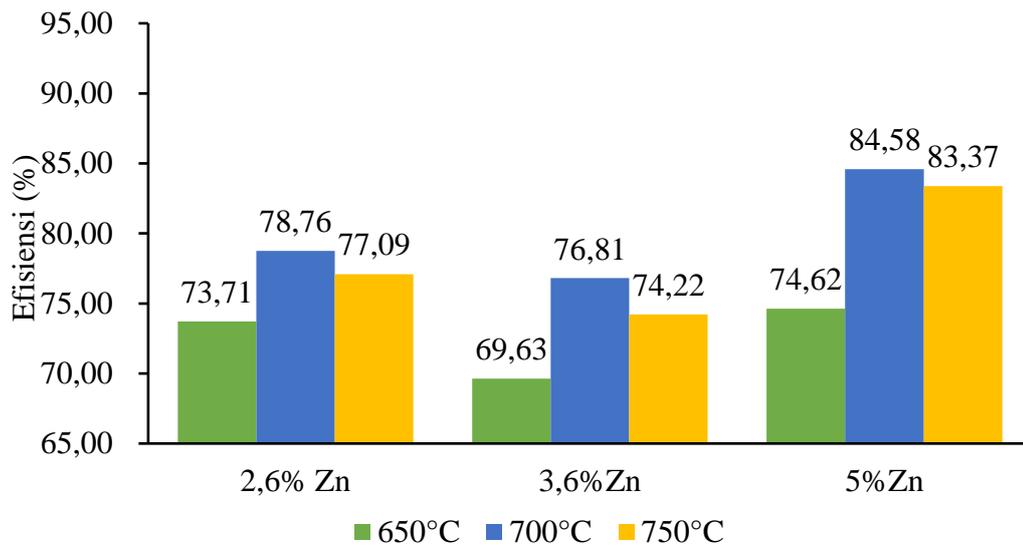
massa akhir anoda setelah dilakukan pengujian selama 240 jam. perhitungan dilakukan untuk menemukan nilai kapasitas arus teoritis menggunakan persamaan 3.3 dan 3.4 serta kapasitas arus aktual dihitung menggunakan persamaan 3.1. Persamaan 3.2 digunakan untuk menghitung efisiensi.

**Tabel 4.2** Data Hasil Pengujian Galvanik

Sampel	Arus (mA)	Massa hilang (g)	Waktu (hour)	Kapasitas		
				Kapasitas (Ah/kg)	teoritis paduan (Ah/kg)	Efisiensi (%)
2,6% Zn 650°C	0,73	0,083	240	2102,40	2852,25	73,71%
2,6% Zn 700°C	0,78	0,083	240	2246,40	2852,25	78,76%
2,6% Zn 750°C	1,13	0,123	240	2198,92	2852,25	77,09%
3,6% Zn 650°C	1,43	0,173	240	1980,00	2843,49	69,63%
3,6% Zn 700°C	0,91	0,100	240	2184,00	2843,49	76,81%
3,6% Zn 750°C	0,85	0,097	240	2110,34	2843,49	74,22%
5% Zn 650°C	1,60	0,183	240	2094,55	2806,78	74,62%
5% Zn 700°C	1,22	0,123	240	2374,05	2806,78	84,58%
5% Zn 750°C	1,30	0,133	240	2340,00	2806,78	83,37%

Kapasitas arus anoda meningkat seiring bertambahnya kandungan Zn pada anoda, Hal ini sesuai dengan penelitian bahwa kadar 5% Zn merupakan kadar dengan nilai kapasitas arus tertinggi sebelum menurun pada kadar 6% Zn. Kadar In dalam anoda juga mempengaruhi nilai kapasitas arus yang akan mempengaruhi nilai efisiensi anoda korban. Kadar In dengan nilai kapasitas arus tertinggi yaitu 0,04% In [44].

Grafik perbandingan antara sampel anoda dan nilai efisiensi dapat dilihat pada Gambar 4.1.



**Gambar 4.1** Grafik Perbandingan Kadar Zn dan Temperatur Penuangan Terhadap Nilai Efisiensi Anoda

Gambar 4.1 menampilkan grafik perbandingan antara kadar Zn dan nilai efisiensi anoda korban. Nilai efisiensi tertinggi sampai terendah secara berurutan yaitu pada anoda dengan kadar 5% Zn, 2,6%Zn, dan 3,6%Zn. Urutan nilai efisiensi ini juga tetap pada variasi temperatur tuang lainnya. Anoda korban dengan kadar 5% Zn merupakan anoda terbaik karena memiliki nilai efisiensi tertinggi. Nilai efisiensi anoda korban akan sangat dipengaruhi oleh kadar Zn, semakin besar kadar Zn terlarut dalam anoda, maka Efisiensi anoda korban akan meningkat. Kadar In juga memiliki peranan besar dalam peningkatan efisiensi, semakin tinggi kadar In maka efisiensi akan meningkat [44]. Pengaruh In dapat terlihat pada Gambar 4.1 pada nilai efisiensi anoda Al-3,6% Zn-0.008%In yang merupakan anoda dengan kadar In paling rendah dan efisiensi paling rendah, maka perlu dilakukan upaya peningkatan kadar In mencapai standar DNV-RP-B401 yaitu 0,015-0,04% In.

Penurunan efisiensi anoda korban seiring dengan menurunnya kadar Zn dapat disebabkan oleh terjadinya pasivasi aluminium pada permukaan anoda.

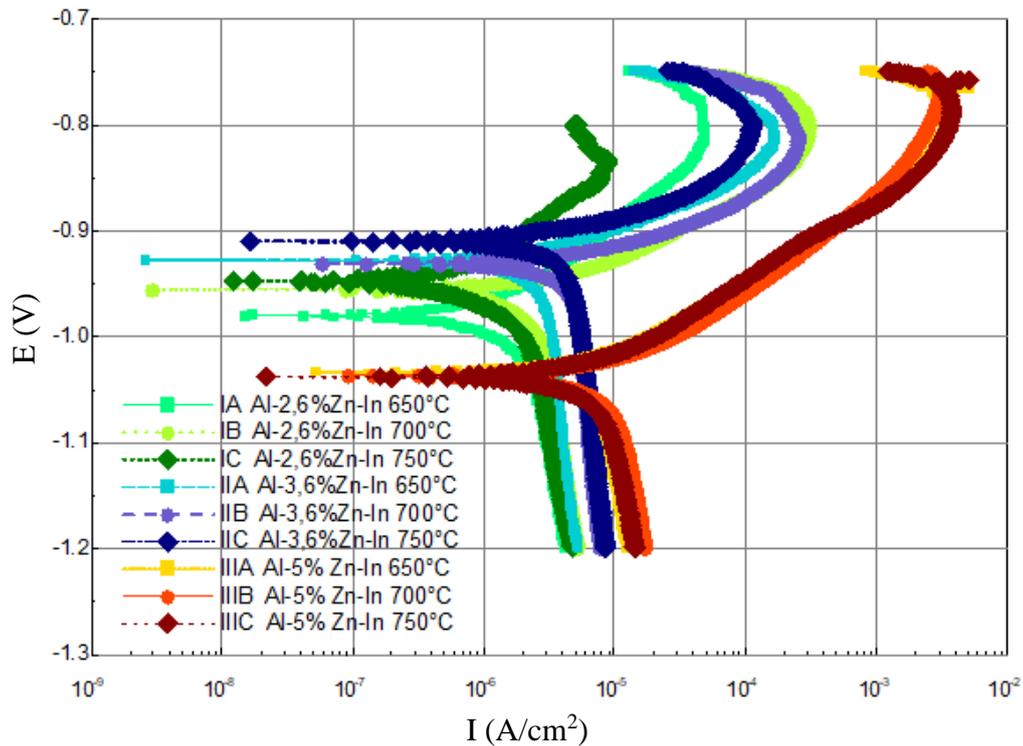
Pasivasi ini terjadi karena pembentukan lapisan oksida yang stabil, seperti aluminium oksida ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), pada permukaan anoda ketika terekspos lingkungan air laut. Lapisan pasif ini dapat menghambat transfer elektron dan mengurangi aktivitas elektrokimia anoda, sehingga kapasitas arusnya menurun. Akibatnya, anoda menjadi kurang efektif dalam memberikan perlindungan terhadap katoda. Fenomena ini juga dipengaruhi oleh komposisi kimia dan mikrostruktur anoda. Zinc (Zn) berfungsi sebagai elemen alloy yang dapat meningkatkan aktivitas elektrokimia dengan cara menghambat pembentukan lapisan pasif. Penurunan kadar Zn dalam paduan aluminium mengurangi efek ini, sehingga pasivasi lebih mudah terjadi [41].

Gambar 4.1 juga menampilkan perbandingan temperatur penuangan terhadap nilai efisiensi anoda korban. Nilai efisiensi tertinggi sampai terendah secara berurutan yaitu pada anoda dengan temperatur penuangan  $700^\circ\text{C}$ ,  $750^\circ\text{C}$ , dan  $650^\circ\text{C}$ . Temperatur penuangan  $700^\circ\text{C}$  merupakan temperatur terbaik karena memiliki nilai efisiensi tertinggi. Efisiensi cenderung meningkat terhadap peningkatan temperatur penuangan.

Pada suhu pengecoran yang ideal, diperoleh potensial yang lebih stabil dan efisiensi arus yang lebih baik. Kombinasi suhu pengecoran dan cetakan yang tepat dapat menghasilkan struktur ekuaksial, yang mendukung terjadinya korosi seragam pada anoda. Selain itu, kondisi pengecoran yang mampu mendistribusikan elemen paduan secara merata di zona kaya elemen juga akan meningkatkan efisiensi anoda [45].

### 4.3. Hasil Pengujian Tafel Polarisasi Anoda Korban

Data yang diperoleh dari pengujian tafel polarisasi menggunakan alat potentiostat dan perangkat lunak Corrtest Studio 6 yaitu nilai grafik tafel polarisasi, *open circuit potential* (OCP) (V),  $i_{ba}$  (mA),  $i_{bc}$  (mA),  $i_0$  ( $A/cm^2$ ),  $E_0$  (V), *Corrosion rate* (mm/a). Parameter yang digunakan yaitu dengan rentang  $\pm 450$  mV relatif terhadap *Open Circuit Potential* (OCP vs RE) dan dengan scan rate 5 mV/s. Data yang diperoleh berupa grafik polarisasi rapat arus (I) ( $A/cm^2$ ) terhadap potensial (E) (V) dan OCP (V) dari eksperimen menggunakan alat *potentiodynamic* (Tafel, LRP) dengan cara menekan alat *Experiments > Corrosion test > Potentiodynamic* (Tafel, LPR) > atur parameter > *Run*. Cara tersebut dapat dilihat pada Gambar B.19. Data Laju korosi diketahui dengan pengolahan data menggunakan alat *auto tafel* dengan cara menekan alat *Data fitting > Tafel > Fit Auto Tafel > Fit*. Cara tersebut dapat dilihat pada Gambar B.20. Gambar 4.2 merupakan grafik tafel polarisasi yang dihasilkan dari pengujian.



**Gambar 4.2** Grafik Tafel Polarisasi

Grafik pada Gambar 4.2 menunjukkan kurva anodik dimana terjadi proses oksidasi (kehilangan elektron) yaitu Material (logam) terlarut ke dalam larutan sebagai ion. Kurva anodik bernilai eksponensial naik seiring dengan peningkatan potensial. Grafik tersebut juga memiliki kurva katodik dimana terjadi proses reduksi (penangkapan elektron) yaitu elektron dari anoda korban mengalir ke baja melalui *metallic path*, dan digunakan untuk mendukung reaksi reduksi pada katoda. Kurva katodik bernilai eksponensial turun seiring penurunan potensial. Elektron yang dilepaskan oleh aluminium (anoda) mengalir ke baja (katoda) melalui koneksi konduktor. Elektron ini digunakan dalam reaksi reduksi, sehingga permukaan baja menjadi terpasivasi (tidak mengalami oksidasi).

Data OCP (V) vs SHE didapat dan grafik tafel polarisasi kemudian dianalisa menggunakan perangkat lunak Corrttest Studio 6 sehingga didapatkan nilai

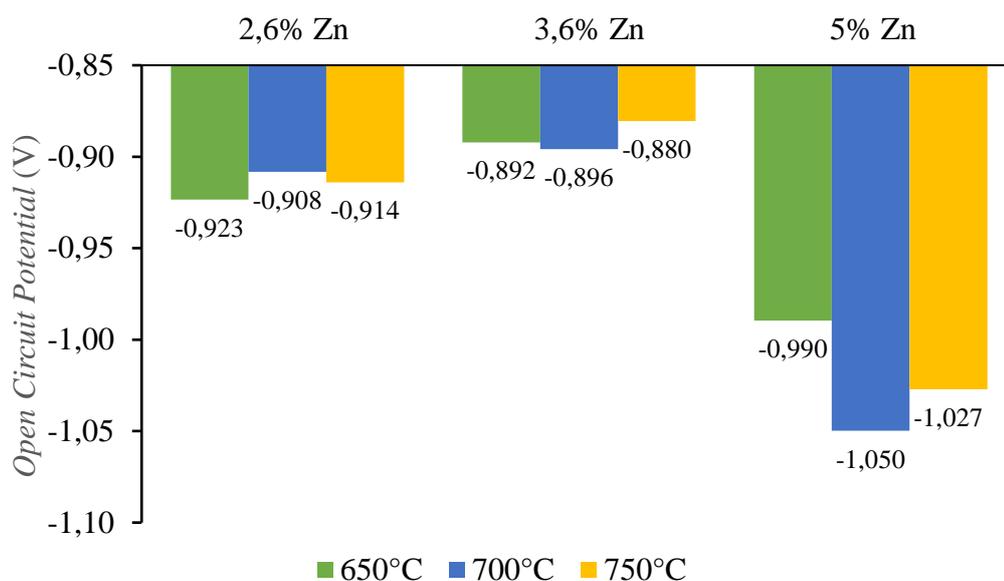
potensial korosi ( $E_{\text{corr}}$ ) dan densitas arus korosi ( $i_{\text{corr}}$ ). Dari data tersebut dihasilkan nilai laju korosi yang dapat dilihat pada Tabel 4.3.

**Tabel 4.3** Data Hasil Pengujian Tafel Polarisasi

Sampel	<i>Open Circuit Potential</i> (V) vs SHE	<i>Corrosion Rate</i> (mm/year)
2,6% Zn 650°C	-0,9235	0,0496
2,6% Zn 700°C	-0,9082	0,0819
2,6% Zn 750°C	-0,9140	0,0538
3,6% Zn 650°C	-0,8922	0,0783
3,6% Zn 700°C	-0,8959	0,1527
3,6% Zn 750°C	-0,8804	0,1369
5% Zn 650°C	-0,9896	0,1602
5% Zn 700°C	-1,0498	0,2495
5% Zn 750°C	-1,0271	0,2370

#### 4.3.1. Analisis Pengaruh Kadar Zn dan Temperatur Penuangan terhadap OCP

Analisis pengaruh kadar Zn dan temperatur penuangan terhadap *open circuit potential* (OCP) pada anoda korban aluminium sangat penting untuk memahami karakteristik proteksi yang dihasilkan. OCP mencerminkan kemampuan anoda untuk melepaskan elektron selama proses proteksi katodik. Semakin negatif nilai OCP, semakin baik kemampuan anoda untuk melindungi logam yang dilindungi. Gambar 4.2 menampilkan grafik pengaruh kadar Zn terhadap OCP (V) vs SHE pada berbagai suhu penuangan.



**Gambar 4.3** Grafik Perbandingan Kadar Seng (Zn) terhadap OCP (V) vs SHE

Dari grafik di Gambar 4.3 terlihat perbandingan antara kadar Zn terhadap nilai OCP anoda. Nilai OCP yang paling negatif, yaitu berkisar antara -1,050 hingga -1,027 V, ditemukan pada kadar Zn yang tinggi (5% Zn). Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan kadar Zn menggeser potensial anoda menjadi lebih aktif. Kondisi ini menjadikan anoda lebih efektif dalam memberikan perlindungan pada logam yang terhubung.

Penambahan Zn ke dalam aluminium memberikan dampak signifikan terhadap perilaku elektrokimia anoda. Seng yang terdistribusi secara homogen di matriks aluminium, atau yang membentuk fase intermetalik tertentu, mampu mencegah terbentuknya lapisan pasif yang biasanya terjadi pada aluminium murni. Lapisan pasif ini, yang terdiri dari oksida aluminium ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), cenderung menghambat reaksi korosi. Dengan adanya seng, aktivitas anodik meningkat karena lapisan pasif tidak terbentuk secara efektif.

Kadar Zn yang tinggi tidak hanya meningkatkan aktivitas anodik tetapi juga mempercepat reaksi korosi seragam. Hal ini dapat memberikan

perlindungan lebih konsisten terhadap korosi galvanik pada logam yang dilindungi. Penemuan ini didukung oleh berbagai studi, termasuk jurnal yang membahas perilaku anodik dari sistem Al-Zn-In pada anoda korban dengan berbagai konsentrasi Zn dan Indium [44]. Studi tersebut menunjukkan bahwa penambahan Zn pada konsentrasi yang tepat dapat menghasilkan anoda korban dengan efisiensi yang lebih tinggi.

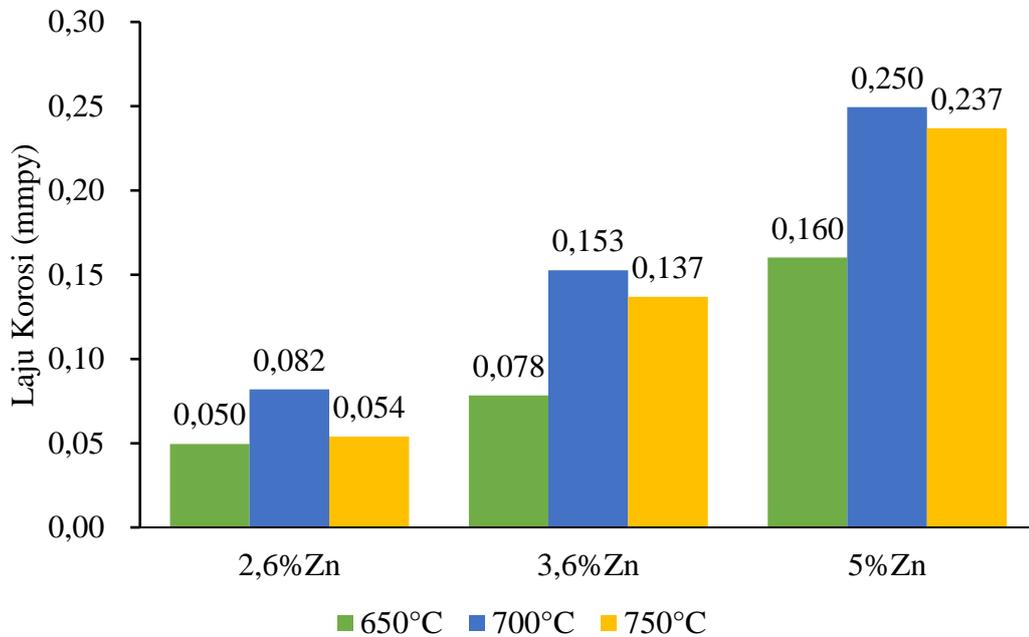
Namun, perlu dicatat bahwa kadar Zn yang terlalu tinggi juga dapat memiliki dampak negatif, seperti mempercepat laju konsumsi anoda. Oleh karena itu, pemilihan kadar Zn yang optimal sangat penting untuk mendapatkan keseimbangan antara aktivitas proteksi dan durabilitas anoda. Di sisi lain, suhu penuangan juga turut memengaruhi distribusi Zn dan fase yang terbentuk, yang akan dibahas lebih lanjut dalam analisis berikut.

#### **4.3.2. Analisis Pengaruh Kadar Zn dan Temperatur Penuangan terhadap nilai Laju Korosi**

Kadar Zn dan temperatur penuangan mempengaruhi pembentukan mikrostruktur material. Mikrostruktur yang terbentuk, seperti ukuran butir dan distribusi fasa, menentukan sifat elektrokimia dan ketahanan korosi material. Gambar 4.4 merupakan grafik perbandingan Kadar Zn dan temperatur penuangan terhadap nilai laju korosi.

Gambar 4.4 menunjukkan bahwa dengan peningkatan kadar Zn, laju korosi semakin meningkat. Anoda dengan kadar 5%Zn memiliki nilai laju korosi tertinggi yaitu 0,160 sampai 0,250 mmpy, anoda dengan kadar 3,6% Zn memiliki nilai laju korosi 0,078 sampai 0,153 mmpy, dan anoda dengan kadar 2,6% Zn memiliki nilai laju korosi 0,050 sampai 0,082 mmpy. Peningkatan

laju korosi seiring dengan peningkatan kadar Zn ini nilainya konstan pada setiap variasi temperatur penuangan. Pada variasi temperatur penuangan lainnya juga terjadi peningkatan laju korosi.



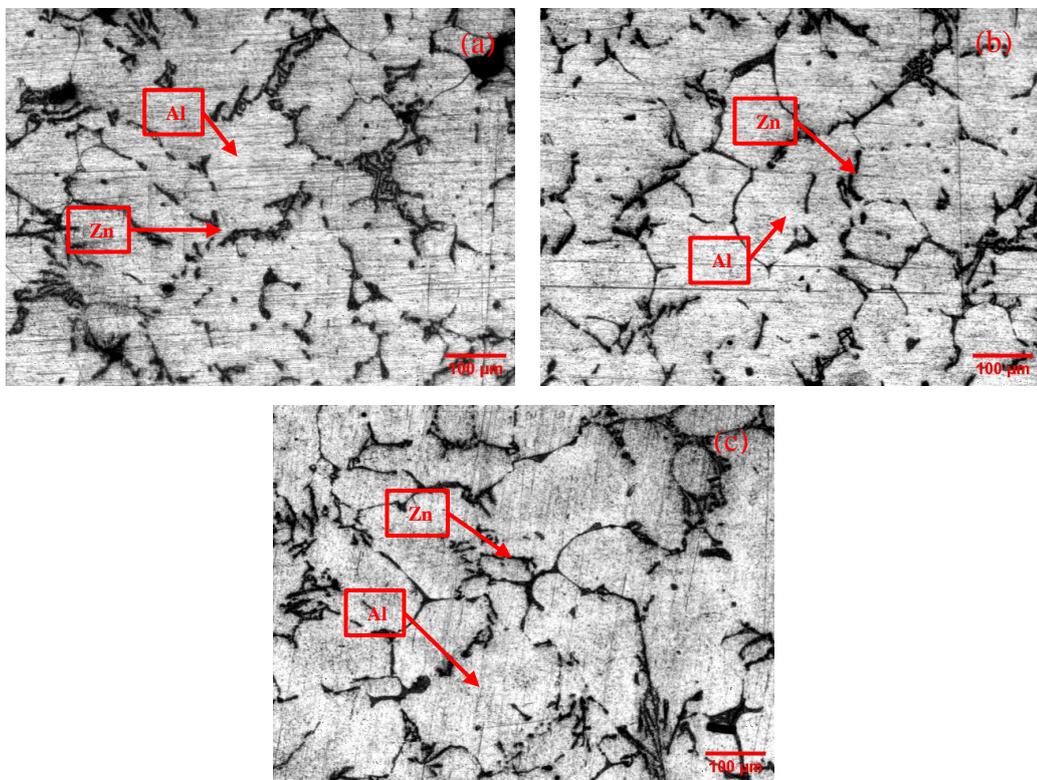
**Gambar 4.4** Grafik Perbandingan Kadar Zn dan Temperatur Penuangan terhadap Laju Korosi

Peningkatan laju korosi yang seiring dengan penambahan kadar Zn dapat dijelaskan melalui mekanisme mikrogalvanik yang terjadi di dalam material anoda. Zn memiliki potensial elektrokimia yang lebih rendah dibandingkan Al, sehingga kehadiran Zn dalam matriks Al menciptakan pasangan galvanik mikro antara kedua unsur ini. Dalam pasangan galvanik mikro, Zn bertindak sebagai anoda lokal yang lebih aktif dibandingkan Al, sehingga meningkatkan laju pelepasan ion logam ke larutan. Fenomena ini disebut sebagai mikrogalvanik, yaitu interaksi elektrokimia skala mikro yang terjadi antara fasa-fasa atau unsur-unsur dalam material.

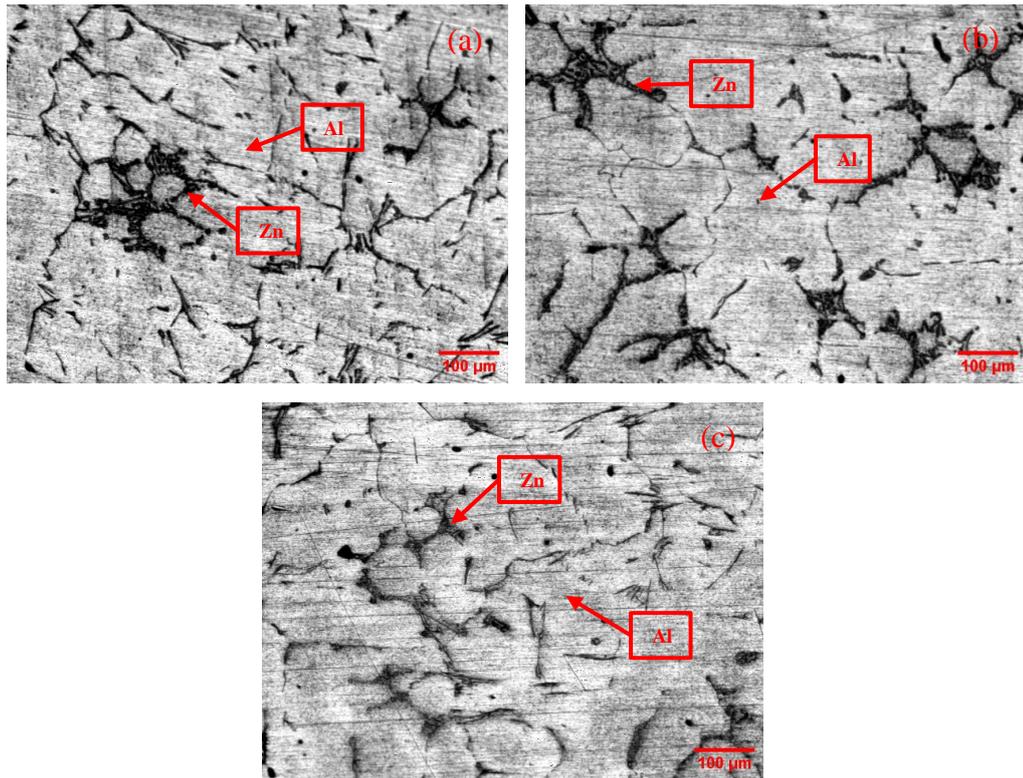
#### 4.4. Hasil Pengujian Metalografi Anoda Korban

Pengujian metalografi dilakukan untuk menganalisis struktur mikro anoda korban, yang merupakan salah satu parameter utama dalam menentukan performa elektrokimia anoda. Struktur mikro memengaruhi sifat-sifat penting seperti homogenitas distribusi unsur, ukuran butir, serta keberadaan dan distribusi fasa-fasa intermetalik. Faktor-faktor ini secara langsung memengaruhi kemampuan anoda dalam melepas elektron, resistensi terhadap pasivasi, dan efisiensi proteksi korosi.

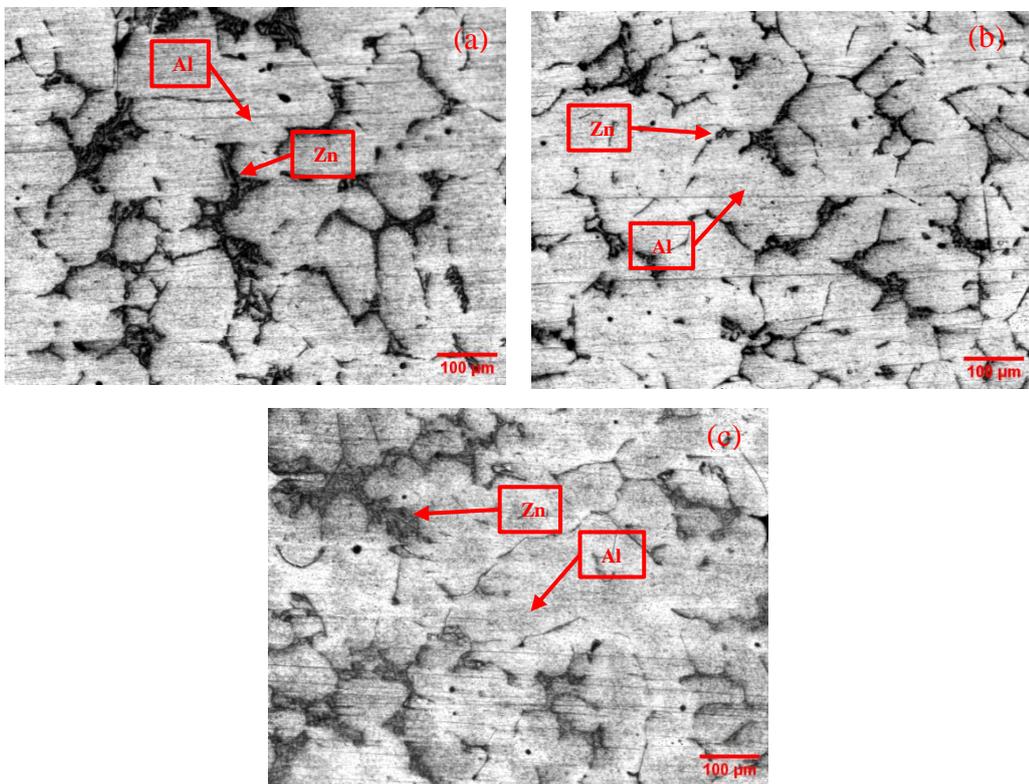
Pengujian ini dilakukan untuk mengevaluasi bagaimana variasi kadar seng (Zn), Indium (In) dan variasi temperatur penuangan memengaruhi struktur mikro. Gambar 4.5, Gambar 4.6, dan Gambar 4.7 merupakan gambar mikrostruktur hasil pengujian metalografi.



**Gambar 4.5** Struktur Mikro Anoda Al-2,6% Zn Temperatur Tuang 650°C (a), 700°C (b), dan 750°C (c) pembesaran 100x



**Gambar 4.6** Struktur Mikro Anoda Al-3,6% Zn Temperatur Tuang 650°C (a), 700°C (b), dan 750°C (c) pembesaran 100x



**Gambar 4.7** Struktur Mikro Anoda Al-5% Zn Temperatur Tuang 650°C (a), 700°C (b), dan 750°C (c) pembesaran 100x

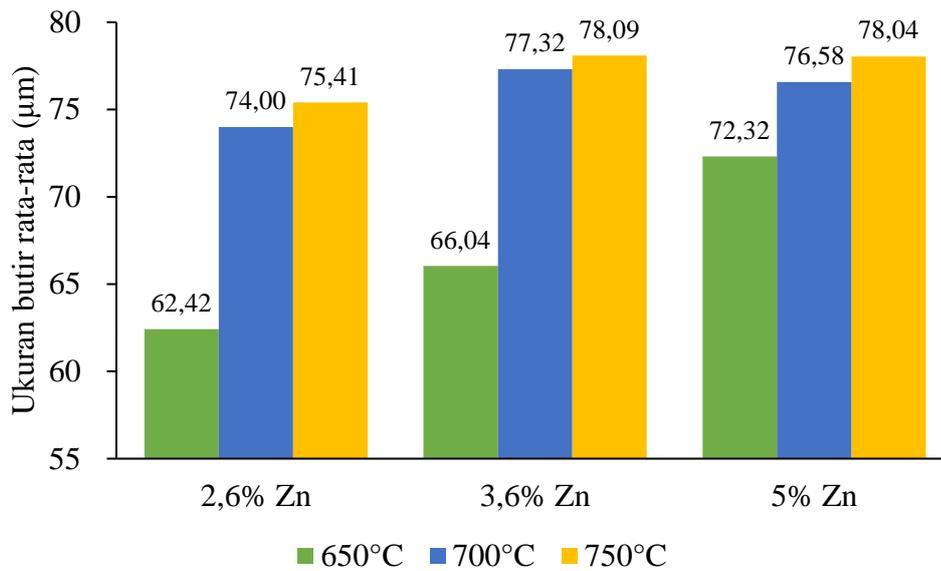
Fasa kaya Al ditunjukkan pada Gambar 4.5, 4.6, dan 4.7 yaitu berwarna putih sedangkan kaya Zn ( $\eta$ ) berada di batas butir fasa kaya Al ( $\alpha$ ) membentuk fasa intermetalik pada gambar berwarna hitam [46].

Gambar struktur mikro tersebut kemudian diproses menggunakan perangkat lunak ImageJ sehingga menghasilkan data berupa distribusi ukuran. Data distribusi ukuran kemudian dilakukan perhitungan rata-rata sehingga didapatkan nilai ukuran butir rata-rata dari fasa Al. Selain ukuran butir rata-rata, dilakukan juga proses pengolahan data untuk mendapatkan nilai fraksi fasa kaya Al dan fasa kaya Zn. Data tersebut dapat dilihat pada tabel 4.4.

**Tabel 4.4** Data Hasil Pengujian Metalografi

Sampel	Ukuran butir rata-rata ( $\mu\text{m}$ )	Fraksi Fasa Al (%)	Fraksi Fasa Zn (%)
2,6% Zn 650°C	62,424	89,29	7,21
2,6% Zn 700°C	73,999	92,27	7,51
2,6% Zn 750°C	75,407	88,84	8,91
3,6% Zn 650°C	66,039	90,44	8,5
3,6% Zn 700°C	77,316	90,42	8,56
3,6% Zn 750°C	78,095	94,78	5,1
5% Zn 650°C	72,319	89,77	9,8
5% Zn 700°C	76,579	92,71	6,6
5% Zn 750°C	78,045	87,81	12,49

Data dari Tabel 4.4 kemudian dapat dibandingkan menggunakan grafik pengaruh kadar Zn dan Temperatur penuangan terhadap ukuran butir rata-rata yang dapat dilihat pada Gambar 4.8.



**Gambar 4.8** Grafik Perbandingan Kadar Zn dan Temperatur Penuangan terhadap Ukuran Butir Rata-Rata

#### 4.2.1. Analisis Struktur Mikro Pengaruh Temperatur Penuangan

Pengaruh temperatur penuangan terhadap struktur mikro dianalisa untuk mengetahui pengaruhnya terhadap proses solidifikasi, homogenisasi melalui fraksi fasa-fasa yang terbentuk, serta ukuran butir rata-rata yang terbentuk pada setiap temperatur penuangan. Gambar 4.5, Gambar 4.6, dan Gambar 4.7 merupakan struktur mikro anoda hasil pengujian metalografi.

Gambar 4.5 merupakan hasil pengujian metalografi dari anoda 2,6% Zn dengan perbedaan temperatur penuangan. Data hasil pada Tabel 4.4 memperlihatkan bahwa persentase fasa kaya Zn ( $\eta$ ) berkurang seiring dengan penurunan temperatur tuang. Penurunan fasa  $\eta$  pada temperatur tuang yang lebih rendah dapat dijelaskan oleh mekanisme solidifikasi. Pada temperatur yang lebih tinggi, cairan logam memiliki waktu solidifikasi yang lebih lama, memungkinkan segregasi Zn yang lebih besar dan pembentukan fasa  $\eta$  dalam jumlah lebih banyak. Sebaliknya, pada temperatur tuang yang lebih rendah, proses solidifikasi berlangsung lebih cepat, menghambat migrasi Zn ke daerah

segregasi, sehingga menghasilkan distribusi yang lebih merata dan jumlah fasa  $\eta$  yang lebih rendah.

Ukuran butir rata-rata juga menunjukkan penurunan dengan menurunnya temperatur tuang. Penurunan ukuran butir ini disebabkan oleh laju pendinginan yang lebih tinggi pada temperatur tuang yang lebih rendah. Laju pendinginan yang cepat membatasi pertumbuhan butir selama solidifikasi, menghasilkan struktur mikro dengan butir yang lebih kecil. Struktur mikro dengan ukuran butir lebih kecil cenderung lebih homogen, yang dapat meningkatkan sifat mekanik material seperti kekuatan dan ketahanan terhadap korosi.

Perbandingan perbedaan temperatur pada sampel anoda dengan kadar 3,6% Zn terlihat pada Gambar 4.6. dan grafik pada Gambar 4.8 yang menunjukkan variasi komposisi fasa kaya Zn ( $\eta$ ) dan fasa kaya Al ( $\alpha$ ) pada temperatur tuang berbeda. Pada temperatur tuang 750°C, jumlah fasa  $\eta$  lebih rendah yaitu 5,1% dibandingkan temperatur 700°C dan 650°C secara berurutan yaitu 8,56% dan 8,5%. Fenomena ini mungkin disebabkan oleh difusi Zn yang lebih dominan ke matriks Al pada temperatur tinggi, sehingga Zn terlarut secara lebih merata dan menghasilkan fasa  $\eta$  yang lebih sedikit. Sebaliknya, pada temperatur tuang 700°C dan 650°C, solidifikasi lebih cepat, sehingga segregasi Zn terjadi lebih signifikan, menghasilkan lebih banyak fasa Zn.

Temperatur tuang yang lebih rendah (650°C) menghasilkan ukuran butir yang lebih kecil. Penurunan ukuran butir ini disebabkan oleh laju pendinginan yang lebih cepat pada temperatur rendah, yang membatasi

pertumbuhan butir selama proses solidifikasi. Sebaliknya, pada temperatur tinggi seperti 750°C dan 700°C, solidifikasi yang lebih lambat memungkinkan pertumbuhan butir yang lebih besar.

Pada temperatur tuang 750°C, meskipun ukuran butir cukup besar, fasa Zn yang lebih sedikit mengindikasikan distribusi Zn yang lebih terlarut dalam matriks Al, sehingga struktur mikro cenderung lebih homogen. Namun, pada temperatur tuang 700°C dan 650°C, lebih banyak fasa  $\eta$  yang terbentuk, dengan ukuran butir yang lebih kecil pada 650°C, menunjukkan distribusi Zn yang lebih terlokalisasi di area segregasi.

Pengaruh Temperatur penuangan dapat terlihat pada Gambar 4.7 dan grafik pada Gambar 4.8. Pada temperatur tuang 750°C, fasa  $\eta$  tercatat paling tinggi (12,49%), yang menunjukkan bahwa pada temperatur ini, proses solidifikasi berlangsung lebih lambat dan lebih banyak Zn yang terpisah membentuk fasa  $\eta$  yang lebih banyak. Pada temperatur 700°C, jumlah fasa  $\eta$  sedikit berkurang (6,60%) dan distribusinya menjadi lebih homogen, dengan lebih banyak fasa  $\alpha$  yang terbentuk. Proses solidifikasi yang lebih cepat pada temperatur ini membatasi segregasi Zn, sehingga lebih banyak fasa  $\alpha$  yang terbentuk. Pada 650°C, fasa  $\eta$  mencapai 9,80%, sedikit lebih banyak dibandingkan pada temperatur 700°C, tetapi tetap lebih sedikit dibandingkan pada 750°C. Di sini, solidifikasi yang lebih cepat mempengaruhi distribusi fasa Zn dan menghasilkan struktur mikro yang lebih seragam, dengan sedikit peningkatan dalam pembentukan fasa Zn.

Terlihat bahwa ukuran butir terbesar terjadi pada temperatur 650°C (80,57  $\mu\text{m}$ ) yang menunjukkan bahwa pada temperatur lebih rendah, proses

pendinginan yang lebih cepat tidak cukup untuk menghambat pertumbuhan butir secara signifikan. Meskipun solidifikasi lebih cepat pada temperatur ini, tetapi ukuran butir lebih besar akibat waktu pendinginan lebih pendek sehingga tidak cukup untuk memperkecil butir. Sebaliknya, pada temperatur 750°C, ukuran butir relatif lebih kecil (74,30  $\mu\text{m}$ ), dengan waktu pendinginan yang lebih lama memungkinkan pembentukan butir lebih terkontrol, walaupun distribusi fasa Zn lebih tinggi.

#### **4.2.2. Analisis Struktur Mikro Pengaruh Kadar Zn**

Analisis perbedaan struktur mikro pada anoda korban dengan variasi kadar Zn berbahan baku velg aluminium dilakukan untuk memahami bagaimana elemen paduan Zn berinteraksi dengan matriks aluminium, baik dalam larutan padat maupun dalam bentuk fasa intermetalik seperti Al-Zn. Analisis ini juga bertujuan untuk memeriksa bagaimana kadar Zn yang berbeda dapat mempengaruhi homogenisasi, distribusi, serta segregasi fasa dalam struktur mikro.

Gambar 4.5a, 4.6a, dan 4.7a menunjukkan struktur mikro anoda korban dengan kadar Zn yang berbeda yaitu 2,6% Zn, 3,6% Zn, dan 5% Zn pada temperatur penuangan 750°C. Pada Tabel 4.4 terlihat bahwa fasa kaya Al ( $\alpha$ ) ditunjukkan dengan warna putih, sedangkan fasa Zn tampak sebagai struktur yang lebih gelap, terutama di batas butir, di mana fasa kaya Zn ( $\eta$ ) dapat membentuk fasa intermetalik dengan matriks aluminium [46].

Pada sampel dengan kadar Zn 5%, tampak bahwa fraksi fasa Zn lebih besar dari komposisi kimia Zn yang terukur pada anoda korban. Hal ini disebabkan oleh proses solidifikasi yang memperlambat pencampuran elemen

dan mengarah pada segregasi Zn yang lebih tinggi di batas butir dan daerah interdendritik. Proses ini menyebabkan adanya konsentrasi Zn lokal yang lebih tinggi dibandingkan dengan rata-rata komposisi Zn yang terukur menggunakan teknik uji komposisi seperti XRF (*X-Ray Fluorescence*). Fasa intermetalik Zn yang terbentuk di area batas butir memiliki karakteristik elektrokimia yang berbeda dengan matriks Al, sehingga dapat menciptakan pasangan mikrogalvanik antara Zn dan Al. Pasangan ini mengarah pada peningkatan laju korosi karena Zn bertindak sebagai katoda dan matriks aluminium sebagai anoda, yang mempercepat reaksi korosi di area tersebut. Distribusi fasa intermetalik Zn yang lebih homogen dapat membantu meningkatkan efisiensi anoda korban, karena memaksimalkan pelepasan ion Zn yang mendukung proses elektrokimia pada anoda.

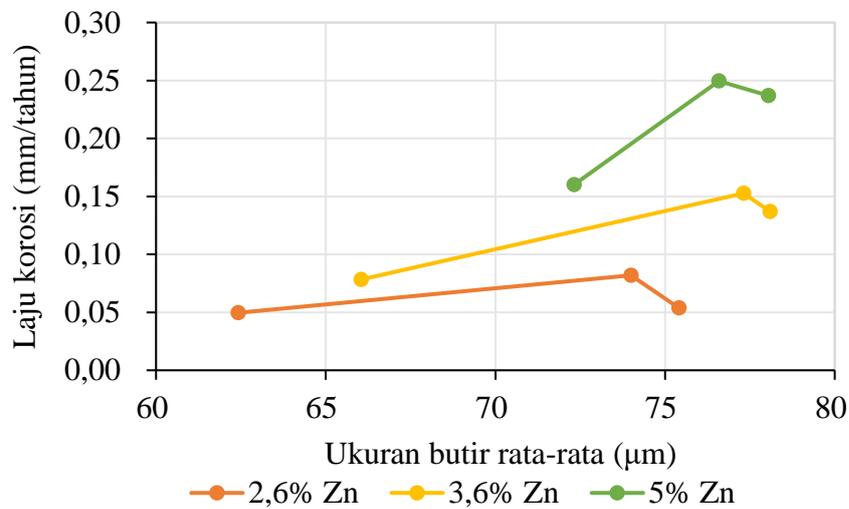
Pada Gambar 4.5b, 4.6b, dan 4.7b, yang menunjukkan struktur mikro pada temperatur penuangan 700°C, terlihat bahwa dengan meningkatnya kadar Zn, fraksi fasa Zn juga meningkat. Namun, pada struktur mikro sampel dengan kadar Zn yang lebih tinggi, seperti pada sampel 5% Zn, terlihat adanya kumpulan fasa intermetalik Zn yang lebih terkonsentrasi pada titik-titik tertentu, yang menyebabkan struktur mikro menjadi tidak sepenuhnya homogen. Keberadaan segregasi fasa Zn ini dapat mempengaruhi kestabilan elektroda, mengakibatkan peningkatan nilai potensial anoda serta peningkatan laju korosi, yang juga terbukti dalam hasil pengujian tafel polarisasi yang menunjukkan kecenderungan korosi yang lebih tinggi pada sampel dengan kadar Zn lebih banyak.

Pada Gambar 4.5c, 4.6c, dan 4.7c, yang menunjukkan struktur mikro pada temperatur penuangan  $650^{\circ}\text{C}$ , terlihat perbedaan yang cukup signifikan. Struktur mikro pada temperatur ini lebih homogen, meskipun konsentrasi fasa intermetalik Zn tetap tinggi pada area batas butir. Pada temperatur yang lebih rendah ini, laju pendinginan lebih cepat, yang mendorong solidifikasi lebih cepat dan lebih seragam, sehingga menghasilkan struktur mikro yang lebih seragam. Hal ini, pada gilirannya, dapat menurunkan laju korosi, karena distribusi fasa Zn yang lebih merata mengurangi kemungkinan terjadinya mikrogalvanik yang lebih ekstrem. Dengan kata lain, fasa Zn yang terdistribusi lebih merata pada temperatur penuangan rendah mengurangi segregasi dan menyebabkan reaksi korosi yang lebih terkontrol dan tidak terlalu agresif.

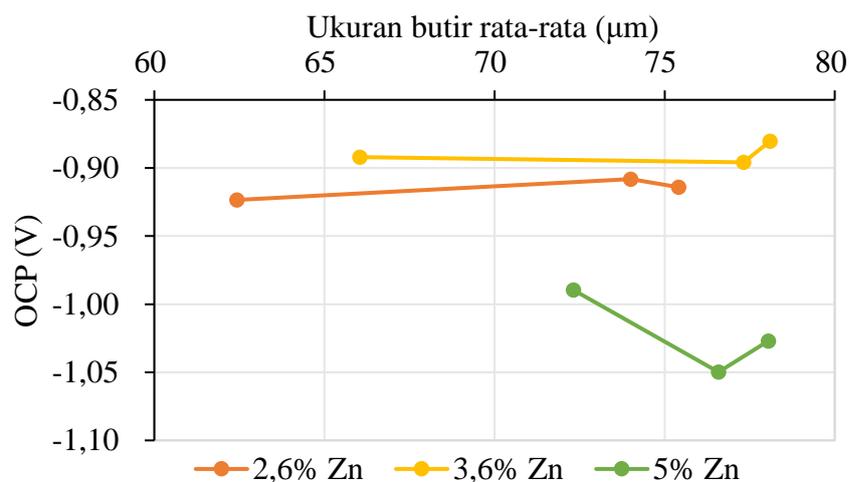
Perbedaan temperatur penuangan serta variasi kadar Zn pada anoda korban memiliki pengaruh yang signifikan terhadap distribusi dan segregasi fasa Zn dalam struktur mikro. Temperatur penuangan tinggi ( $750^{\circ}\text{C}$ ) cenderung menghasilkan struktur mikro yang lebih tidak homogen dengan segregasi fasa Zn yang lebih tinggi di batas butir, yang dapat meningkatkan laju korosi. Temperatur penuangan rendah ( $650^{\circ}\text{C}$ ) cenderung menghasilkan struktur yang lebih homogen, dengan distribusi fasa Zn yang lebih merata, sehingga dapat menurunkan laju korosi. Secara keseluruhan, kadar Zn yang lebih tinggi cenderung meningkatkan segregasi Zn, yang memperburuk distribusi fasa intermetalik dan meningkatkan potensi korosi, sementara kadar Zn yang lebih rendah dengan temperatur penuangan rendah menghasilkan struktur mikro yang lebih stabil dan tahan terhadap korosi.

#### 4.5. Analisis Pengaruh Struktur Mikro Terhadap Karakteristik Proteksi

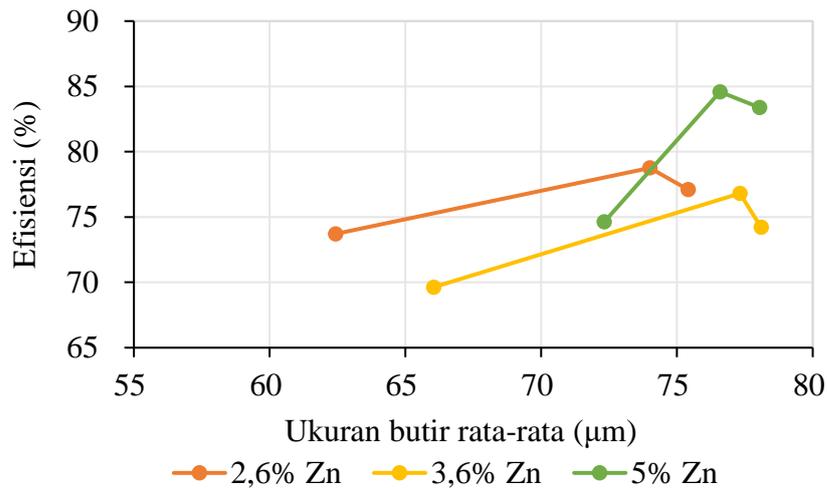
Analisis struktur mikro membantu menjelaskan hubungan antara parameter bahan baku, proses dan karakteristik anoda korban. Analisis ini membandingkan antara ukuran butir rata-rata pada struktur mikro anoda korban dengan karakteristik proteksi anoda korban. Gambar 4.9, Gambar 4.10, dan Gambar 4.11 secara berurutan menunjukkan grafik perbandingan antara ukuran butir rata-rata terhadap nilai laju korosi, nilai OCP, dan nilai efisiensi anoda korban.



**Gambar 4.9** Grafik Ukuran Butir Rata-Rata Terhadap Laju Korosi



**Gambar 4.10** Grafik Ukuran Butir Rata-Rata Terhadap Nilai OCP



**Gambar 4.11** Grafik Ukuran Butir Rata-Rata Terhadap Efisiensi Anoda

Gambar 4.9 menunjukkan hubungan antara ukuran butir rata-rata dengan laju korosi menunjukkan bahwa ukuran butir yang lebih besar cenderung berasosiasi dengan peningkatan laju korosi. Sebagai contoh, pada sampel dengan kadar seng 5%, laju korosi meningkat dari 0,160 mm/tahun pada 650°C (dengan ukuran butir 72,319 μm) menjadi 0,250 mm/tahun pada 700°C (dengan ukuran butir 76,579 μm), yang bertentangan dengan teori yang menyatakan bahwa ukuran butir yang lebih besar harusnya mengurangi laju korosi [47]. Hal ini dapat dijelaskan dengan faktor homogenitas dalam distribusi mikrostruktur material.

Pada ukuran butir yang lebih besar, ketidakseragaman dalam struktur mikro dapat terjadi, baik dalam distribusi fasa maupun komposisi material. Ketidakseragaman ini menyebabkan peningkatan variasi dalam sifat elektrokimia antara berbagai area pada material. Sebagai contoh, pada ukuran butir besar, distribusi fasa yang tidak merata dapat menciptakan konsentrasi elemen tertentu, yang kemudian dapat membentuk sel mikrogalvanik antara batas butir dan interior butir. Ini mengarah pada peningkatan korosi lokal, yang tercermin dalam

peningkatan laju korosi yang tidak sesuai dengan teori yang menyarankan penurunan laju korosi dengan bertambahnya ukuran butir.

Selain itu, pada ukuran butir yang lebih besar, batas butir yang lebih sedikit berfungsi sebagai area yang lebih reaktif secara elektrokimia. Jika batas butir tidak cukup homogen dalam hal distribusi elemen paduan atau tegangan internal, maka area dengan tegangan lebih tinggi atau perbedaan komposisi bisa menjadi lebih rentan terhadap korosi, sehingga meningkatkan laju korosi.

Terlihat pada Gambar 4.10 analisis hubungan antara ukuran butir rata-rata dan nilai OCP pada sampel Al-Zn menunjukkan beberapa tren menarik. Pada sampel dengan kadar Zn 2,6%, peningkatan ukuran butir dari 62,424  $\mu\text{m}$  pada 650°C ke 75,407  $\mu\text{m}$  pada 750°C menghasilkan sedikit fluktuasi dalam nilai OCP, dengan perubahan dari -0,923 V menjadi -0,914 V. Ini menunjukkan bahwa pada kadar Zn ini, perubahan ukuran butir tidak terlalu signifikan memengaruhi OCP. Namun, pada sampel dengan kadar Zn 3,6%, peningkatan ukuran butir dari 66,039  $\mu\text{m}$  pada 650°C ke 78,095  $\mu\text{m}$  pada 750°C menunjukkan sedikit penurunan nilai OCP dari -0,892 V ke -0,880 V, yang mencerminkan kecenderungan material untuk sedikit lebih tahan terhadap korosi.

Sebaliknya, pada sampel dengan kadar Zn 5%, peningkatan ukuran butir dari 72,319  $\mu\text{m}$  pada 650°C ke 78,045  $\mu\text{m}$  pada 750°C disertai dengan penurunan yang lebih jelas pada nilai OCP dari -0,990 V ke -1,027 V. Ini menunjukkan bahwa ukuran butir yang lebih besar meningkatkan kecenderungan material untuk mengalami korosi. Tren ini konsisten dengan teori bahwa batas butir, yang berfungsi sebagai area anodic, berkurang pada ukuran butir yang lebih besar, meningkatkan aktivitas mikrogalvanik dan menurunkan nilai OCP [48]. Namun,

fluktuasi nilai OCP pada berbagai ukuran butir dan kadar Zn menunjukkan bahwa faktor lain, seperti homogenitas material dan distribusi elemen dalam butir, mungkin juga memainkan peran penting dalam menentukan sifat elektrokimia material.

Gambar 4.11 memperlihatkan efisiensi anoda juga dipengaruhi oleh homogenitas struktur material. Analisis hubungan antara ukuran butir rata-rata dan efisiensi anoda pada sampel Al-Zn menunjukkan beberapa hasil yang tidak sesuai dengan teori yang ada. Secara teori, penyempurnaan ukuran butir pada paduan Al-Zn diharapkan dapat meningkatkan sifat elektrokimia mereka. Butir-butir yang lebih kecil meningkatkan kepadatan batas butir, yang dapat mendorong nukleasi dan pertumbuhan deposit seng yang lebih seragam selama proses anodic. Hal ini seharusnya meningkatkan efisiensi anoda dengan distribusi arus yang lebih baik [49].

Namun, data yang diperoleh menunjukkan bahwa peningkatan ukuran butir justru disertai dengan peningkatan efisiensi anoda pada beberapa sampel. Misalnya, pada sampel dengan kadar Zn 5%, efisiensi anoda meningkat dari 74,62% pada ukuran butir 72,319  $\mu\text{m}$  (650°C) menjadi 84,58% pada ukuran butir 76,579  $\mu\text{m}$  (700°C), meskipun ukuran butir menjadi lebih besar.

Kesesuaian ini dapat dijelaskan dengan faktor homogenitas material. Ukuran butir yang lebih besar mungkin mengindikasikan homogenitas yang lebih baik dalam distribusi seng di dalam butir, yang dapat meningkatkan kinerja elektrokimia keseluruhan. Homogenitas yang lebih baik bisa mengurangi area dengan konsentrasi seng yang rendah atau tinggi, sehingga memungkinkan pelepasan ion logam yang lebih konsisten dan mengurangi fluktuasi arus lokal,

yang pada akhirnya meningkatkan efisiensi anoda meskipun ukuran butir lebih besar. Dengan demikian, meskipun teori menyatakan bahwa butir yang lebih kecil dapat meningkatkan efisiensi anoda, hasil yang tidak sesuai ini menunjukkan bahwa faktor lain, seperti homogenitas material, juga memainkan peran penting dalam menentukan efisiensi anoda dalam paduan Al-Zn.

Secara keseluruhan, meskipun ukuran butir yang lebih besar diharapkan dapat mengurangi laju korosi berdasarkan teori, faktor homogenitas dalam distribusi mikrostruktur material dapat mempengaruhi hasil ini. Ketidakteraturan dalam distribusi fasa dan batas butir yang lebih sedikit mungkin memperburuk potensi korosi, yang tercermin dalam laju korosi yang lebih tinggi pada ukuran butir yang lebih besar.