

BAB IV

HASIL PENELITIAN

4.1 DATA KARAKTERISTIK TANAH

4.1.1 Data Resistivitas Tanah

Pengujian resistivitas tanah dilakukan dengan metode *4-Point Ground Resistance* secara langsung terhadap tanah yang diuji (untuk tanah Depok) maupun dengan skala laboratorium atau metode *soil box* (untuk tanah Bekasi). Nilai resistivitas tanah (ρ) didapatkan secara langsung seperti yang terbaca pada layar alat (Ω .cm). Jika nilai resistivitas terlalu tinggi, maka nilai yang terbaca pada layar alat adalah nilai hambatan (R).

Tabel 4.1 Data Resistivitas Tanah

Tanah Bekasi (Soil Box)		Tanah Depok (In-Situ)		
		A (cm)	R (Ω)	ρ (Ω .cm)
ρ_1 (Ω .cm)	1090	100	15,6	9834,48
ρ_2 (Ω .cm)	951	50	28,4	8917,6
$\rho_{rata-rata}$	1020,5	$\rho_{rata-rata}$		9376,04

Pada pengujian resistivitas tanah Depok, didapatkan nilai hambatan (R) sehingga nilai resistivitas (ρ) didapatkan melalui persamaan Wenner seperti yang sudah dibahas pada bab sebelumnya. Contoh perhitungan untuk jarak antar pin (A) 100 cm adalah sebagai berikut :

$$\begin{aligned}\rho &= 2.\pi.A.R \\ &= 2.\pi.(100).(15,6) \\ &= 9834,48 \Omega.cm\end{aligned}$$

4.1.2 Data pH Tanah

Pengujian pH menggunakan *soil tester* dilakukan langsung (insitu) pada tanah yang diuji (Bekasi dan Depok). Pada pengujian ini diambil tiga titik lokasi yang berbeda pada kedalaman 50 cm seperti kondisi penanaman sampel.

Tabel 4.2 Data pH Tanah

Lokasi		Tanah Bekasi	Tanah Depok
pH	Titik 1	6,7	6,9
	Titik 2	6,8	6,8
	Titik 3	5,9	7
pH Rata-Rata		6,47	6,9

4.1.3 Data Moisture Content Tanah

Pengujian kelembaban atau *moisture content* (MC) menggunakan soil tester dilakukan langsung (insitu) pada tanah yang diuji (Bekasi dan Depok). Pada pengujian ini diambil tiga titik lokasi yang berbeda pada kedalaman 50 cm seperti kondisi penanaman sampel.

Tabel 4.3 Data Moisture Content Tanah

Lokasi		Tanah Bekasi	Tanah Depok
MC (%)	Titik 1	50	25
	Titik 2	50	38
	Titik 3	60	25
MC Rata-Rata		53,3	29,3

4.1.4 Komposisi Kimia Tanah

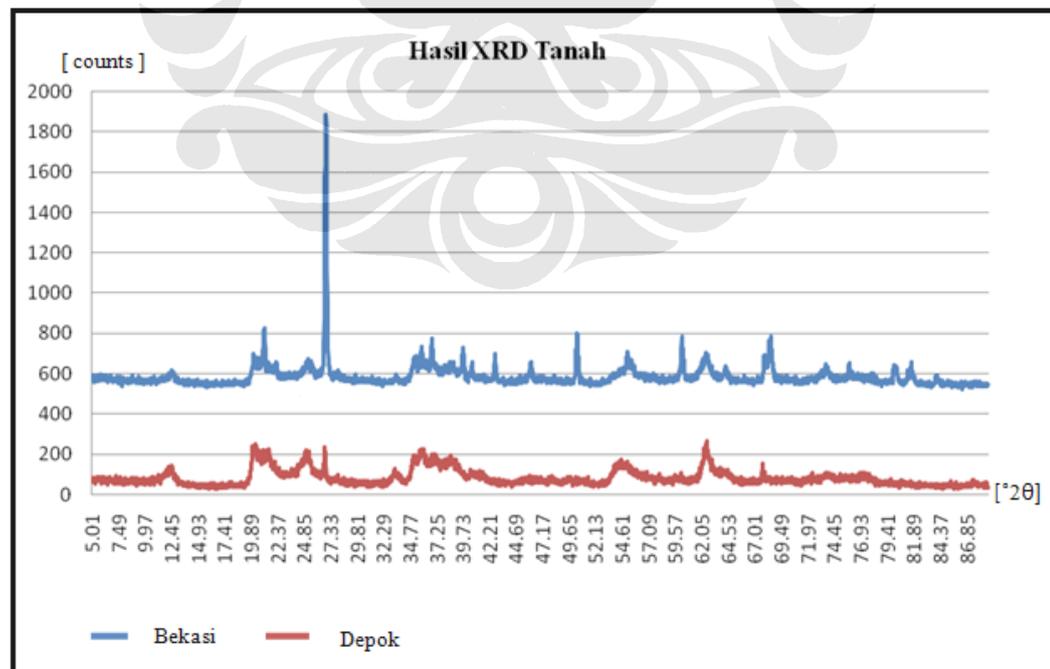
Komposisi kimia tanah dilakukan dengan Energy Dispersive X-Ray Spectrometry (EDS) dan X-Ray Diffraction (XRD). Analisa EDS dilakukan

sebelum analisa XRD untuk memudahkan pengindentifikasian senyawa-senyawa yang terdeteksi di XRD. Data hasil EDS ditunjukkan pada Tabel 4.4 dan grafik hasil XRD ditunjukkan oleh Gambar 4.1. dan Tabel 4.5.

Tabel 4.4 Hasil Uji EDS Tanah

Elemen	Komposisi Elemen (%)	
	Tanah Bekasi	Tanah Depok
C	0,62	0,33
O	46,74	46,91
Al	15,75	22,05
Si	15,32	13,42
S	0,12*	0,23
Ca	2,73	0,21*
Ti	1,60	2,07
Fe	18,11	14,78

* = <2 Sigma



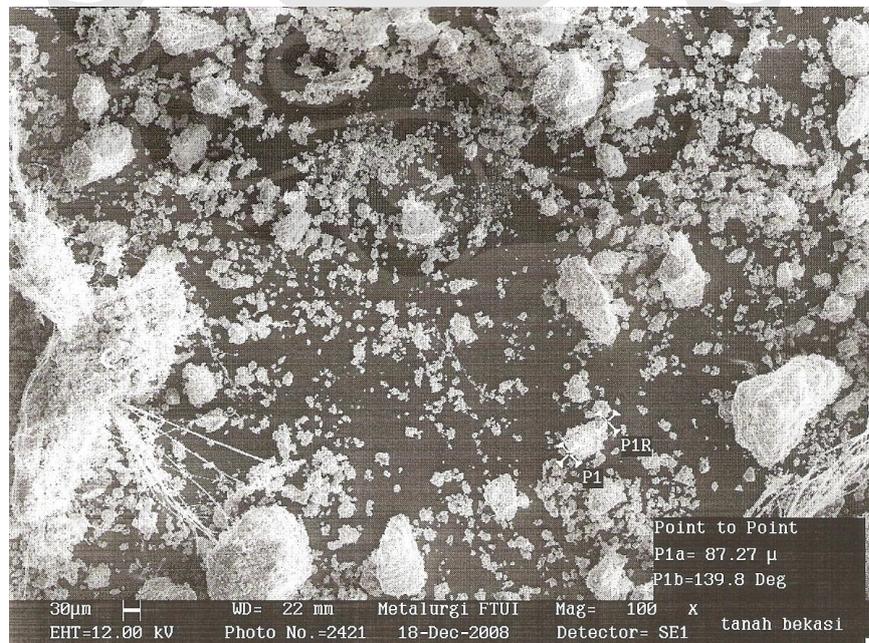
Gambar 4.1 Hasil XRD Tanah

Tabel 4.5 Hasil Uj XRD Tanah

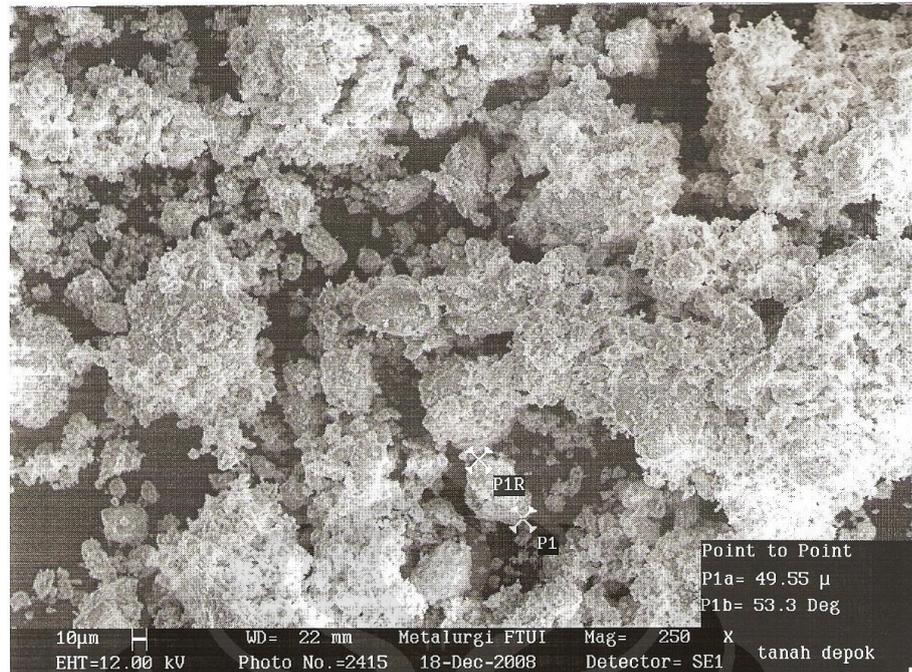
Tanah Bekasi			Tanah Depok		
$^{\circ}2\theta$	Rel. Int (%)	Formula	$^{\circ}2\theta$	Rel. Int (%)	Formula
12.525	6.7	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	12.425	68.9	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$
20.130	12.5	SiO_2	20.020	100.0	SiO_2
26.785	64.5	Al_2SiO_5	26.795	72.2	Al_2SiO_5
35.850	9.0	Fe_2O_3	35.850	53.6	Fe_2O_3
38.7	4.4	Al_2SiO_5	38.680		Al_2SiO_5
50.385	10.2	CaCO_3	-	-	-
62.550	4.0	Fe_2O_3	62.480		Fe_2O_3

4.1.5 Ukuran Butir Tanah

Besar atau ukuran butir tanah pada pengujian ini didapatkan dengan pengukuran pada SEM. Dari pengukuran partikel tersebut, didapatkan besar butir yaitu 87,27 μm untuk tanah di Bekasi dan 49,55 μm untuk tanah di Depok.



Gambar 4.2 Tekstur Partikel Tanah Bekasi (100x)



Gambar 4.3 Tekstur Partikel Tanah Depok (250x)

4.2 DATA PENGUJIAN KOROSI KEHILANGAN BERAT

Pengujian korosi metode ini dilakukan selama sembilan minggu. Setiap tiga minggu, sampel-sampel diangkat untuk dianalisa tingkat kerusakannya.

4.2.1 Kehilangan Berat Sampel *Bare Steel*

4.2.1.1 Data Awal Sampel *Bare Steel*



Gambar 4.4 Sampel *Bare Steel* Sebelum Penanaman

Universitas Indonesia

Data awal sampel *bare steel* digunakan untuk mendapatkan selisih berat dalam perhitungan laju korosi. Secara umum, sampel *bare steel* yang digunakan pada pengujian ini memiliki spesifikasi yang sama, yaitu :

Tabel 4.6 Data Awal Sampel *Bare Steel*

Lokasi & Evaluasi	No	t (mm)	P (mm)	l (mm)	d (mm)	A (mm ²)	m _o (gr)
Bekasi I	1.	5,16	48	31	5,5	3772,168	54,2989
	2.	5,16	50	30	5,5	3806,488	55,6952
	3.	5,16	48	28	5,5	3453,208	48,415
Bekasi II	1.	5,16	48	30	5,5	3665,848	52,1802
	2.	5,16	48	30	5,5	3665,848	54,8769
	3.	5,16	48	28	5,5	3453,208	50,3246
Bekasi III	1.	5,16	50	32	5,5	4027,128	52,1496
	2.	5,16	48	30	5,5	3665,848	49,6727
	3.	5,16	50	28	5,5	3585,848	51,7800
Depok I	1.	5,16	50	30	5,5	3806,488	52,6047
	2.	5,16	46	30	5,5	3525,208	49,3743
	3.	5,16	50	30	5,5	3806,488	54,2008
Depok II	1.	5,16	50	30	5,5	3806,488	55,6312
	2.	5,16	48	28	5,5	3453,208	46,9017
	3.	5,16	50	29	5,5	3696,168	53,2784
Depok III	1.	5,16	48	30	5,5	3665,848	52,1749
	2.	5,16	50	29	5,5	3696,168	52,5886
	3.	5,16	50	30	5,5	3806,488	55,7015

t (tebal) ; p (panjang) ; l (lebar) ; A (luas permukaan) ; m_o (berat awal)

Contoh perhitungan luas permukaan sampel yang terekspos tanah yaitu :

$$\begin{aligned}
 A &= 2 \times (p \times l) + 2 \times (l \times t) + 2 \times (p \times t) + (t \times d) - 2 \times (1/4 \times \pi \times d^2) \\
 &= 2 \times (48 \times 31) + 2 \times (31 \times 5,16) + 2 \times (48 \times 5,16) + (5,16 \times 5,5) - 2 \times (1/4 \times \pi \times 5,5^2) \\
 &= 3772,168 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

Sampel yang digunakan pada pengujian ini adalah baja ASTM A53 yang dengan spesifikasi ditunjukkan pada Tabel 4.7. Sedangkan analisa komposisi kimia aktual dari *bare steel* dilakukan dengan analisa Optical Emission Spectroscopy (OES), ditunjukkan pada Tabel 4.8.

Tabel 4.7 Komposisi Kimia Baja ASTM A53

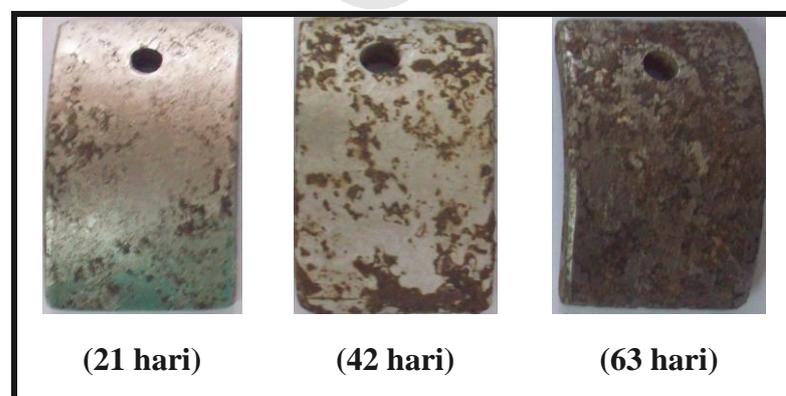
C	Mn	Cu	P	Mo
0,25	0,95	0,40	0,05	0,15
S	Ni	V	Cr	Cu+Ni+Mo+V
0,045	0,40	0,08	0,40	1,00

Tabel 4.8 Hasil Analisa OES Sampel *Bare Steel*

C	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	
0.020 ; < 0.015	1.61	0.011	0.009	0.018	< 0.005	< 0.005	
Al	Si	Co	Cu	Nb	Ti	V	W
0.024	0,015	0.035	0.023	< 0.002	<0.002	0.007	<0.02

4.2.1.2 Data Akhir Sampel *Bare Steel* Bekasi

Data akhir sampel *bare steel* Bekasi didapatkan dari hasil pemendaman dalam tanah selama sembilan minggu. Sampel *bare steel* yang telah terkorosi ditunjukkan pada Gambar 4.3 berikut :



Gambar 4.5 Sampel *Bare Steel* Bekasi Setelah Penanaman

Tabel 4.9 Data Akhir Sampel *Bare Steel* Bekasi

Lokasi & Evaluasi	No	m' (gr)	W (gr)	CR (mpy)	CR rata-rata Per evaluasi
Bekasi I (21 hari)	1.	54,1344	0,1645	3,7978	5,5565
	2.	55,3621	0,3331	7,6210	
	3.	48,2068	0,2082	5,2507	
Bekasi II (42 hari)	1.	51,6885	0,4917	5,8046	6,6399
	2.	54,3436	0,536	6,3668	
	3.	49,7701	0,5545	6,9922	
Bekasi III (63 hari)	1.	51,1095	1,0401	7,4976	5,4011
	2.	48,9148	0,7579	6,0018	
	3.	51,466	0,334	2,7039	
CR rata-rata (keseluruhan)				5,7887	

m' (berat akhir) ; W (berat hilang/weight loss) ; CR (laju korosi/corrosion rate)

Berat hilang pada sampel (W) setelah penanaman didapatkan dari selisih antara berat akhir (m') pada Tabel 4.9 dengan berat awal (m₀) pada Tabel 4.6. Contoh perhitungan laju korosi (CR) antara lain :

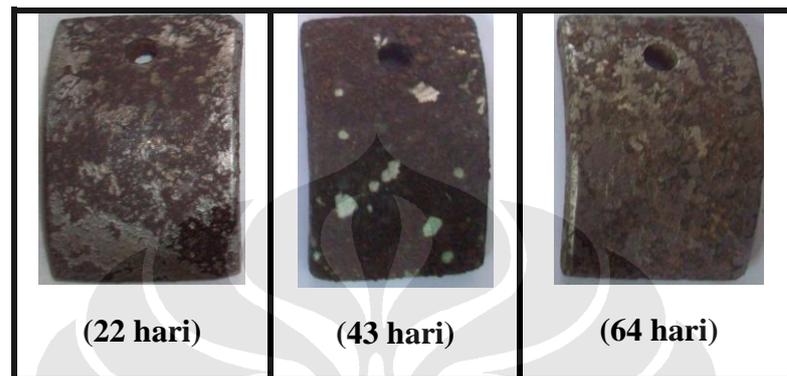
- Sampel Bekasi I (T = 21 hari) no. 1 ; D baja karbon = 7,86 gr/cm³

$$\begin{aligned}
 W &= m_0 - m' \\
 &= 54,2989 - 54,1344 \\
 &= 0,1645 \text{ gr}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 CR &= (3,45 \times 10^6 \times W) / (D \times A \times T) \\
 &= (3,45 \times 10^6 \times 0,1645) / (7,86 \times [3772,17/100] \times [21 \times 24]) \\
 &= 3,79787744 \text{ mpy}
 \end{aligned}$$

4.2.1.3 Data Akhir Sampel *Bare Steel* Depok

Data akhir sampel *bare steel* Depok didapatkan dari hasil pemendaman dalam tanah selama sembilan minggu. Sampel *bare steel* yang telah terkorosi ditunjukkan pada Gambar 4.4 dan laju korosi yang didapatkan dari pengujian ini ditunjukkan pada Tabel 4.10.



Gambar 4.6 Sampel *Bare Steel* Depok Setelah Penanaman

Tabel 4.10 Data Akhir Sampel *Bare Steel* Depok

Lokasi & Evaluasi	No	m' (gr)	W (gr)	CR (mpy)	CR rata-rata Per evaluasi
Depok I (22 hari)	1.	52,0770	0,5270	11,5092	8,9612
	2.	49,0837	0,2906	6,8528	
	3.	53,8106	0,3902	8,5216	
Depok II (43 hari)	1.	55,1111	0,5201	5,8113	5,4212
	2.	46,4436	0,4581	5,6422	
	3.	52,8604	0,418	4,8099	
Depok III (64 hari)	1.	51,6304	0,5445	4,2445	4,1494
	2.	52,1035	0,4851	3,7504	
	3.	55,1083	0,5932	4,4533	
CR rata-rata (keseluruhan)				6,1773	

m' (berat akhir) ; W (berat hilang/*weight loss*) ; CR (laju korosi/*corrosion rate*)

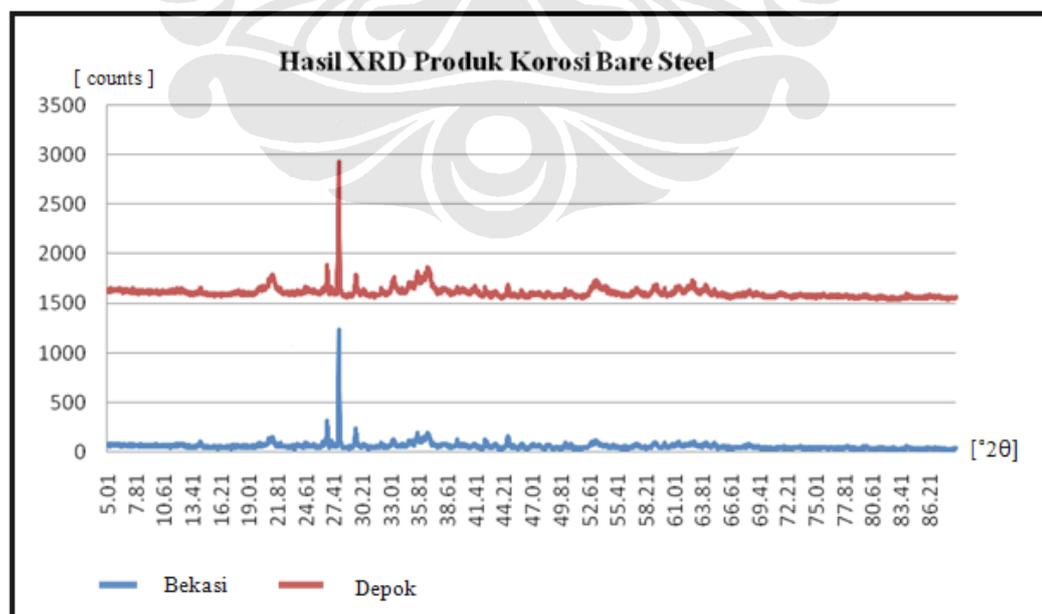
4.2.1.4 Komposisi Kimia Produk Korosi Sampel Bare Steel

Pengujian komposisi kimia produk korosi dari bare steel dilakukan dengan analisa EDS dan XRD. Data hasil EDS ditunjukkan pada Tabel 4.11 dan data hasil XRD ditunjukkan oleh Gambar 4.7 dan Tabel 4.12.

Tabel 4.11 Hasil Uji EDS Produk Korosi Bare Steel

Elemen	Komposisi Elemen (%)	
	Produk Korosi Bekasi	Produk Korosi Depok
C	7,03	0,68
O	37,90	41,86
Al	5,55	12,27
Si	4,79	7,44
S	-	0,27
Ca	3,88	1,61
Fe	40,86	35,87

* = <2 Sigma



Gambar 4.7 Hasil XRD Produk Korosi Bare Steel

Tabel 4.12 Hasil Uj XRD Produk Korosi Bare Steel

Produk Korosi Bare Steel Bekasi			Produk Korosi Bare Steel Depok		
$^{\circ}2\theta$	Rel. Int (%)	Formula	$^{\circ}2\theta$	Rel. Int (%)	Formula
20.955	8.8	SiO ₂	20.125	15.1	SiO ₂
21.300	10.1	Fe ₂ O ₃ .H ₂ O	21.455	36.8	Fe ₂ O ₃ .H ₂ O
26.765	8.3	Fe ₂ O ₃ .H ₂ O	26.745	20.2	Fe ₂ O ₃ .H ₂ O
27.860	100	FeO(OH)	27.755	100	FeO(OH)
29.515	15.1	AlFeO ₃	29.590	13.9	AlFeO ₃
-	-	-	33.355	23.9	FeS
35.620	8.6	Fe ₃ O ₄	35.625	22.9	Fe ₃ O ₄
53.310	2.9	Fe ₂ O ₃ .H ₂ O.H ₂ O	53.110	10.9	Fe ₂ O ₃ .H ₂ O.H ₂ O

4.2.2 Kehilangan Berat Sampel Baja Galvanis

4.2.2.1 Data Awal Sampel Baja Galvanis

**Gambar 4.8** Sampel Baja Galvanis Sebelum Penanaman

Data awal sampel baja galvanis digunakan untuk mendapatkan selisih berat dalam perhitungan laju korosi. Secara umum, sampel baja galvanis yang digunakan pada pengujian ini memiliki spesifikasi yang sama, yaitu :

Tabel 4.13 Data Awal Sampel Baja Galvanis

Lokasi & Evaluasi	No	t (mm)	p (mm)	L (mm)	d (mm)	A (mm ²)	m _o	m _c
Bekasi I	1.	5,16	48	30	5,5	3665,8475	53,9186	1,2861
	2.	5,16	50	30	5,5	3806,4875	52,8566	1,0621
	3.	5,16	50	30	5,5	3806,4875	53,3994	1,1789
Bekasi II	1.	5,16	48	26	5,5	3240,5675	47,4007	1,0914
	2.	5,16	50	28	5,5	3585,8475	51,7856	1,0927
	3.	5,16	51	28	5,5	3652,1675	54,9222	1,4156
Bekasi III	1.	5,16	50	28	5,5	3585,8475	52,7242	1,0591
	2.	5,16	50	28	5,5	3585,8475	50,0945	1,1457
	3.	5,16	50	30	5,5	3806,4875	54,9222	1,1914
Depok I	1.	5,16	50	30	5,5	3806,4875	55,7955	1,1246
	2.	5,16	48	28	5,5	3453,2075	49,7300	0,9160
	3.	5,16	50	28	5,5	3585,8475	53,9591	1,1262
Depok II	1.	5,16	50	30	5,5	3806,4875	54,6509	1,2521
	2.	5,16	50	30	5,5	3806,4875	50,9227	1,0698
	3.	5,16	52	30	5,5	3947,1275	55,5222	1,3657
Depok III	1.	5,16	48	28	5,5	3453,2075	46,1103	1,0902
	2.	5,16	52	30	5,5	3947,1275	56,6053	1,2545
	3.	5,16	50	30	5,5	3806,4875	53,333	1,1215

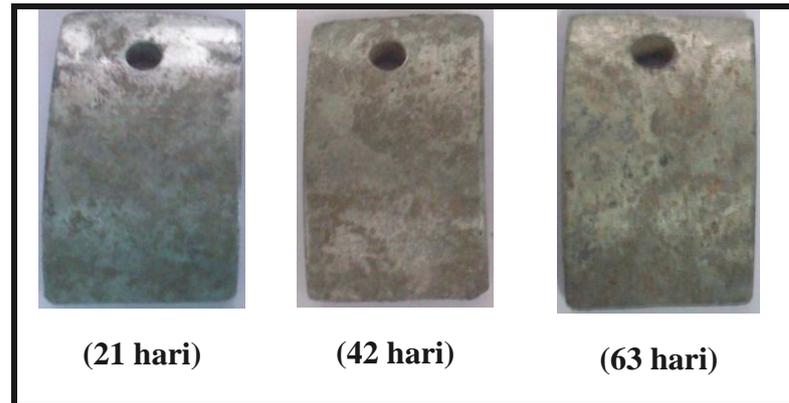
t (tebal) ; p (panjang) ; l (lebar) ; A (luas permukaan) ; m_o (berat awal) ; m_c (berat coating)

4.2.2.2 Data Akhir Sampel Baja Galvanis Bekasi

Tabel 4.14 Data Akhir Sampel Baja Galvanis Bekasi

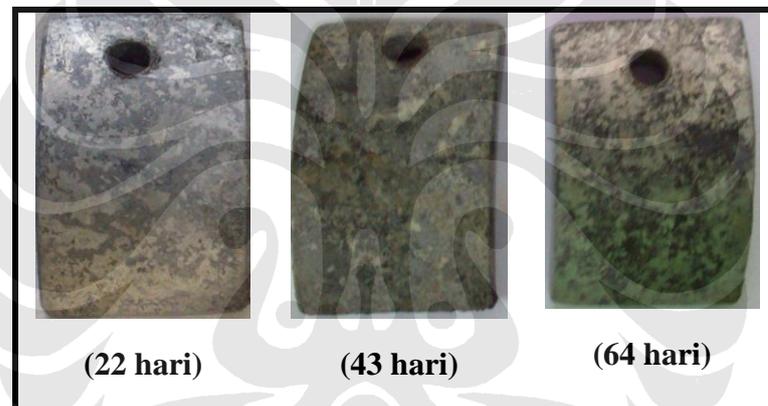
Lokasi & Evaluasi	No	m' (gr)	W (gr)	CR (mpy)	CR rata-rata Per evaluasi
Bekasi I (21 hari)	1.	53,8914	0,0272	0,7123	0,6939
	2.	52,8267	0,0299	0,7541	
	3.	53,3750	0,0244	0,6154	
Bekasi II (42 hari)	1.	47,3663	0,0374	0,5540	0,5656
	2.	51,7613	0,0243	0,3252	
	3.	54,8600	0,0622	0,8175	
Bekasi III (63 hari)	1.	52,6992	0,0250	0,2231	0,5628
	2.	50,0410	0,0535	0,4774	
	3.	54,8047	0,1175	0,9878	
CR rata-rata (keseluruhan)				0,6074	

m' (berat akhir) ; W (berat hilang/weight loss) ; CR (laju korosi/corrosion rate)



Gambar 4.9 Sampel Baja Galvanis Bekasi Setelah Penanaman

4.2.2.3 Data Akhir Sampel Baja Galvanis Depok



Gambar 4.10 Sampel Baja Galvanis Depok Setelah Penanaman

Tabel 4.15 Data Akhir Sampel Baja Galvanis Depok

Lokasi & Evaluasi	No	m' (gr)	W (gr)	CR (mpy)	CR rata-rata Per evaluasi
Depok I (22 hari)	1.	55,7612	0,0383	0,9220	0,6178
	2.	49,7159	0,0141	0,3741	
	3.	53,9373	0,0218	0,5571	
Depok II (43 hari)	1.	54,6192	0,0317	0,3904	0,4640
	2.	50,8731	0,0496	0,6109	
	3.	55,4893	0,0329	0,3908	
Depok III (64 hari)	1.	46,0654	0,0449	0,4096	0,4888
	2.	56,5469	0,0584	0,4660	
	3.	53,2619	0,0714	0,5908	
CR rata-rata (keseluruhan)				0,5235	

m' (berat akhir) ; W (berat hilang/weight loss) ; CR (laju korosi/corrosion rate)

Universitas Indonesia

Berat hilang pada sampel (W) setelah penanaman didapatkan dari selisih antara berat akhir (m') pada Tabel 4.14 dan 4.15 dengan berat awal (m_0) pada Tabel 4.13. Contoh perhitungan laju korosi (CR) antara lain :

- Sampel Depok I (T = 22 hari) no. 1 ; D zinc murni = $7,13 \text{ gr/cm}^3$

$$\begin{aligned} W &= m_0 - m' \\ &= 55,7995 - 55,7612 \\ &= 0,0383 \text{ gr} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} CR &= (3,45 \times 10^6 \times W) / (D \times A \times T) \\ &= (3,45 \times 10^6 \times 0,0383) / (7,13 \times [3806,4875/100] \times [22 \times 24]) \\ &= 0,922082986 \text{ mpy} \end{aligned}$$

4.2.2.4 Komposisi Kimia Produk Korosi Sampel Baja Galvanis

Pada sampel baja galvanis evaluasi ketiga yaitu setelah minggu ke enam, didapatkan *discoloration* pada sampel tersebut. Hal ini terjadi pada sampel baja galvanis baik ditanam di Bekasi maupun Depok.



Gambar 4.11 *White rust & Brown rust* pada Baja Galvanis

Tabel 4.16 Komposisi Produk Korosi Baja Galvanis (*White Rust*)

Elemen White Rust	Komposisi Elemen (%)	
	Bekasi	Depok
C	1,18	1,13
O	23,67	22,37
Na	3,06	3,65
Al	2,20	0,76
Si	0,95	0,80
Fe	-	0,23*
Zn	68,94	71,06

* = < 2 sigma

Tabel 4.17 Komposisi Produk Korosi Baja Galvanis (*White Rust*)

Elemen Brown Rust	Komposisi Elemen (%)	
	Bekasi	Depok
C	1,26	2,23
O	25,71	24,77
Na	3,48	5,43
Al	4,25	2,34
Si	1,89	1,78
S	-	0,48
Fe	1,92	1,11
Zn	61,51	61,85

4.3 DATA KETEBALAN COATING GALVANIS

Tebal *coating* zinc yang didapatkan pada pengujian ini merupakan hasil rata-rata dari tiga titik pada permukaan sampel baja galvanis. Pengurangan berat *coating* dapat dilihat pada Tabel dan grafik berikut.

4.3.1 Ketebalan Coating Galvanis Bekasi

Tabel 4.18 Data Ketebalan Coating Awal & Akhir Bekasi

Lokasi & Evaluasi	No	t_0 (μm)	t' (μm)	Δt (μm)	Δt rata-rata Per evaluasi
Bekasi I (21 hari)	1.	63,3	62,6	0,7	1,1
	2.	59,3	59	0,3	
	3.	53,6	51,3	2,3	
Bekasi II (42 hari)	1.	58	55,6	2,4	7,9
	2.	76,6	63,3	13,3	
	3.	62,6	54,6	8	
Bekasi III (63 hari)	1.	53,6	49,6	4	5,23
	2.	52	48	4	
	3.	62	54,3	7,7	

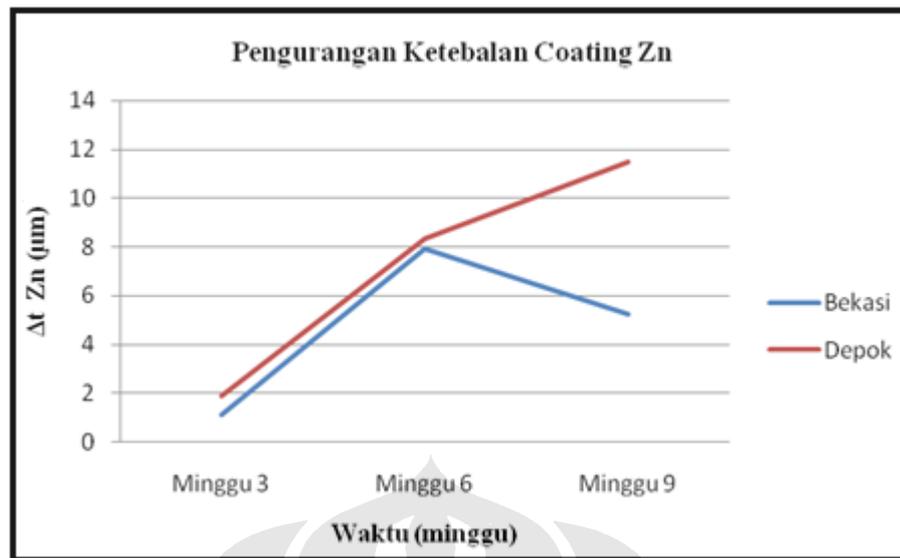
t_0 = tebal *coating* awal ; t' = tebal *coating* akhir ; Δt = selisih tebal *coating*

4.3.2 Ketebalan Coating Galvanis Depok

Tabel 4.19 Data Ketebalan Coating Awal & Akhir Depok

Lokasi & Evaluasi	No	t_0 (μm)	t' (μm)	Δt (μm)	Δt rata-rata Per evaluasi
Depok I (22 hari)	1.	46	44	2	1,9
	2.	47,6	45,3	2,3	
	3.	59	57,6	1,4	
Depok II (43 hari)	1.	56,3	50,3	6	8,3
	2.	58,3	50,3	8	
	3.	71,6	60,6	11	
Depok III (64 hari)	1.	52,6	40,6	12	11,46
	2.	52	46,6	5,4	
	3.	68,6	51,6	17	

t_0 = tebal *coating* awal ; t' = tebal *coating* akhir ; Δt = selisih tebal *coating*



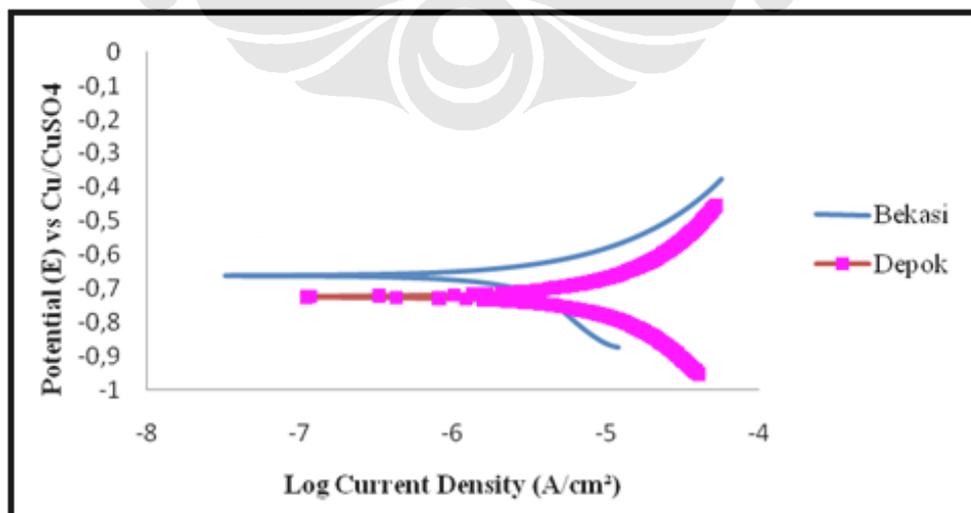
Gambar 4.12 Pengurangan Ketebalan *Coating Zn*

4.4 DATA HASIL PENGUJIAN KOROSI POLARISASI

Pengujian korosi polarisasi dilakukan terhadap kedua sampel. Dari pengujian tersebut dihasilkan kurva polarisasi sehingga didapatkan laju korosi.

4.4.1 Polarisasi Sampel *Bare Steel*

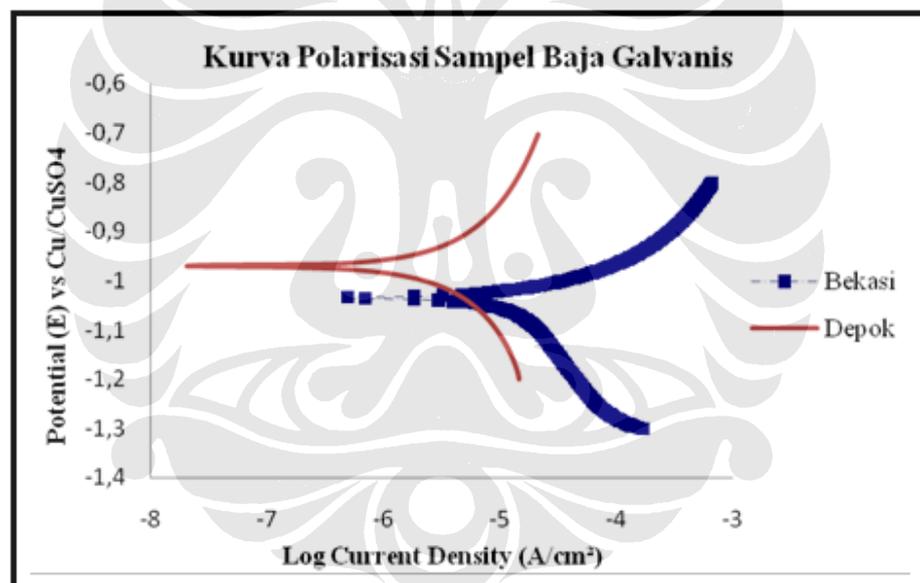
Gambar 4.13 Kurva Polarisasi Sampel *Bare Steel*



Tabel 4.20 Tafel Hasil Polarisisasi Sampel *Bare Steel*

Sampel	Bare Steel Bekasi	Bare Steel Depok
Ecorr	-661.1 mV	-723.8 mV
Icorr	1.175E-05 A/cm ²	3.758E-05 A/cm ²
BetaC	1836280458682600000.0000 V/Decade	1.1195 V/Decade
BetaA	342.6 mV/Decade	886.6 mV/Decade
CorrRate	5.368 mpy	18.955 mpy

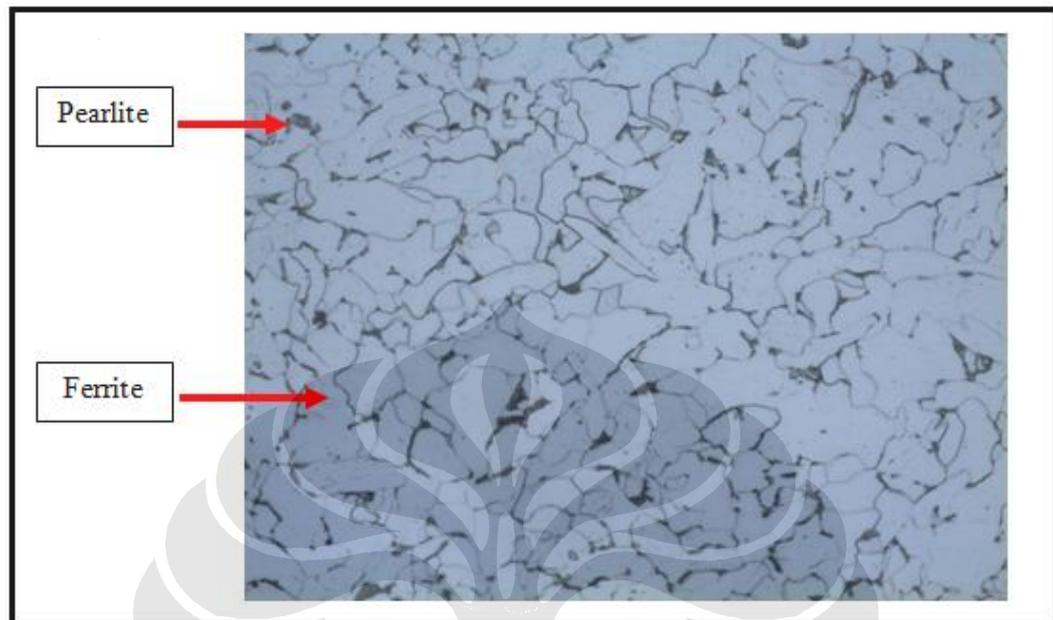
4.4.2 Polarisisasi Sampel Baja Galvanis

Gambar 4.14 Kurva Polarisisasi Sampel Baja Galvanis**Tabel 4.21** Tafel Hasil Polarisisasi Baja Galvanis

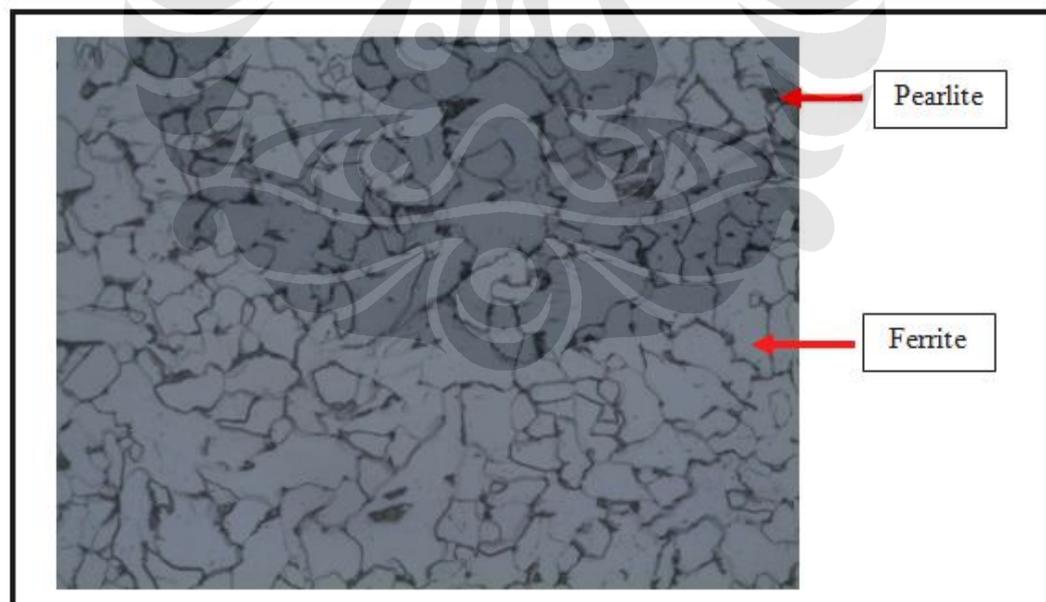
Sampel	Baja Galvanis Bekasi	Baja Galvanis Depok
Ecorr	-1.0356 V	-969.8 mV
Icorr	3.169E-05 A/cm ²	9.763E-06 A/cm ²
BetaC	810.3 mV/Decade	728.5 mV/Decade
BetaA	156.2 mV/Decade	604.0 mV/Decade
CorrRate	15.982 mpy	4.924 mpy

4.5 DATA PENGUJIAN MIKROSTRUKTUR

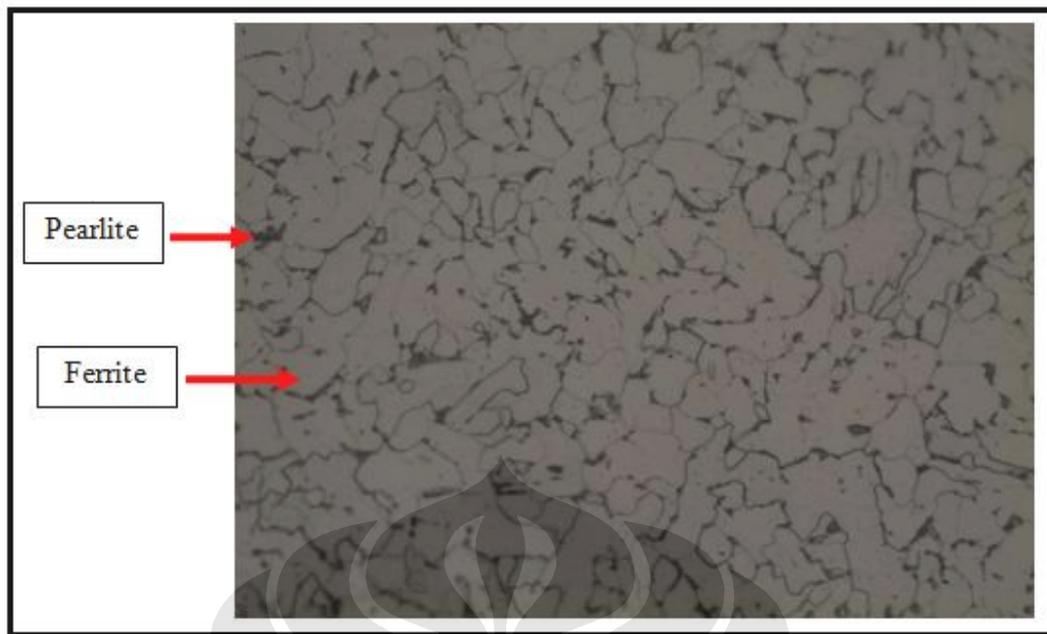
4.5.1 Mikrostruktur Sampel *Bare Steel*



Gambar 4.15 Mikrostruktur *Bare Steel* Awal (Nital 5%, 500x)

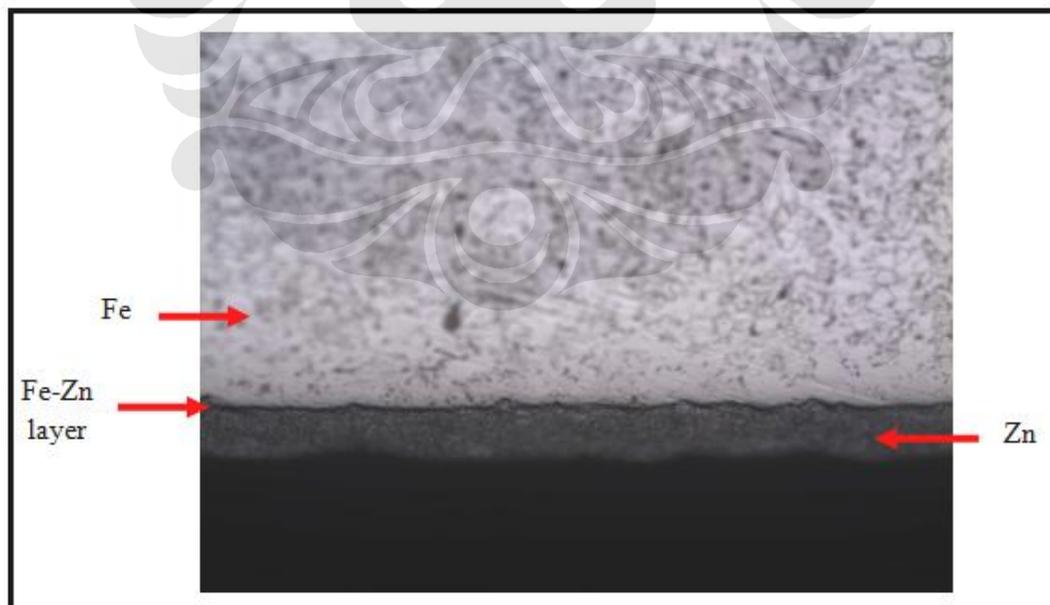


Gambar 4.16 Mikrostruktur *Bare Steel* Bekasi Setelah Penanaman 9 minggu
(Nital 5%, 500x)

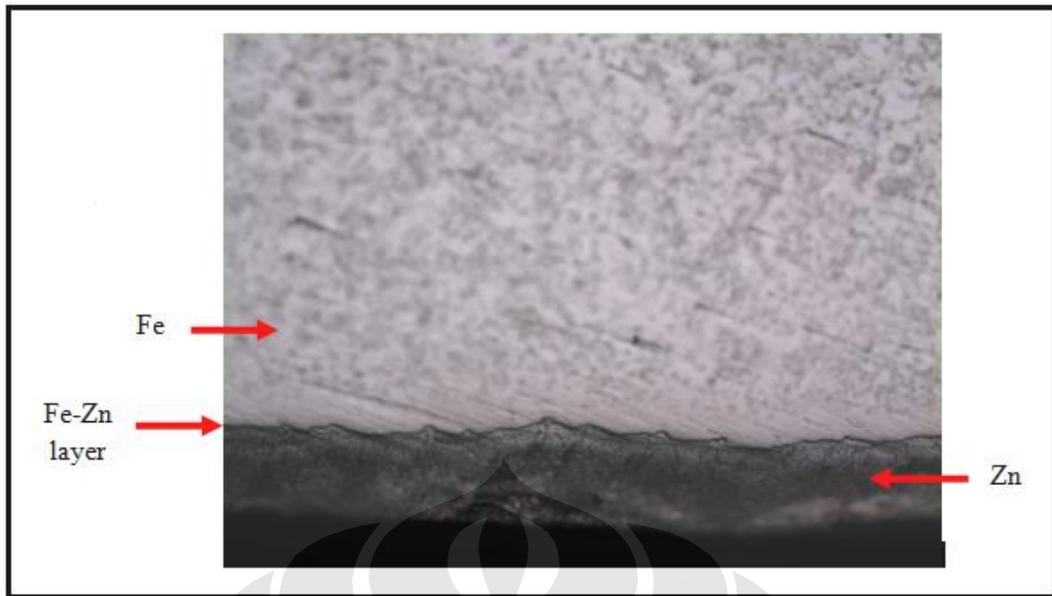


Gambar 4.17 Mikrostruktur *Bare Steel* Depok Setelah Penanaman 9 minggu
(Nital 5%, 500x)

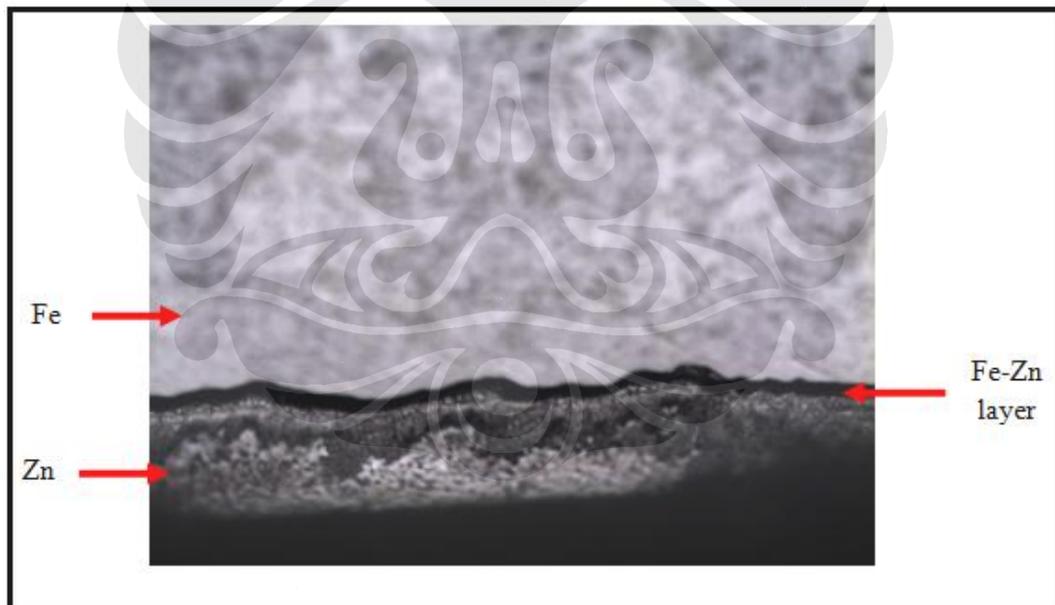
4.5.2 Mikrostruktur Sampel Baja Galvanis



Gambar 4.18 Mikrostruktur Baja Galvanis Awal (200x)



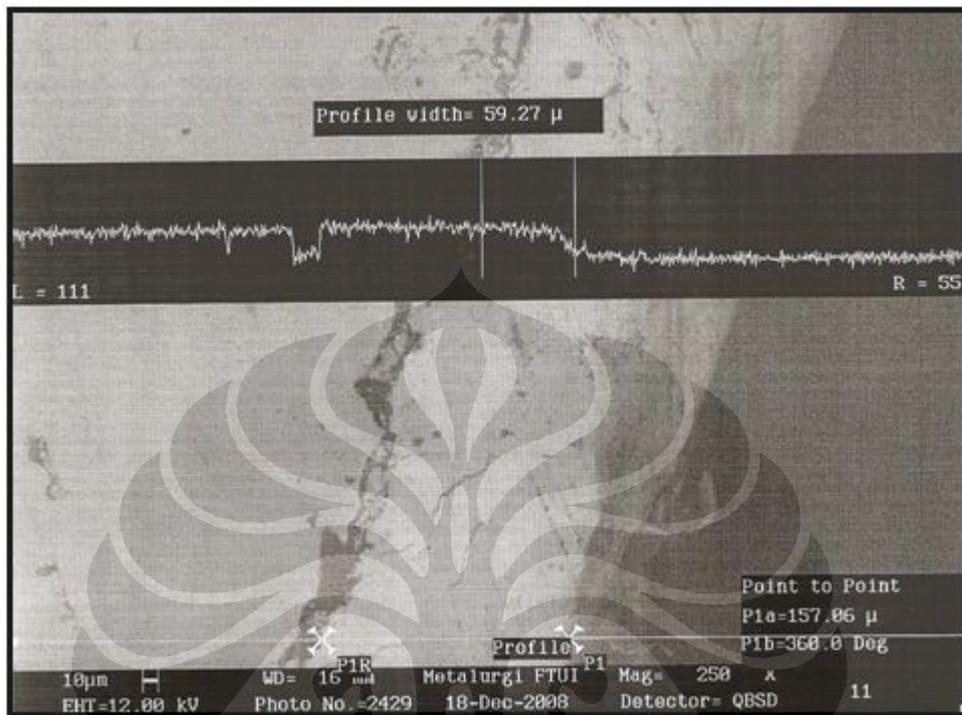
Gambar 4.19 Mikrostruktur Baja Galvanis Bekasi Setelah Penanaman 9 minggu (200x)



Gambar 4.20 Mikrostruktur Baja Galvanis Depok Setelah Penanaman 9 minggu (200x)

Selain dengan mikroskop optik, daerah atau bagian-bagian yang terbentuk pada *coating* galvanis untuk sampel kondisi akhir setelah penanaman, juga dilihat dengan menggunakan SEM dan analisa EDS. Hal ini dilakukan sebagai

pendukung hasil uji mikrostruktur sehingga bagian-bagian (*layer*) pada *coating* galvanis dapat dilihat tebal *coating* galvanis dan komposisinya. Komposisi tersebut di uji dari bagian atau *layer* terluar (titik 1) hingga ke dalam (titik 4).



Gambar 4.21 Struktur Lapisan *Coating* Baja Galvanis Bekasi 9 minggu (250x, 157,06 μ m) ditunjukkan adanya *hole*/delaminasi

Tabel 4.22 Komposisi Struktur *Lapisan Coating* Baja Galvanis Bekasi (9 minggu)

Elemen	Komposisi Elemen (%)			
	Titik 1	Titik 2	Titik 3	Titik 4
C	1,88	2,32	2,57	2,61
O	0,97	0,92	0,94	0,56
Fe	-	2,07	4,03	4,97
Zn	97,15	94,70	92,45	91,87



Gambar 4.22 Struktur Lapisan Coating Baja Galvanis Depok 9 minggu
(250x, 84,17µm)

Tabel 4.23 Komposisi Struktur Lapisan *Coating* Baja Galvanis Depok (9 minggu)

Elemen	Komposisi Elemen (%)		
	Titik 1	Titik 2	Titik 3
C	4,13	3,15	2,71
O	20,79	18,41	18,46
Si	0,17	0,28	0,34
Fe	1,29	3,52	4,74
Zn	73,61	74,63	73,75

4.6 DATA PENGUJIAN KEKERASAN

Pengujian kekerasan mikro dengan metode vickers dilakukan pada *bare steel* dan baja galvanis sebelum dan sesudah penanaman. Tabel 4.24 - 4.26

menunjukkan kekerasan mikro *bare steel* sebelum dan sesudah penanaman. Tabel 4.27 – 4.29 menunjukkan hasil kekerasan mikro baja galvanis sebelum dan sesudah penanaman. Pada pengujian kekerasan ini dilakukan lima kali penjejakan sehingga didapatkan nilai kekerasan rata-rata sampel baik pada kondisi awal maupun setelah penanaman.

4.6.1 Kekerasan Sampel *Bare Steel*

Tabel 4.24 Kekerasan Awal *Bare Steel*

Penjejakan	D1	D2	VHN
Titik 1	357,2	353,5	146,9
Titik 2	368,9	367,3	136,9
Titik 3	359	356,3	145
Titik 4	362,9	356,9	145
Titik 5	357,4	360,2	144
VHN rata-rata			143,56

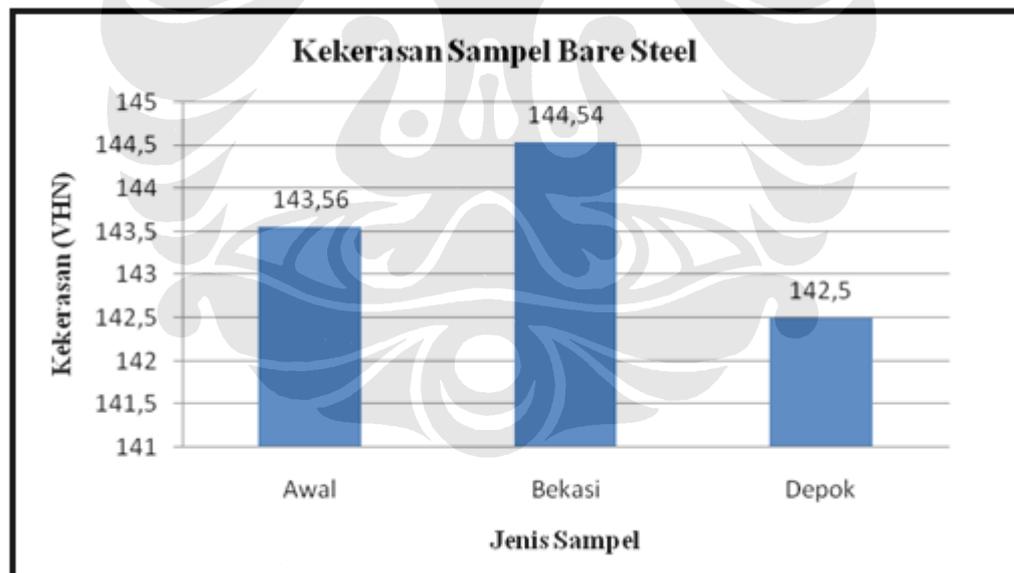
Tabel 4.25 Kekerasan Akhir *Bare Steel* Bekasi

Penjejakan	D1	D2	VHN
Titik 1	355,7	357,3	145,9
Titik 2	359	355	145,5
Titik 3	353,1	355	149,8
Titik 4	369,5	356,6	140,7
Titik 5	362,9	362,9	140,8
VHN rata-rata			144,54

Tabel 4.26 Kekerasan Akhir *Bare Steel* Depok

Penjejakan	D1	D2	VHN
Titik 1	369,5	365,4	137,3
Titik 2	365,4	361,5	140,4
Titik 3	351,7	364,8	144,5
Titik 4	356,1	354,9	146,7
Titik 5	363	355,6	143,6
VHN rata-rata			142,5

Perbandingan nilai kekerasan awal terhadap kekerasan akhir setelah penanaman dapat dilihat pada grafik berikut pada Gambar 4.23.

Gambar 4.23 Perbandingan Kekerasan Sampel *Bare Steel*

4.6.2 Kekerasan Sampel Baja Galvanis

Tabel 4.27 Kekerasan Awal Baja Galvanis

Penjejakan	D1	D2	VHN
Titik 1	146	164,9	76,7
Titik 2	159,5	143,8	80,6
Titik 3	168,4	139,7	78,1
Titik 4	154,6	159,7	75,1
Titik 5	147	164,8	77
VHN rata-rata			77,51

Tabel 4.28 Kekerasan Akhir Baja Galvanis Bekasi

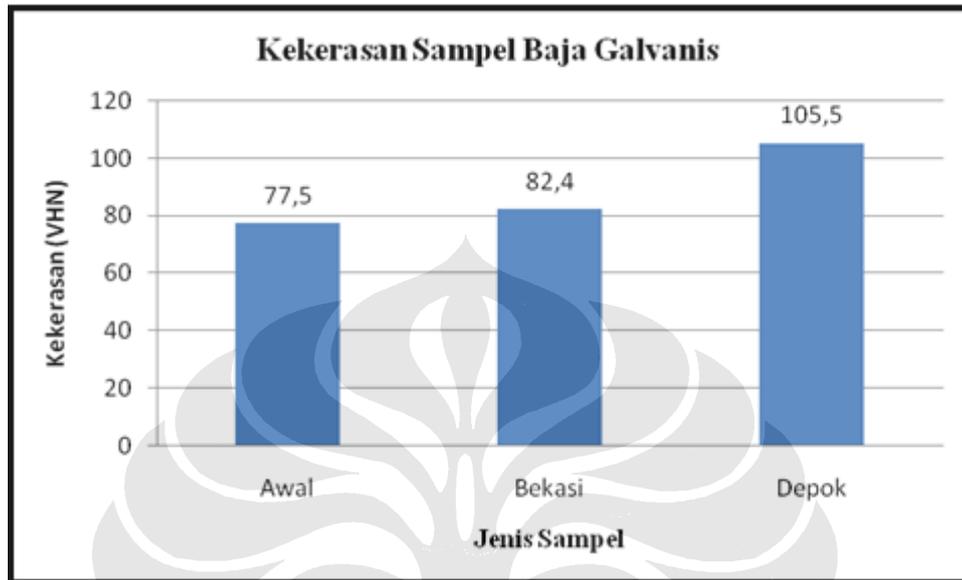
Penjejakan	D1	D2	VHN
Titik 1	122,4	120,1	63,1
Titik 2	112	100,4	82,2
Titik 3	104,2	91,5	96,6
Titik 4	104,2	100,8	88,3
Titik 5	113,4	100,3	82,1
VHN rata-rata			82,46

Tabel 4.29 Kekerasan Akhir Baja Galvanis Depok

Penjejakan	D1	D2	VHN
Titik 1	89,5	95,6	108,2
Titik 2	88,7	84,6	123,5
Titik 3	97,8	103	92
Titik 4	95,7	100,2	96,7
Titik 5	87,6	9,4	107,3
VHN rata-rata			105,5

Perbandingan nilai kekerasan awal terhadap kekerasan akhir setelah penanaman dapat dilihat pada grafik berikut pada Gambar 4.23.

Gambar 4.24 Perbandingan Kekerasan Sampel Baja Galvanis



BAB V

PEMBAHASAN

5.1 TINGKAT KOROSIFITAS TANAH

Tingkat korosifitas suatu tanah dapat ditentukan dari karakteristik tanahnya sendiri. Dari subbab 4.1, data karakteristik tanah di Bekasi maupun Depok dapat diringkas seperti Tabel 5.1 berikut. Karakteristik tanah tersebut menunjukkan bahwa tanah di Bekasi bersifat lebih korosif dibandingkan tanah di Depok. Pembahasan lebih lanjut mengenai hal tersebut akan dijelaskan pada subbab berikut ini.

Tabel 5.1 Perbandingan Karakteristik Tanah Bekasi & Depok

Karakteristik Tanah	Bekasi	Depok
Resistivitas (Ω .cm)	1020,5	9376,4
pH	6,46	6,9
MC (%)	53,3	29,3
Besar Butir (μ m)	87,27	49,55

5.1.1 Korosifitas Tanah Berdasarkan Resistivitas

Resistivitas tanah yang diuji di Bekasi dan Depok menunjukkan adanya perbedaan yang cukup signifikan dimana terlihat bahwa resistivitas tanah di Bekasi cukup rendah, yaitu sekitar 1020,5 Ω .cm, yang berarti tanah tersebut dapat digolongkan sangat korosif. Sebaliknya tanah di Depok, dengan nilai resistivitas sekitar 9376,4 Ω .cm dapat digolongkan sebagai tanah yang tidak terlalu korosif (*moderately corrosive*). Nilai lengkap dari data resistivitas tanah di Bekasi dan Depok dapat dilihat pada Tabel 4.1. Secara teoritis dikatakan bahwa laju resistivitas yang rendah akan berakibat pada tingginya laju korosi material yang ditanam di daerah tersebut, namun hal ini masih menjadi perdebatan diantara para

Universitas Indonesia

ahli dimana sebagian dari mereka ada juga yang berpendapat bahwa nilai resistivitas tidak mengontrol laju korosi secara mutlak.

Kelemahan dari penggunaan metode pengukuran resistivitas tanah untuk memprediksi laju korosi material adalah tidak dilibatkannya faktor faktor lain seperti aerasi, pH ataupun aktivitas mikrobiologi di dalam tanah. Costanzo melaporkan bahwa fluktuasi curah hujan mempengaruhi pembacaan pada alat resistivity meter.⁽⁴⁾

Perbedaan nilai resistivitas tanah di Bekasi dan Depok dapat disebabkan oleh banyak hal antara lain adalah curah hujan, ukuran partikel tanah, dan juga polusi di lingkungan sekitar. Dari hasil pengukuran butir tanah pada pengujian ini didapatkan bahwa tanah di Bekasi memiliki ukuran partikel yang lebih besar di bandingkan tanah di Depok. Ukuran butir yang besar membuat kepadatan tanah yang rendah atau ruang pori yang besar, sehingga air cenderung mudah untuk berdifusi. Banyaknya air pada tanah akan semakin memudahkan ionisasi elektrolit tanah sehingga memudahkan aliran arus akibat aktivitas korosi dan menyebabkan rendahnya nilai resistivitas. Hal tersebut telah membuktikan bahwa tanah di Bekasi memiliki nilai resistivitas yang lebih rendah dan bersifat lebih korosif daripada tanah di Depok.

5.1.2 Korosifitas Tanah Berdasarkan pH

Besar pH yang didapatkan pada pengujian ini, baik daerah Bekasi maupun Depok, cenderung mendekati nilai pH netral. Berdasarkan literatur, tanah akan semakin korosif pada pH asam sehingga nilai pH yang didapatkan dari pengujian ini seharusnya tidak menunjukkan sifat yang korosif. Sedangkan pada pH basa, akan terbentuk endapan tak larut sehingga akan menghasilkan lapisan protektif pada permukaan logam dan mengurangi aktivitas korosi. Namun, pH pada umumnya bukan *variable* dominan yang menyebabkan kecepatan korosi.

Sebagaimana pengaruh resistivitas tanah terhadap laju korosi, pengaruh pH dan kelembaban juga sangat kompleks dan tidak dapat digeneralisir sebagai

satu-satunya faktor yang mengontrol laju korosi material di dalam tanah. Studi lebih lanjut dan mendalam diperlukan untuk mempelajari faktor dari lingkungan tanah yang paling dominan dalam kasus korosi pada pipa air yang ditanam di daerah Bekasi dan Depok.

Faktor iklim seperti curah hujan, pergerakan udara, serta cahaya matahari dapat menyebabkan perubahan sifat tanah seiring waktu. Curah hujan sangat berhubungan dengan reaksi asam atau basa yang berkembang seiring perubahan struktur tanah. Ketika curah hujan tinggi, air tersaring ke dalam tanah dan melarutkan komponen terlarut. Keasaman yang terbentuk tergantung dari banyak faktor seperti mineral awal tanah tersebut, aktivitas biologi, dan temperatur, berhubungan dengan kondisi kelembaban. Curah hujan tinggi hingga sedang dengan temperatur hangat akan menurunkan aktivitas organik, kecuali jika kandungan air cukup banyak untuk mencegah maksimum aerasi untuk aktivitas mikrobiologi.



Gambar 5.1 Komposisi Tanah Berdasarkan pH⁽¹⁸⁾

Jenis mineral yang terdapat pada tanah akan menentukan sifat keasaman tanah tersebut. Hasil pengujian komposisi tanah (Tabel 4.4.) yang didapatkan dari pengujian ini secara umum menunjukkan adanya unsur C, O, Al, Si, S, Ca, Ti, Fe untuk kedua daerah tanah, Bekasi dan Depok. Namun terdapat perbedaan pada komposisi (%) dari masing-masing unsur, khususnya untuk unsur Ca yang terdapat pada tanah Depok bernilai sangat kecil ($<2\sigma$) sehingga dapat diabaikan. Sedangkan kandungan Ca pada tanah Bekasi bernilai cukup besar,

didukung oleh data hasil XRD (Tabel 4.5) dimana ditemukan senyawa CaCO_3 . Berdasarkan kondisi fisik, tanah bekas merupakan tanah yang kering dan terdiri dari kerikil dan batu-batuan sehingga memungkinkan adanya senyawa tersebut.

Beberapa unsur dan senyawa yang didapatkan dari analisa EDS dan XRD menunjukkan kesesuaian dengan nilai pH pada diagram literatur di atas. Dari diagram tersebut dapat dilihat bahwa tanah dengan pH 6 – 7 akan mengandung unsur-unsur seperti S, Ca, Fe dimana sesuai dengan hasil uji komposisi tanah dengan EDS. Analisa EDS menunjukkan bahwa tanah pengujian terdiri dari C, O, Al, Si, S, Ca, Ti dan Fe. Hal tersebut sesuai dengan literatur dimana tanah terdiri dari C, H, O, N dan dalam jumlah kecil S, Si, Al, Fe, Mg, Ca, Na, K. Tanah pada pengujian ini mengandung Al dan Fe sehingga merupakan tanah yang mengalami proses fertilisasi karena memiliki produk hidroksida/oksida dari Al dan Fe yaitu $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$, Al_2SiO_5 , dan Fe_2O_3 . Selain Al, tanah pada pengujian ini juga didominasi oleh Si dengan terbentuknya SiO_2 sehingga jenis tanah pada pengujian ini dapat disebut sebagai *silicate clay*.

Kondisi pH tertentu akan menentukan jenis mikrobiologi yang aktif pada tanah tersebut. Selain itu, aktivitas biologi akan menurunkan kadar oksigen, menggantikan oksigen dengan gas dari aktivitas metabolisme seperti karbon dioksida sehingga terbentuk asam karbonat yang bersifat asam. Aktivitas biologi yang cocok pada pH netral antara lain *Sulfate-reducing bacteria* (SRB) yang akan mengkonversi sulfat menjadi sulfida dan *Iron bacteria* (IB) yang akan mengoksidasi ion ferrous menjadi ion ferric. Kedua bakteri tersebut merupakan bakteri yang dapat bereaksi dengan logam *iron-based alloy*. Unsur S dari hasil analisa EDS memungkinkan hadirnya aktivitas bakteri SRB yang juga dipengaruhi oleh kondisi tanah (aerob dan anaerob). Adanya pengaruh aktivitas mikrobiologi terhadap sampel yang di uji akan dibahas lebih lanjut.

5.1.3 Korosifitas Tanah Berdasarkan *Moisture Content*

Tanah bertekstur halus dengan kandungan tanah liat yang tinggi memiliki patikel yang lebih padat dan memiliki kapasitas pori untuk difusi air/gas yang

lebih sedikit dibandingkan tanah jenis pasir. Ruang pori pada tanah dapat mengandung air maupun gas. Pada pengujian ini, tanah di Bekasi memiliki *moisture content* yang lebih besar dibandingkan tanah di Depok. Hal ini kemungkinan disebabkan oleh faktor iklim, yaitu adanya curah hujan. Dengan adanya curah hujan, tanah dengan kapasitas pori yang besar akan memudahkan penetrasi air ke dalam tanah sehingga meningkatkan *moisture content*. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa berdasarkan kandungan *moisture content*, tanah di Bekasi bersifat lebih korosif dari tanah di Depok karena memiliki kapasitas pori yang besar.

Aerasi pada tanah secara langsung berhubungan dengan ruang pori dan kandungan air. Tanah bertekstur halus dengan kandungan tanah liat yang tinggi memiliki partikel yang lebih padat dan memiliki kapasitas pori untuk difusi gas yang lebih sedikit dibandingkan tanah jenis pasir. Volum air yang ada pada tanah berhubungan dengan konsentrasi oksigen yang ada di dalamnya. Pada tanah yang kering, kondisi menjadi aerob dan kecepatan difusi oksigen menjadi lebih cepat. Perubahan kering ke basah atau anaerob-aerob, akan meningkatkan laju korosi daripada pada lingkungan tanah yang konstan. Konsentrasi oksigen meningkat dengan fluktuasi air dan udara juga memacu variasi aktivitas biologi pada tanah. Dari pembahasan tersebut, didapatkan bahwa tanah di Bekasi memiliki derajat aerasi yang lebih tinggi daripada Depok karena memiliki kapasitas pori yang besar sehingga bersifat lebih korosif.

5.2 LAJU KOROSI BERDASARKAN KOROSIFITAS TANAH

Hasil pengujian laju korosi dengan metode kehilangan berat maupun polarisasi menunjukkan hasil yang menyimpang dari teori umum tentang hubungan resistivitas tanah dan laju korosi. Dengan mengacu pada data resistivitas tanah yang didapat di Bekasi dan Depok, seharusnya material yang ditanam di tanah Bekasi akan lebih parah mengalami serangan korosi dan memiliki laju korosi yang lebih tinggi dibandingkan sampel yang ditanam di tanah Depok. Namun ternyata perhitungan kehilangan berat dan laju korosi dari sampel-

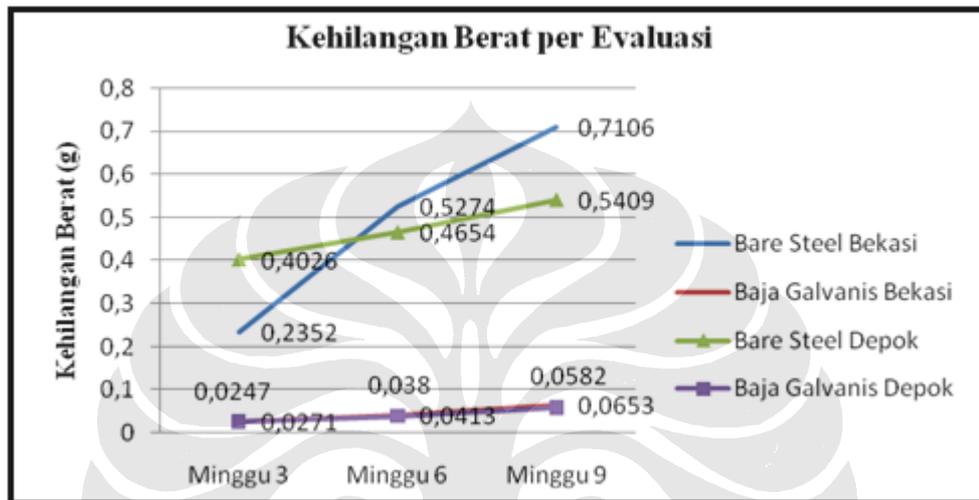
sampel yang ditanam di daerah Bekasi dan Depok, baik *bare steel* maupun baja galvanis, tidak menunjukkan adanya perbedaan yang signifikan. Banyak faktor yang bisa mempengaruhi hal tersebut diantaranya adalah waktu tanam dan faktor lingkungan tanah termasuk aktivitas mikrobiologi.

Dengan mempertimbangkan waktu tanam yang hanya maksimal 63 hari, penulis berhipotesis bahwa waktu 63 hari tersebut belum cukup untuk menciptakan kondisi korosi yang sesungguhnya pada material. Dengan kata lain, reaksi yang masih terjadi adalah reaksi kerusakan awal material dari serangan korosi sehingga laju korosinya tidak jauh berbeda antara daerah Bekasi dan Depok. Kelemahan dari metode kehilangan berat adalah ketidakakuratan perhitungan laju korosi yang hilang selama jangka waktu yang pendek karena belum sempurnanya proses korosi yang terjadi. Tabel dibawah ini menunjukkan perbandingan laju korosi pada *bare steel* dan baja galvanis yang ditanam di daerah Bekasi dan Depok.

Tabel 5.2 Perbandingan *Weight Loss* dan Laju Korosi (Bekasi & Depok)

LOKASI TANAH			BEKASI	DEPOK
BARE STEEL	Kehilangan Berat (gram)	Minggu 3	0,2352	0,4026
		Minggu 6	0,5274	0,4654
		Minggu 9	0,7106	0,5409
	Laju Korosi (mpy)	Weight Loss	5,7887	6,1773
		Polarisasi	5,368	18,955
BAJA GALVANIS	Kehilangan Berat (gram)	Minggu 3	0,0271	0,0247
		Minggu 6	0,0413	0,038
		Minggu 9	0,0653	0,0582
	Laju Korosi (mpy)	Weight Loss	0,6074	0,5235
		Polarisasi	15,982	4,924

Semakin lama waktu penanaman, maka *weight loss* yang didapatkan cenderung meningkat baik untuk sampel yang ditanam di Bekasi maupun Depok. Hal tersebut dapat dilihat pada grafik Gambar 5.2. Hal ini menunjukkan bahwa proses korosi terus berlangsung seiring bertambahnya waktu. Dengan luas permukaan yang pada umumnya sama, *weight loss* sampel baja galvanis jauh lebih kecil dari *bare steel*.



Gambar 5.2 Kehilangan Berat Sampel per Evaluasi

Kemudian dari Tabel tersebut dapat dilihat bahwa laju korosi dengan metode *weight loss* untuk baja galvanis jauh lebih kecil dibandingkan dengan bare steel. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa baja yang memiliki pelapis (galvanis) lebih efektif digunakan daripada baja tanpa pelapis (*bare steel*).

Dengan mengetahui ketebalan struktur atau sampel serta nilai laju korosi *bare steel* maupun *coating galvanis*, maka dapat ditentukan umur pakai (*life assessment*) untuk baja galvanis. Hal tersebut dapat dilihat pada Tabel 5.3 berikut.

Tabel 5.3 Penilaian Umur Pakai Baja Galvanis

	Bekasi	Depok
Umur <i>Coating Galvanis</i>	3,7 tahun	4,3 tahun
Umur <i>Bare Steel</i>	35, 1 tahun	32,9 tahun
Total	38,8 tahun	37,2 tahun

Contoh perhitungan :

- *Coating* galvanis Bekasi

Tebal coating rata-rata = 57 μm

Laju korosi rata-rata = 0,6074 mpy

Maka, umur pakai *coating* galvanis :

$$57 \mu\text{m}/(0,6074 \text{ mpy} \times 0,0254 \times 10^3) \mu\text{m}/\text{y} = (57 \mu\text{m})/(15,4295 \mu\text{m}/\text{y}) = 3,7 \text{ tahun}$$

- *Bare steel* Depok

Tebal coating rata-rata = 5,16 μm

Laju korosi rata-rata = 5,7887 mpy

Maka, umur pakai *bare steel* :

$$5,16 \text{ mm}/(5,7887 \text{ mpy} \times 0,0254) \text{ mm}/\text{y} = (5,16 \text{ mm})/(0,1469 \text{ mm}/\text{y}) = 35,1 \text{ tahun}$$

Penampakan visual dari *bare steel* dan baja galvanis menunjukkan bahwa baja yang tidak terproteksi, dalam hal ini tidak dilapisi oleh lapisan zinc mengalami derajat kerusakan korosi yang lebih parah. Hal ini mengindikasikan bahwa adanya lapisan zinc pada baja dapat mengurangi atau memperlambat kerusakan pada baja. Tidak ada perbedaan yang signifikan dari penampakan visual *bare steel* yang ditanam di Bekasi maupun Depok. Begitu pula baja galvanis yang ditanam di kedua daerah tersebut.

Pengujian laju korosi dengan metode polarisasi sebenarnya memiliki tingkat kesalahan yang lebih kecil dibandingkan metode kehilangan berat. Selain itu, perilaku korosi material juga dapat diketahui lebih detail dengan menggunakan metode polarisasi. Akan tetapi, karena keterbatasan alat potentiostat yang dimiliki, maka data kurva tafel dan laju korosi yang didapat dari pengujian polarisasi menjadi kurang akurat.

Dari beberapa kali pengujian didapat nilai yang menyimpang sangat jauh pada material yang jenisnya sama yang diuji pada elektrolit yang sama. Sebagai contoh, tiga sampel baja galvanis yang diuji pada tanah Bekasi memiliki laju

korosi yang sangat jauh berbeda, yaitu 15 mpy, 80 mpy, dan 40 mpy. Dari beberapa kali pengujian, hanya satu data laju korosi dari sampel bare steel di Bekasi yang memiliki kesesuaian dengan data hasil pengujian laju korosi dengan metode kehilangan berat yang telah dilakukan maupun terhadap data yang ada di literatur. Beberapa sumber referensi melaporkan bahwa laju korosi baja di dalam tanah sekitar 5 mpy, sedangkan baja galvanis memiliki laju korosi maksimum 0,1 mpy.

5.3 KETAHANAN KOROSI BARE STEEL

Pada pengujian ini digunakan baja ASTM A53, namun hasil analisa OES (Tabel 4.8) menunjukkan adanya perbedaan komposisi antara sampel yang digunakan dengan spesifikasi ASTM A53 (Tabel 4.7) tersebut. Namun, perbedaan komposisi tersebut tidak mempengaruhi ketahanan korosi karena baja yang digunakan masih merupakan baja *low carbon*, sesuai dengan ASTM A53. Pada pengujian ini, sampel *bare steel* terdiri dari beberapa fasa yaitu *ferrite* dan *pearlite* (Gambar 4.15–4.17) sehingga ketidakhomogenan fasa tersebut akan menyebabkan lokal sel elektrokimia. Hal tersebut akan menyebabkan rendahnya ketahanan korosi baja karbon (sampel *bare steel*) karena memudahkan terjadinya reduksi katodik.

Reaksi dari baja karbon terhadap korosi tanah tergantung pada sifat utama tanah dan faktor lingkungan, seperti kelembaban dan oksigen. Tanah yang digunakan pada pengujian ini, baik Bekasi maupun Depok memiliki pH yang cenderung netral. Pada tanah yang bersifat netral atau basa, konsentrasi oksigen merupakan pengaruh penting terhadap laju korosi yang dapat membantu reaksi katodik. Reaksi baja karbon pada lingkungan netral, yaitu :



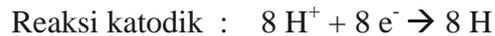
Reaksi total adalah reaksi dimana pipa baja akan terkorosi menjadi $2\text{Fe}(\text{OH})_2$.

Dari gambar 4.4, 4.5 dan 4.6 dapat dilihat perubahan sampel *bare steel* sebelum dan setelah penanaman. Setelah penanaman, terlihat bahwa sampel *bare steel* mengalami kerusakan dengan adanya produk korosi pada permukaan sampel. Dari Gambar tersebut dapat dilihat bahwa korosi yang terbentuk pada sampel *bare steel* dalam waktu sembilan minggu merupakan korosi seragam (*uniform*). Produk korosi sampel *bare steel* berdasarkan analisa EDS (Tabel 4.11) terdiri dari C, O, Al, Si, S, Ca, Fe. Produk korosi *bare steel* baik yang di tanam di Bekasi maupun Depok, di dominasi oleh unsur Fe dan O sehingga menunjukkan bahwa logam Fe telah teroksidasi. Hal ini juga sesuai dengan hasil analisa XRD (Tabel 4.12) dimana produk korosi berada dalam bentuk senyawa $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$, $\text{FeO}(\text{OH})$, Fe_3O_4 , $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O} \cdot \text{H}_2\text{O}$. Selain itu, ditemukan adanya unsur tanah seperti Al dan Si pada produk korosi sampel *bare steel*. Hal ini dimungkinkan karena unsur-unsur tanah tersebut mengendap pada permukaan sampel sehingga menyatu dengan produk korosi Fe. Senyawa yang terbentuk dapat dilihat dari hasil XRD (Tabel 4.12) yaitu SiO_2 dan AlFeO_3 . Adanya endapan tersebut pada permukaan sampel, akan menghambat proses korosi sehingga laju korosi menurun. Hal ini lah yang mungkin dapat menyebabkan turunnya laju korosi sampel *bare steel* pada minggu ke sembilan baik di Bekasi maupun Depok (Tabel 4.9 dan Tabel 4.10).

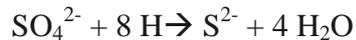
Perbedaan signifikan pada produk korosi sampel *bare steel* adalah adanya kandungan Sulfur pada sampel *bare steel* Depok yang ditunjukkan oleh analisa EDS (Tabel 4.11). Hal tersebut juga didukung oleh hasil analisa XRD (Tabel 4.12) dengan ditemukannya senyawa FeS . Adanya kandungan Sulfur dan FeS sebagai produk korosi menunjukkan bahwa proses korosi sampel *bare steel* di Depok dipengaruhi oleh aktifitas mikrobiologi yaitu Sulfate Reducing Bacteria (SRB). SRB merupakan jenis bakteri anaerob (tidak membutuhkan oksigen) dan akan terbentuk pada pH netral dengan. Hal tersebut sesuai dengan karakteristik tanah Depok karena memiliki nilai pH 6,9 dan tanah cenderung memiliki kandungan oksigen yang sedikit karena memiliki butir yang halus dan kapasitas pori yang padat sehingga oksigen sulit berdifusi.

Kuhr dan Vlugt menyebutkan bahwa korosi oleh SRB dalam lingkungan anaerob dan netral, reaksi katodiknya tidak mungkin berupa reduksi O_2 ataupun

reduksi H^+ . Namun serangan korosi yang terjadi bisa sangat parah, berarti ada reaksi katodik lain yang berlangsung, yang melibatkan SRB. Kuhr dan Vlugt menyatakan bahwa SRB menggunakan hidrogen katodik untuk reduksi dissimilasi sulfat menurut reaksi sebagai berikut :



Depolarisasi Katodik oleh Bakteri Pereduksi Sulfat :



Produk Korosi :



Reaksi Keseluruhan :



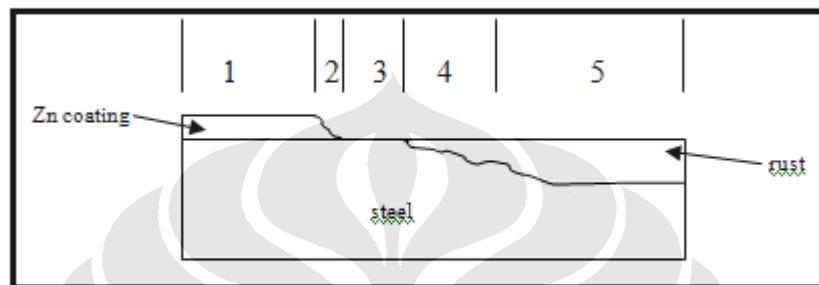
Hasil foto mikrostruktur pada sampel *bare steel* menunjukkan tidak adanya perubahan mikrostruktur pada kondisi sebelum (awal) dan sesudah penanaman. Hal ini dimungkinkan karena kurang agresifnya lingkungan untuk bereaksi dengan mikrostruktur material. Reaksi yang terjadi hanyalah reaksi lingkungan dan material di permukaan. Mikrostruktur dari *bare steel* pada gambar 4.15 - 4.17 menunjukkan fasa *pearlite* dan *ferrite* dimana fasa *ferrite* merupakan fasa yang dominan. Mikrostruktur ini didapat dengan mengetsa baja tersebut dengan larutan nital 5%. Tidak ada perbedaan mikrostruktur pada baja sebelum ditanam dan sesudah ditanam. Hasil analisa mikrostruktur ini juga didukung dengan hasil kekerasan mikro vickers pada Tabel 4.24 – 4.26 dimana tidak adanya perbedaan nilai kekerasan pada sampel *bare steel* pada kondisi sebelum dan sesudah penanaman.

5.4 KETAHANAN KOROSI BAJA GALVANIS

Ketahanan korosi yang baik dari *zinc-coated steel* atau baja galvanis dihasilkan dari adanya proteksi lapisan penghalang (*barrier protection*) dan proteksi katodik. Proteksi lapisan penghalang adalah mekanisme perlindungan yang utama karena sebagian besar dari permukaan produk yang mengalami proses

galvanis dilapisi oleh *zinc coating*, sedangkan proteksi katodik adalah proteksi kedua yang terjadi pada permukaan produk baja galvanis yang tidak terlapisi *zinc coating*.

Aksi galvanis dari *zinc-coated steel* dan *zinc coating* yang terkikis/terlepas secara parsial dibawah pengaruh lapisan kelembaban tipis (*thin moisture layer*) yang contohnya terjadi pada lingkungan atmosferik ditunjukkan pada Gambar 5.1.



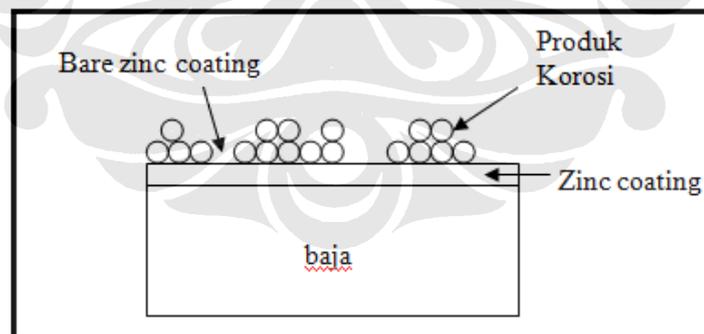
Gambar 5.3 Aksi Proteksi dari Baja Zinc-coated Steel

Pada permukaan coating terdapat dua daerah yang terbentuk yaitu daerah yang terserang korosi normal yang terjadi diatas permukaan *zinc coating* (daerah 1) dan korosi galvanik yang terjadi pada daerah perbatasan antara *zinc coating* dan baja (daerah 2). Sedangkan pada permukaan baja terdapat tiga daerah yang terbentuk yaitu daerah yang terproteksi katodik secara menyeluruh (daerah 3), daerah yang sebagian terproteksi katodik secara parsial (daerah 4) dan daerah yang tidak terproteksi (daerah 5).

Reaksi korosi yang terjadi pada baja galvanis akan bervariasi sesuai dengan kerusakan *coating* Zn yang di alami. Jika *coating* Zn belum rusak, maka reaksi yang terjadi adalah reaksi oksidasi logam Zn terhadap lingkungannya, tanah dengan pH netral, yaitu reduksi oksigen. Jika *coating* Zn sudah mengalami kerusakan, maka reaksi yang terjadi adalah reaksi korosi galvanik yang juga merupakan prinsip proteksi katodik sehingga Zn akan teroksidasi oleh lingkungannya untuk melindungi Fe dari korosi. Sedangkan jika *coating* Zn sudah habis, maka reaksi yang terjadi adalah korosi pada baja itu sendiri dimana logam Fe akan teroksidasi oleh lingkungannya.

Zinc akan bereaksi membentuk lapisan protektif pada permukaan baja galvanis. Permukaan yang baru terbentuk tersebut biasanya tidak stabil seperti produk korosi *water-soluble zinc oxide* (ZnO) dan *zinc hydroxide* ($Zn(OH)_2$). Kemudian, terbentuk lapisan *zinc carbonate* ($ZnCO_3$) yang tidak larut. Lapisan tersebut tidak mudah dihilangkan sehingga membentuk lapisan yang bersifat protektif yang berwarna abu-abu. Hal ini lah yang disebut sebagai *barrier protection*.

Ketahanan korosi yang baik dari *zinc coating* dapat dihubungkan dengan sifat produk korosi yang terbentuk di atas permukaan *zinc coating* yang bersifat rapat dan adhesif. Selama korosi atmosferik, daya adhesif produk korosi yang pertama-tama terbentuk sangat kecil dan mudah untuk terlepas, namun seiring dengan perjalanan waktu, produk korosi menjadi lebih adhesif dan rapat yang dipicu oleh siklus basah dan kering dari cuaca disekitarnya. Setelah produk korosi ini terbentuk, proses korosi selanjutnya hanya dapat terjadi dalam pori coating yang tidak tertutup oleh produk korosi. Proses ini berlangsung secara dinamis dimana pori coating nantinya akan tertutup oleh produk korosi sedangkan pori yang baru akan terbentuk akibat terlarutnya produk korosi yang sudah terbentuk sebelumnya. Mekanisme ini ditunjukkan pada Gambar berikut.



Gambar 5.4 Mekanisme korosi pada zinc coating

Laju korosi pada *zinc coating* dapat digambarkan dengan persamaan dibawah ini:

$$R = \frac{ra}{A} \quad (5.1)$$

Dimana ‘R’ adalah laju korosi yang teramati (nilai rata-rata pada seluruh permukaan), ‘r’ adalah laju korosi aktual pada permukaan aktif *zinc* yang tidak tertutup oleh produk korosi, ‘a’ adalah luas permukaan aktif *zinc*, dan ‘A’ adalah luas seluruh permukaan coating. Dari persamaan diatas jelas bahwa ‘a’ (luas permukaan yang aktif) memegang peranan penting terhadap tinggi rendahnya laju korosi *zinc coating*. Semakin tinggi nilai ‘a’ maka semakin tinggi pula laju korosinya. Hal yang sebaliknya juga akan terjadi. Nilai ‘a’ yang rendah dapat dicapai bila kondisi produk korosi yang rapat dan adhesif dapat terbentuk dengan mudah.

Derajat kerusakan *coating* (karat) dievaluasi menggunakan skala 0-10 berdasarkan persentase dari permukaan sebagai *spot rust*, *general rust*, *pinpoint rust* atau *hybrid rust* berdasarkan ASTM D610. Permukaan *coating* Zn setelah penanaman (Gambar 4.9 dan 4.10) dibandingkan dengan sebelum penanaman (gambar 4.8) yang kemudian dinilai kerusakannya melalui contoh Gambar yang ada pada ASTM D610 (terlampir) sehingga didapatkan analisa sebagai berikut :

Tabel 5.4 Derajat Kerusakan *Coating* Baja Galvanis

Sampel	Tingkat Kerusakan	Skala	Keterangan
Bekasi (21 hari)	5 G, 3 % <i>rusted</i>	5	> 1,0 – 3,0 %
Bekasi (42 hari)	4 G, 10 % <i>rusted</i>	4	> 3,0 – 10 %
Bekasi (63 hari)	3 G, 16 % <i>rusted</i>	3	> 10 – 16 %
Depok (22 hari)	6 G, 1 % <i>rusted</i>	6	> 0,3 – 1,0 %
Depok (43 hari)	5 G, 3 % <i>rusted</i>	5	> 1,0 – 3,0 %
Depok (64 hari)	4 G, 16 % <i>rusted</i>	4	> 3,0 – 10 %

Hasil evaluasi ini menunjukkan bahwa kerusakan *coating* Zn hingga waktu sembilan minggu merupakan jenis *general rust* (G) baik untuk sampel baja galvanis di Bekasi maupun Depok. Jika nilai skala semakin mendekati angka nol, maka kerusakan yang terjadi pada permukaan *coating* akan semakin parah. Dari Tabel di atas dapat dilihat bahwa tingkat kerusakan *coating* semakin meningkat

seiring bertambahnya waktu. Sampel baja galvanis Bekasi mengalami kerusakan yang lebih parah daripada Depok. Hal ini sesuai dengan laju korosi yang didapatkan dimana laju korosi sampel baja galvanis di Bekasi lebih besar dibandingkan di Depok sehingga cenderung mengalami kerusakan *coating* yang lebih parah.

Selain itu, dari hasil pengamatan visual didapatkan bahwa terjadi perubahan warna atau *discoloration* pada sampel baja galvanis setelah penanaman. Hal tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.11 dimana terdapat produk korosi berupa *white rust* dan *brown rust*. Berdasarkan literatur, *white rust* merupakan hasil korosi *zinc coating* yaitu teroksidasinya Zn. Sedangkan *brown rust* yang juga dikenal dengan *brown staining* terbentuk akibat rusaknya zinc coating (lapisan eta) membuat teroksidasinya Fe pada struktur lapisan coating Fe-Zn (zeta, delta, gamma) sehingga merubah warna abu-abu menjadi cokelat. Sedangkan red rust hanya akan terbentuk jika sudah tidak ada *zinc coating* pada lokasi produk korosi tersebut.

Hasil pengujian produk korosi sampel baja galvanis oleh analisa EDS ini, menunjukkan kesesuaian dengan literatur. Pada bagian *white rust* baik sampel baja galvanis Bekasi maupun Depok (Tabel 4.16) di dominasi oleh Zn dan O. Hal ini menunjukkan bahwa *white rust* dihasilkan akibat korosi *zinc coating* dimana *zinc* teroksidasi menjadi *zinc oxide*. Sedangkan pada bagian brown rust, ditemukan adanya sedikit Fe. Hal ini menunjukkan bahwa pada bagian tersebut *zinc coating* sudah mengalami kerusakan sehingga terjadi korosi galvanik.

Hasil mikrostruktur dari baja galvanis menunjukkan adanya struktur lapisan coating yaitu lapisan Fe, Zn maupun Fe-Zn layer. Dari gambar-gambar tersebut, terlihat adanya perubahan layer Zn (eta) pada sampel baja galvanis awal dan akhir (setelah 63 hari). Mikrostruktur sampel baja galvanis akhir menunjukkan rusaknya lapisan layer Zn (semakin menipis).

Hal tersebut di atas berpengaruh terhadap kekerasan yang didapatkan. Sampel baja galvanis yang ditanam di Bekasi dan Depok mengalami peningkatan nilai kekerasan. Hal ini mungkin disebabkan oleh berkurangnya ketebalan lapisan

coating sehingga ketika diindentasi oleh indenter vickers yang terukur dan terindentasi adalah lapisan *zinc* dan baja (Fe-Zn layer). Hubungan kekerasan sampel baja galvanis pada kondisi sebelum dan sesudah penanaman dapat dilihat pada Gambar 4.23 dan 4.24.

Selama pengujian korosi *weight loss* ini, sampel baja galvanis mengalami pengurangan ketebalan *coating*. Dari grafik pada Gambar 4.12 dapat diamati bahwa semakin lama waktu pemendaman maka ketebalan *coating* galvanis akan berkurang. Hal tersebut didukung oleh hasil mikrostruktur dimana terlihat perubahan struktur lapisan *coating* galvanis pada sampel akhir, setelah penanaman 9 minggu.

Pengurangan ketebalan maupun perubahan struktur lapisan *coating* pada sampel baja galvanis di Bekasi dan Depok, ditunjukkan juga oleh hasil foto SEM pada Gambar 4.21 dan 4.22. Komposisi lapisan *coating* di analisa dengan EDS untuk mengetahui pengaruh korosi terhadap kerusakan struktur lapisan *coating*. Dengan adanya proses korosi, maka daerah eta (100% Zn) akan mengalami degradasi. Pada sampel baja galvanis di Bekasi (Tabel 4.22), titik 1 memiliki komposisi *coating* di dominasi oleh Zn dan tidak terdapat Fe sehingga menunjukkan bahwa daerah eta pada titik tersebut belum mengalami degradasi. Kemudian, tiga titik lainnya di dominasi oleh Zn dengan kandungan Fe dan oksigen yang sangat rendah. Namun, Zn dan Fe yang didapatkan bukan merupakan hasil proses korosi, melainkan berasal dari struktur lapisan *coating* tersebut (zeta, delta, gamma).

Proses korosi akan ditunjukkan jika kandungan oksigen yang didapat cukup besar sehingga membuktikan adanya oksidasi. Hal ini ditunjukkan pada sampel baja galvanis di Depok (Tabel 4.23) dimana pada titik 1, kandungan Zn lebih sedikit dari sampel Bekasi dan terdapat peningkatan oksigen dan Fe. Hal ini menunjukkan bahwa daerah eta sudah mengalami degradasi sehingga didapatkan Fe oleh analisa EDS. Perbedaan komposisi pada titik 1 (lapisan permukaan *coating*) tersebut disebabkan karena ketebalan *coating* pada sampel baja galvanis Depok lebih tipis dari sampel baja galvanis Bekasi sehingga dapat disimpulkan bahwa serangan korosi yang lebih parah terjadi pada baja galvanis Depok.

Komposisi lapisan *coating* pada ketiga titik lainnya menunjukkan kecenderungan yang sama dengan titik 1 sehingga menunjukkan bahwa pada titik tersebut lapisan *eta* sudah rusak dan terjadi korosi galvanik dimana Zn teroksidasi, ditunjukkan dengan adanya kandungan oksigen yang meningkat. Sedangkan Fe yang terdeteksi bukan merupakan hasil proses korosi, melainkan berasal dari struktur lapisan *coating* tersebut.

Foto mikrostruktur dengan mikroskop optik pada Gambar 4.18 – 4.20 dan hasil SEM pada Gambar 4.21 dan 4.22 menunjukkan adanya jarak antara *base metal* (baja) dan *coating* (Zn) dimana jarak tersebut berbeda-beda untuk setiap sampel. Perbedaan jarak antara baja dengan *coating* galvanis tersebut menunjukkan perbedaan sifat adhesif. Semakin dekat jaraknya, maka ditunjukkan sifat adhesif yang baik. Sifat adhesif yang baik didapatkan dari persiapan permukaan sampel sebelum dilakukan proses *coating*. Semakin kasar permukaan sampel, maka *coating* akan semakin mudah lekat atau berikatan dengan logam dasar.

Semakin jelek sifat adhesif *coating* Zn terhadap logam Fe, maka baja galvanis akan semakin rentan terjadinya *brown staining*. Hal tersebut diakibatkan oleh tipisnya struktur lapisan *coating* yang terbentuk dan lapisan intermetalik yang tidak tersusun rapat sehingga memudahkan penetrasi ion Fe bebas yang kemudian akan teroksidasi oleh lingkungan. Telah diketahui bahwa baja dengan kadar Silikon yang tinggi akan lebih rentan terhadap pembentukan *brown staining* daripada baja dengan kadar Silikon yang rendah. Baja dengan kadar Silikon yang rendah akan menebalkan lapisan *eta* dan membuat struktur lapisan intermetalik yang rapat atau kuat.