

3334210051\_Lusi  
Febriyanti\_Skripsi.docx  
*by Turnitin Student*

---

**Submission date:** 08-Jan-2026 11:21AM (UTC+0900)

**Submission ID:** 2852012155

**File name:** 3334210051\_Lusi\_Febriyanti\_Skripsi.docx (11.14M)

**Word count:** 16111

**Character count:** 97368

**PENGARUH KOMPOSISI AMONIUM CHLORIDE NUMBER  
(ACN) DAN TEMPERATUR PENCELUPAN TERHADAP  
KUALITAS LAPISAN HOT DIP GALVANIZING PADA BAJA JIS  
G 3141**

**SKRIPSI**

Dibuat untuk memenuhi syarat mendapatkan gelar Sarjana Teknik dari  
Jurusan Teknik Metalurgi Universitas Sultan Ageng Tirtayasa



Oleh:

Lusi Febriyanti  
3334210051

**JURUSAN TEKNIK METALURGI FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS SULTAN AGENG TIRTAYASA**

**CILEGN – BANTEN**

**2025**

**LEMBAR PENGESAHAN**

**PENGARUH KOMPOSISI AMONIUM CHLORIDE NUMBER  
(ACN) DAN TEMPERATUR PENCELUPAN TERHADAP  
KUALITAS LAPISAN HOT DIP GALVANIZING PADA BAJA  
JIS G 3141**

**1  
SKRIPSI**

Dibuat untuk memenuhi syarat mendapatkan gelar Sarjana Teknik dari  
Jurusan Teknik Metalurgi Universitas Sultan Ageng Tirtayasa

Disetujui untuk Jurusan Teknik Metalurgi Oleh

**Pembimbing I**

**Pembimbing II**

**Suryana, S.T., M.Si.**  
NIP. 197402162001121001

**Yanuar Nugraha, S.T., MT.**  
NIP. 2021081

LEMBAR PERSETUJUAN

<sup>9</sup>**PENGARUH KOMPOSISI AMONIUM CHLORIDE NUMBER  
(ACN) DAN TEMPERATUR PENCELUPAN TERHADAP  
KUALITAS LAPISAN HOT DIP GALVANIZING PADA BAJA JIS  
G 3141**

<sup>1</sup>**SKRIPSI**

Disusun dan diajukan oleh:

**Lusi Febriyanti**

**3334210051**

Telah disidangkan di depan dewan penguji pada tanggal

	Susunan Dewan Penguji	Tanda Tangan
Penguji I	:	
Penguji II	:	
Penguji III	:	

Skripsi ini telah diterima sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

Mengetahui

Ketua Jurusan Teknik Metalurgi

Dr. Eng. Abdul Aziz, S.T., M.T.  
NIP. 198003072005011002

## LEMBAR PERNYATAAN

Dengan ini saya sebagai penulis Skripsi berikut:

**Judul** : Pengaruh Komposisi *Amonium Chloride Number* (ACN) Dan  
Temperatur Pencelupan Terhadap Kualitas Lapisan *Hot Dip  
Galvanizing* Pada Baja JIS G 3141

**Nama** : Lusi Febriyanti

**NIM** : 3334210051

**Fakultas** : Teknik

Menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa Skripsi ini ialah benar hasil karya asli saya dan tidak memuat pernyataan pada skripsi hasil karya orang lain, kecuali dinyatakan melalui rujukan atau literatur yang benar dan dapat dipertanggungjawabkan. Apabila dikemudian hari ditemukan hal-hal yang menunjukkan bahwa sebagian atau seluruh karya ini bukan karya saya, maka saya bersedia dituntut melalui hukum yang berlaku. Saya juga bersedia menanggung segala akibat hukum yang timbul dari pernyataan yang secara sadar dan sengaja saya nyatakan melalui lembar ini.

Cilegon, 1 Januari 2026

Lusi Febriyanti  
NIM. 3334210051

## **KATA PENGANTAR**

Puji syukur penulis ucapkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, atas segala limpahan kebaikan dan kemurahan-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian dan laporan Skripsi ini dengan judul<sup>1</sup> merupakan salah satu syarat kelulusan sebagai sarjana teknik metalurgi di Fakultas Teknik Universitas Sultan Ageng Tirtayasa. Dalam kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Abdul Aziz, S.T., M.T., Ph.D selaku ketua jurusan Teknik Metalurgi.
2. Ibu selaku Anistasia Milandia, S.T., M.T., Koordinator Skripsi.
3. Suryana, S.T., M.Si., selaku Dosen Pembimbing pada penyusunan proposal skripsi.
- 14 4. Seluruh staf dan karyawan dan semua pihak instansi yang terkait dengan penelitian ini.
5. Kedua Orang Tua, abang dan teman – teman atas doa dan dukungannya.

Penulis menyadari bahwa Skripsi ini masih terdapat kekurangan, sehingga kritik dan saran yang membangun dari berbagai pihak diharapkan. Penulis berharap agar Skripsi ini bermanfaat khususnya bagi penulis dan bagi pembaca pada umumnya.

Cilegon, 23 Mei 2025

Lusi Febriyanti

16  
**DAFTAR ISI**

	<b>Halaman</b>
<b>HALAMAN JUDUL</b> .....	i
<b>LEMBAR PENGESAHAN</b> .....	ii
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	iii
<b>DAFTAR ISI</b> .....	iv
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	vi
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	vii
<b>DAFTAR LAMPIRAN</b> .....	viii
<b>BAB I PENDAHULUAN</b>	
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	3
1.3 Hipotesis .....	3
1.4 Tujuan Penelitian.....	3
1.5 Ruang Lingkup .....	4
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b>	
2.1 Baja.....	5
2.2 Baja G 3141 .....	6
2.3 Lapisan Seng (Zn) .....	7
2.4 <i>Hot Dip Galvanizing</i> .....	8
2.4.1 <i>Pre-treatment</i> .....	11
2.4.1.1 <i>Degreasing</i> .....	11
2.4.1.2 <i>Pickling</i> .....	12
2.4.1.3 Pembilasan ( <i>Rinsing</i> ).....	13
2.4.2 <i>Fluxing</i> .....	14
2.4.3 <i>Drying</i> .....	16
2.4.4 Tahap Pencelupan ( <i>Galvanizing</i> ) .....	17
2.4.5 <i>Quenching</i> .....	18
2.4.6 <i>Finishing</i> .....	19
2.5 Polarisasi potensiodinamik .....	19
2.6 Metalografi .....	20

<b>1</b>	<b>BAB III METODE PENELITIAN</b>	
	3.1 Diagram Alir.....	25
	3.2 Alat dan Bahan .....	26
	3.2.1 Alat-alat yang Digunakan.....	26
	3.2.2 Bahan-bahan yang Digunakan.....	27
	3.3 Prosedur Penelitian .....	27
	3.3.1 <i>Pre-treatment</i> .....	27
	3.3.2 Proses <i>Hot Dip Galvanizing</i> .....	28
<b>1</b>	3.3.3 Pengujian Ketebalan.....	28
	3.3.4 Pengujian Metalografi .....	29
	3.3.5 Pengujian Korosi.....	29
<b>1</b>	<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>30</b>
	<b>LAMPIRAN</b>	

## DAFTAR TABEL

Nomor	Judul Tabel	Halaman
2.1	Komposisi <b>Kimia</b> Baja JIS G 3141	7
2.2	<sup>8</sup> Sifat lapisan paduan Fe-Zn pada proses <i>Hot Dip Galvanizing</i>	9
2.3	Perbedaan <i>Pickling</i> antara HCl dengan H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	13
2.4	<sup>10</sup> <i>Grade</i> Ketebalan Lapisan Berdasarkan Kategori Material Sesuai Standar ASTM A123	18

## **DAFTAR GAMBAR**

<b><u>Nomor</u></b>	<b><u>Judul Gambar</u></b>	<b><u>Halaman</u></b>
2.1	<i>Galvanic Series of Metals</i>	8
2.2	Struktur Mikro Lapisan Galvanis	9
3.1	Diagram Alir Penelitian	25

## <sup>2</sup>**BABI**

### **PENDAHULUAN**

#### **1.2 Latar Belakang**

Seiring dengan kemajuan teknologi dan perkembangan zaman, kebutuhan akan material berkualitas tinggi dalam berbagai sektor industri meningkat. Logam merupakan <sup>37</sup> salah satu jenis material yang paling umum digunakan karena sifatnya yang kuat, tahan lama, dan dapat digunakan dalam berbagai kondisi. Di antara berbagai jenis logam, baja merupakan material yang memiliki banyak keunggulan, seperti kekuatan, ketangguhan, dan daya tahan. Karena sifat-sifat tersebut, baja menjadi pilihan utama dalam berbagai aplikasi struktural seperti pembangunan jembatan, rangka bangunan, serta pembuatan kendaraan. Baja JIS G 3141 <sup>40</sup> merupakan baja karbon rendah dengan kandungan karbon sekitar 0,12% yang banyak digunakan dalam berbagai aplikasi, terutama di industri otomotif karena memiliki sifat mekanik yang baik, seperti <sup>3</sup> keuletan dan ketangguhan yang sangat baik. Baja ini umumnya digunakan untuk proses *metal forming* pelat logam, seperti pada pembuatan bodi dan rangka kendaraan serta berbagai <sup>2</sup> komponen otomotif lainnya [1]. Namun, baja JIS G 3141 memiliki kelemahan utama seperti baja lainnya yaitu rentan terhadap korosi terutama saat disimpan dalam jangka waktu yang lama di lingkungan lembap dan korosif. Korosi dapat menimbulkan dampak yang cukup serius yaitu dapat merusak struktur, mengurangi masa pakai, bahkan dapat menyebabkan kegagalan sistem yang krusial.

Salah satu metode yang efektif untuk meningkatkan ketahanan korosi baja yaitu *hot dip galvanizing*. *Hot dip galvanizing* merupakan proses pelapisan logam dengan cara mencelupkan logam dasar ke dalam seng cair yang telah dipanaskan hingga meleleh. Sebagai hasil dari reaksi antara kedua logam selama proses pencelupan, lapisan intermetalik Fe-Zn terbentuk pada permukaan baja [2]. Lapisan ini tidak hanya melekat kuat secara metalurgi, tetapi juga berfungsi sebagai penghalang dan proteksi katodik sehingga permukaan baja dapat terlindungi dan tahan lama terhadap korosi, bahkan saat digunakan dalam kondisi lingkungan yang lembap atau korosif.

Secara teori metode *hot dip galvanizing* terlihat cukup sederhana, namun secara praktiknya menunjukkan bahwa proses ini cukup kompleks dikarenakan terdapat berbagai parameter yang mempengaruhi hasil akhir produk. Lapisan akhir sangat bergantung pada pengendalian parameter seperti jenis material dasar, proses *pretreatment*, komposisi *fluxing*, komposisi lapisan pelindung, waktu dan temperatur pencelupan, laju pengangkatan dan pendinginan. Parameter-parameter tersebut mempengaruhi karakteristik lapisan seperti ketebalan lapisan, daya lekat, struktur mikro, dan hasil visual pelapisan. Dalam proses *hot dip galvanizing*, sering kali terjadi bahwa ketebalan lapisan seng dengan ketebalan yang melebihi atau tidak sesuai dengan standar yang diharapkan. Ketidaksesuaian ini dapat menyebabkan penggunaan seng yang berlebihan sehingga biaya produksi akan semakin meningkat. Salah satu faktor utama yang menyebabkan ketebalan lapisan yang berlebihan adalah kurangnya dalam mengontrol temperatur selama proses pencelupan. Proses *fluxing* juga mempengaruhi kualitas lapisan *hot dip galvanizing*.

*Fluxing* merupakan tahap pelapisan awal permukaan baja sebelum dilakukannya proses *hot dip galvanizing*. komposisi *fluxing* berperan penting untuk meningkatkan daya lekat lapisan seng, sebagai katalisator reaksi dalam pembentukan lapisan intermetalik Fe-Zn dan <sup>2</sup> **menghindari terjadinya oksidasi pada permukaan baja yang telah dibersihkan**. Dalam proses ini, baja dicelupkan ke dalam larutan *flux* yang terdiri dari campuran *zinc chloride* ( $ZnCl_2$ ) dan *ammonium chloride* ( $NH_4Cl$ ), yang dikenal sebagai *Zinc Ammonium Chloride* (ZAC). Dalam mengendalikan komposisi *fluxing* dilakukan dengan memperhatikan nilai perbandingan antara konsentrasi *ammonium chloride* ( $NH_4Cl$ ) terhadap *zinc chloride* ( $ZnCl_2$ ) yang dikenal sebagai *Ammonium Chloride Number* (ACN). Komposisi *fluxing* sangat berpengaruh terhadap kualitas lapisan galvanis yang dihasilkan. Rasio komposisi yang tidak tepat dapat menghasilkan kualitas lapisan yang kurang optimal sehingga akan menurunkan ketahanan baja terhadap korosi [3]. Oleh karena itu, <sup>28</sup> **penelitian ini dilakukan untuk mengkaji pengaruh variasi komposisi *fluxing* dan temperatur pencelupan terhadap kualitas *hot dip galvanizing* untuk memperoleh kualitas lapisan yang optimal baik dari segi ketahanan korosi, struktur mikro, hasil visual, maupun ketebalan lapisan.**

## <sup>25</sup> **1.2 Rumusan Masalah**

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan di atas, maka terdapat rumusan masalah dalam penelitian ini, yaitu:

1. Bagaimana pengaruh komposisi *Amonium Chloride Number* (ACN) dan temperatur pencelupan terhadap ketebalan lapisan *hot dip galvanizing* berdasarkan acuan standar ASTM A123?
2. Bagaimana pengaruh komposisi *Amonium Chloride Number* (ACN) dan temperatur pencelupan terhadap hasil visual lapisan?
3. Bagaimana pengaruh komposisi *Amonium Chloride Number* (ACN) dan temperatur pencelupan terhadap ketahanan korosi?
4. Bagaimana pengaruh komposisi *Amonium Chloride Number* (ACN) dan temperatur pencelupan terhadap karakterisasi struktur mikro *hot dip galvanizing*?
5. Bagaimana pengaruh komposisi *Amonium Chloride Number* (ACN) dan temperatur pencelupan terhadap komposisi unsur lapisan?

### 1.3 Hipotesis

Komposisi ACN mempengaruhi meningkatkan daya lekat lapisan seng, sebagai katalisator reaksi dalam pembentukan lapisan intermetalik Fe-Zn dan menghindari terjadinya oksidasi pada permukaan baja yang telah dibersihkan. Sementara itu, temperatur pencelupan juga mempengaruhi viskositas seng cair dan reaktivitas larutan, yang berdampak pada ketebalan dan struktur mikro lapisan.

### 1.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari pelaksanaan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui pengaruh komposisi *Amonium Chloride Number (ACN)* dan temperatur pencelupan terhadap ketebalan lapisan *hot dip galvanizing* berdasarkan acuan standar ASTM A123
2. Mengetahui pengaruh komposisi *Amonium Chloride Number (ACN)* dan temperatur pencelupan terhadap ketahanan korosi
3. Mengetahui pengaruh komposisi *Amonium Chloride Number (ACN)* dan temperatur pencelupan terhadap struktur mikro lapisan *hot dip galvanizing*?
4. Mengetahui pengaruh komposisi *Amonium Chloride Number (ACN)* dan temperatur pencelupan terhadap komposisi unsur lapisan.

#### 1.5 Ruang Lingkup

Adapun ruang lingkup dari penelitian yang akan dilakukan yaitu sebagai berikut:

1. Spesimen baja yang akan dilapisi yaitu baja JIS G 3141
2. Spesimen tersebut dilakukan proses *pretreatment*, yang mencakup pembersihan dengan *caustic cleaning*, *pickling*, *rinsing*, dan *fluxing*. Setelah dilakukan proses *hot dip galvanizing*, spesimen dicelupkan ke dalam bak *pretreatment* dan *quenching* secara berurutan.
3. Proses pelapisan dilakukan dengan cara pencelupan pada tungku *hot dip galvanizing*
4. Variasi komposisi ACN 1,5; 1,75; 2,00;
5. Variasi temperatur pencelupan yaitu 450°C, 500°C, 550°C
6. Waktu pencelupan *hot dip galvanizing* selama 45 detik

<sup>12</sup>/. Pengujian yang dilakukan yaitu uji ketebalan lapisan, uji metalografi, dan uji ketahanan korosi.

## <sup>1</sup> 1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan pada skripsi ini terdiri dari 5 Bab. Bab I berisikan latar belakang penelitian, rumusan masalah, hipotesis, tujuan penelitian, ruang lingkup, dan sistematika penulisan.

Bab II berisikan pembahasan mengenai pengertian baja, baja G 3141, lapisan seng, *Hot dip galvanizing*, tahap-tahap proses *hot dip galvanizing* yang meliputi *pre-treatment (degreasing, pickling, dan rinsing)*, tahap *fluxing*, tahap pencelupan, tahap *quenching*, dan tahap *finishing*. Adapun pembahasan mengenai pengujian yang akan dilakukan yaitu polarisasi potensiodinamik dan metalografi.

Bab III memuat <sup>1</sup> metodologi penelitian yang mencakup diagram alir penelitian, alat dan bahan yang digunakan, prosedur pelaksanaan penelitian, serta teknik pengujian yang diterapkan.

Bab IV memuat hasil dan pembahasan penelitian yang meliputi pengujian ketebalan lapisan, pengamatan visual hasil *hot-dip galvanizing*, analisis struktur mikro lapisan, serta hasil pengujian korosi. Selain itu, disajikan pula pembahasan <sup>41</sup> hasil penelitian yang didukung oleh teori-teori yang telah diuraikan pada Bab II.

Bab V berisikan kesimpulan utama penelitian yang dirumuskan secara spesifik sesuai dengan tujuan penelitian, serta saran yang berisi usulan untuk penelitian lanjutan berdasarkan temuan yang diperoleh selama penelitian. Pada bagian akhir disajikan daftar pustaka sebagai kumpulan sumber acuan yang

digunakan, sedangkan lampiran memuat data-data pendukung yang berkaitan dengan penelitian ini.

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Baja**

Baja merupakan logam paduan dengan besi sebagai unsur utama dan karbon sebagai unsur paduan<sup>45</sup> yang paling utama. Jumlah karbon dalam baja umumnya berkisar antara 0,2% hingga 2,1% berat, tergantung pada jenisnya. Karbon dalam baja berperan dalam meningkatkan kekerasan baja dengan menghambat pergerakan dislokasi pada struktur kisi kristal atom besi.<sup>29</sup> Selain karbon, unsur paduan lainnya seperti kromium, kobalt, nikel, titanium, vanadium, dan tungsten juga sering ditambahkan untuk memodifikasi sifat mekanik baja. Variasi jumlah karbon dan unsur paduan lainnya memberikan kemungkinan untuk menghasilkan<sup>34</sup> berbagai jenis baja dengan sifat yang berbeda. Meningkatkan jumlah karbon dalam baja dapat meningkatkan kekerasan dan kekuatan tariknya, tetapi juga membuatnya lebih rapuh dan mengurangi keuletan.<sup>7</sup> Baja karbon merupakan jenis baja yang terdiri dari unsur utama besi dan karbon, serta sejumlah kecil unsur tambahan yang biasanya berasal dari proses produksi baja atau besi, seperti mangan dan silikon,<sup>31</sup> serta unsur pengotor seperti belerang, fosfor, oksigen, nitrogen, dan lainnya, yang kadarnya dikontrol seminimal mungkin untuk tidak memengaruhi sifat dasar baja. Secara umum, baja karbon dibagi ke dalam beberapa kelompok [4] :

- a. Baja karbon rendah merupakan jenis baja yang mengandung karbon kurang dari 0,25% dalam strukturnya. Baja ini dikenal memiliki tingkat keuletan

dan ketangguhan yang tinggi, namun memiliki kekerasan dan ketahanan aus yang rendah. Secara umum, baja karbon rendah digunakan sebagai bahan komponen struktur bangunan, pipa, jembatan, bodi kendaraan, dan masih banyak lagi.

- b. <sup>7</sup> Baja karbon sedang merupakan jenis baja yang mengandung karbon berkisar 0,25% hingga 0,55%. Baja ini memiliki keunggulan dalam sifat mekanisnya yang lebih kuat<sup>35</sup> serta tingkat kekerasan yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan baja karbon rendah. Karena kandungan karbonnya yang lebih tinggi, baja ini memungkinkan baja untuk mengalami proses pengerasan melalui<sup>11</sup> perlakuan panas (*heat treatment*) yang tepat. Secara umum, baja karbon sedang digunakan dalam pembuatan komponen seperti poros, rel kereta, roda gigi, baut, pegas, serta bagian-bagian mesin lainnya.
- c. Baja karbon tinggi merupakan jenis baja yang<sup>7</sup> memiliki kandungan karbon antara 0,55% hingga 0,95%. Baja ini memiliki keunggulan dalam ketahanan terhadap panas, kekerasan, dan kekuatan tarik yang sangat tinggi. Namun, sifat keuletannya rendah, sehingga cenderung lebih getas. Karena tingginya kandungan martensit dalam struktur mikro, baja karbon tinggi cukup sulit untuk mengalami peningkatan kekerasan melalui proses perlakuan panas, khususnya pada pengerasan permukaan, sehingga hasil yang diperoleh kurang optimal.

## 2.2 Baja G 3141

Baja JIS G 3141 merupakan <sup>42</sup> baja karbon rendah yang memiliki kandungan karbon sekitar 0.12%. Baja ini diproses menggunakan metode *cold rolling*, yaitu <sup>53</sup> proses pengerolan material yang dilakukan pada temperatur di bawah temperatur rekristalisasinya. Baja ini juga disebut sebagai SPCC (*Steel Plate Cold Rolled Coiled*) dan termasuk dalam kategori baja kualitas komersial berdasarkan *Japanese Industrial Standards (JIS)* [1]. Baja G 3141 sering disebut juga sebagai baja putih, karena <sup>7</sup> memiliki permukaan yang lebih halus, memiliki ketebalan yang lebih tipis, serta ukuran yang lebih tepat. Selain itu, baja G 3141 dikenal memiliki kemampuan bentuk yang sangat baik dan cocok untuk proses pembentukan pelat logam. Karena keunggulan sifat mekanik dan kemudahan pembentukannya, baja G 3141 sangat cocok digunakan dalam berbagai aplikasi seperti bodi mobil, rangka kendaraan, peralatan elektronik, dan komponen otomotif lainnya [4].

**Tabel 2.1** Komposisi Kimia Baja JIS G 3141 [4]

Kandungan Unsur (%)								
Fe	<sup>57</sup> C	Si	Mn	Cr	Ni	Al	S	P
99,3	0,124	0,0215	0,187	0,0253	0,0207	0,0387	0,0125	0,0175

### 2.3 Lapisan Seng (Zn)

<sup>30</sup> Seng (Zn) merupakan logam yang biasa digunakan untuk melapisi baja, terutama untuk melindungi karat yang disebabkan oleh udara dan kelembapan lingkungan. Seng membentuk lapisan pelindung alami (film) pada permukaannya ketika terpapar udara, yang mampu mencegah korosi. Di antara berbagai jenis logam pelapis, seng memiliki beberapa keunggulan, seperti ketahanan korosi yang

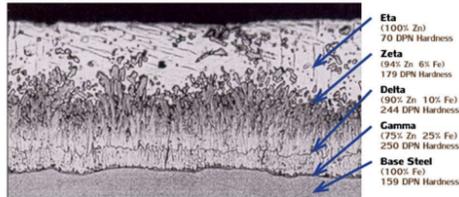
baik, penampilan permukaan yang menarik, dan biaya yang relatif murah. Oleh karena itu, seng adalah pilihan terbaik dibandingkan dengan logam pelapis lainnya, seperti nikel atau krom, yang biasanya lebih mahal. Pelapisan baja dengan menggunakan logam seng terdapat dua metode, yaitu *hot dip galvanizing* dan *electroplating* [5]. Dalam melindungi baja dari serangan korosi, seng bekerja melalui dua cara yaitu *barrier protection* dan *cathodic protection*. Dalam *barrier protection*, seng memberikan lapisan pelindung pada permukaan baja untuk mencegah baja dari karat. Lapisan ini berfungsi sebagai penghalang (*barrier protection*) yang menjaga baja agar tidak terkena udara, air, atau zat korosif lainnya secara langsung. Baja akan tetap terlindungi selama lapisan tetap utuh, tetapi jika lapisan tergores atau rusak, bagian yang terbuka akan mulai berkarat. Lapisan seng harus menempel kuat dan tahan terhadap goresan untuk memaksimalkan perlindungan. Lapisan seng yang dibuat dengan metode *hot dip galvanizing* jauh lebih efektif daripada cat karena mampu menutup baja secara menyeluruh dan kokoh. Selain sebagai *barrier protection*, seng juga memberikan perlindungan katodik (*cathodic protection*), karena seng akan mengalami korosi terlebih dahulu untuk melindungi baja dasar di bawahnya. *Galvanic Series of Metals* merupakan urutan logam yang disusun berdasarkan tingkat aktivitas elektrokimianya di dalam air laut. Urutan logam dalam deret menentukan logam mana yang akan berfungsi sebagai anoda atau katoda ketika dua logam dihubungkan dalam sel elektrolit. Logam yang berada di urutan yang lebih tinggi di daftar bersifat anodik terhadap logam yang berada di bawahnya, yang berarti logam tersebut akan memberikan perlindungan katoda [6].

CORRODED END Anodic or less noble
Magnesium
Zinc
Aluminum
Cadmium
Steel
Lead
Tin
Nickel
Brass
Bronzes
Copper
Nickel-Copper Alloys
Stainless Steels (passive)
Silver
Gold
Platinum
Cathodic or most noble PROTECTED END

Gambar 2.1 Galvanic Series of Metals [6]

#### 2.4 <sup>17</sup> Hot Dip Galvanizing

*Hot dip galvanizing* merupakan proses pelapisan logam dengan cara mencelupkan logam dasar ke dalam seng cair yang telah dipanaskan hingga meleleh. Saat <sup>3</sup> logam dasar dicelupkan ke dalam bak berisi seng cair, terjadi reaksi metalurgi antara seng dan logam dasar, membentuk lapisan pelindung yang terdiri dari beberapa fasa yang saling mengikat kuat secara metalurgis. Lapisan galvanis memiliki dua jenis perlindungan utama, yaitu sebagai *barrier protection* dan sebagai anoda korban. Sebagai *barrier protection*, lapisan ini mencegah logam dasar bersentuhan langsung dengan lingkungan luar. Sementara itu, sebagai anoda korban, seng akan mengalami korosi terlebih dahulu, sehingga melindungi logam dasar dari kerusakan [2].



**Gambar 2.2** Struktur Mikro Lapisan Galvanis [2]

Lapisan seng hasil proses *hot dip galvanizing* dikenal memiliki kekuatan, ketahanan, dan kekerasan yang tinggi. Setiap lapisan fasa yang terbentuk memiliki karakteristik yang berbeda-beda, baik dari segi komposisi kimia maupun tingkat kekerasannya. Lapisan paling luar yaitu seng oksida ( $ZnO$ ), namun lapisan ini kurang diharapkan karena memiliki ketahanan korosi yang rendah. Lapisan eta ( $\eta$ ) yang berada tepat di atas permukaan baja lebih murni dan lunak, sedangkan lapisan gamma ( $\gamma$ ) yang berada paling bawah mengandung campuran seng dan besi tertinggi, menjadikannya yang paling keras dan kuat di antara lapisan lainnya [2]. Nilai kekerasan, titik lebur, dan sifat mekanik pada fasa eta ( $\eta$ ), zeta ( $\zeta$ ), delta ( $\delta$ ), dan gamma ( $\gamma$ ) berbeda-beda yang dapat dilihat pada Tabel 2.2.

**Tabel 2.2** Sifat lapisan paduan Fe-Zn pada proses *Hot Dip Galvanizing* [2]

Fase	Paduan	Komposisi (%Fe)	Titik Lebur (°C)	VHN	Sifat Mekanik
Eta	Zn	0,03	419	70-72	Lunak dan ulet

Zeta	$\text{FeZn}_{13}$	5,7-6,3	530	175-185	Keras dan getas
Delta	$\text{FeZn}_7$	7,0-11	530-670	240-300	Ulet
Gamma	$\text{Fe}_3\text{Zn}_{10}$	20-27	670-780		Tipis, keras dan getas
Base Steel	<sup>38</sup> Fe	98-99	1530	150-175	Ulet

Reaksi antara besi (Fe) dan seng cair (Zn) terbentuk empat fasa intermetalik yaitu fasa eta ( $\eta$ ), zeta ( $\zeta$ ), delta ( $\delta$ ), dan gamma ( $\gamma$ ) seperti yang dapat dilihat pada Gambar 2.3. Masing-masing fasa ini memiliki struktur kristal dan karakteristik yang berbeda yaitu sebagai berikut [7].

1. Fasa eta ( $\eta$ )

Fasa ini terdiri hampir 100% seng murni karena kelarutan besi dalam seng cair sangat rendah (hanya 0,002%) pada temperatur leburnya.

Struktur kristal pada fasa ini berbentuk heksagonal padat (*Closed Packed Hexagonal*).

2. Fasa zeta ( $\zeta$ )

Fasa ini mengandung besi (Fe) sebesar 6,0-6,2% dan stabil pada temperatur antara 530°C dan 644°C. Struktur kristal pada fasa ini berbentuk monoklinik.

3. Fasa delta ( $\delta$ )

Fasa ini mengandung besi (Fe) sebesar 7-12% dan stabil pada temperatur 620°C-644°C. Struktur kristal pada fasa ini berbentuk heksagonal.

#### 4. Fasa gamma ( $\gamma$ )

Fasa ini mengandung besi (Fe) sebesar 20,5-28,0% dan stabil pada temperatur 668°C-780°C. Struktur kristal pada fasa ini berbentuk *body-centered cubic*

Fasa delta ( $\delta$ ) terbentuk melalui transformasi dari fasa zeta ( $\zeta$ ) serta fasa gamma ( $\gamma$ ), yang merupakan hasil reaksi peritektik antara besi padat dan seng cair. Sementara itu, fasa eta ( $\eta$ ) terbentuk karena adanya seng murni yang melekat pada permukaan benda kerja saat diangkat dari bak galvanisasi [7]. Proses pelapisan dengan metode *hot dip galvanizing* umumnya sama dengan proses pelapisan dengan metode lain, yaitu memerlukan beberapa tahap pengerjaan yaitu tahap *pre-treatment* (*degreasing*, *pickling*, dan *rinsing*), tahap *fluxing*, tahap pencelupan, tahap pendinginan (*quenching*), dan tahap *finishing*.

##### 2.4.1 Pre-treatment

Pada proses pelapisan logam terdapat tahap *pre-treatment* yang memiliki peran penting dalam membersihkan permukaan spesimen dari semua kontaminasi baik asam atau basa. Pembersihan spesimen ini dilakukan dengan tujuan agar permukaan logam benar-benar bersih sehingga lapisan pelapis dapat melekat dengan baik dan menghasilkan kualitas pelapisan yang lebih baik. Proses pembersihan disesuaikan dengan jenis kontaminan yang menempel pada permukaan spesimen. Secara umum,

metode pembersihan terbagi menjadi dua jenis, yaitu pembersihan fisik dan kimia. Pembersihan secara fisik dilakukan melalui metode mekanis, seperti pengamplasan menggunakan mesin gerinda, yang berguna untuk meratakan permukaan, menghilangkan goresan, dan membersihkan sisa geram. Sedangkan pembersihan secara kimia mencakup penggunaan bahan kimia tertentu yang bertujuan untuk melarutkan serta menghilangkan kotoran pada permukaan logam ini, pada urutan sejumlah tahapan dianggap perlu dilakukan *degreasing*, *pickling*, dan *rinsing* [2].

#### 2.4.1.1 *Degreasing*

*Degreasing* merupakan tahap awal dalam proses *pre-treatment* yang sangat penting dalam proses *hot dip galvanizing*. Tujuan utama dari *degreasing* yaitu untuk menghilangkan berbagai jenis kotoran yang menempel di permukaan baja seperti minyak, kotoran, cat, lemak, dan kotoran padat lainnya. <sup>54</sup> Jika kotoran tersebut tidak dibersihkan dengan baik, maka hal tersebut dapat mengganggu proses selanjutnya seperti *pickling*, *fluxing*, dan *galvanizing*, serta menurunkan kualitas lapisan galvanis. Misalnya, jika minyak masuk ke dalam *zinc bath*, maka minyak tersebut akan menguap dan menghasilkan gas yang menyebabkan terbentuknya *pinholes* pada lapisan, sehingga mengurangi ketahanan korosi pada permukaan baja [8]. Untuk mengatasi hal tersebut, industri biasanya menerapkan proses *degreasing* kimia dengan menggunakan larutan alkali seperti natrium hidroksida (NaOH atau soda kaustik) dengan

konsentrasi 5%-10%. Larutan ini dipanaskan pada suhu antara 70°C hingga 90°C, dan digunakan untuk merendam spesimen selama sekitar 10 menit. Suhu yang panas dapat mempercepat pelarutan dan mengeluarkan kotoran yang tidak dapat dihilangkan dari permukaan baja [2].

#### 2.4.1.2 Pickling

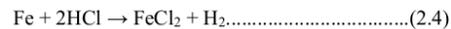
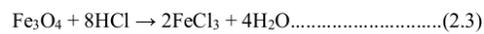
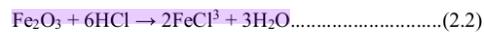
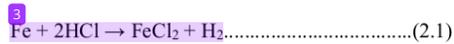
*Pickling* merupakan tahap penting dalam proses *pre-treatment* sebelum proses galvanisasi untuk menghilangkan karat dan lapisan oksida seperti  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{FeO}$ , dan  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  yang menempel pada permukaan baja. Baja yang terpapar udara dalam waktu lama mengalami oksidasi, dan apabila lapisan oksida ini tidak dibersihkan akan mengganggu proses *fluxing* dan mengurangi kualitas lapisan galvanis. Proses *pickling* dilakukan dengan cara mencelupkan permukaan baja ke dalam larutan asam HCl atau  $\text{H}_2\text{SO}_4$  dengan konsentrasi 10%-15% selama 15-20 menit [2]. Konsentrasi asam, kadar besi, dan sirkulasi atau pengadukan larutan asam memengaruhi efektivitas proses *pickling*. Kelebihan dan kekurangan penggunaan HCl dan  $\text{H}_2\text{SO}_4$  dalam proses *pickling* ditunjukkan pada Tabel 2.1 berikut.

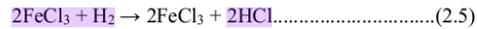
**Tabel 2.3** Perbedaan *Pickling* antara HCl dengan  $\text{H}_2\text{SO}_4$

No.	Keterangan	$\text{H}_2\text{SO}_4$	HCl
1	Biaya	Murah	Lebih mahal

2	Temperatur optimal	65-80°C	20-35°C
3	Laju <i>pickling</i>	Rendah	Tinggi
4	Kondisi lapangan	Stabil, tidak berbau	Berasap dan berbau
5	Pencemaran lingkungan	Rendah	Tinggi
6	Tingkat penanganan	Mudah	Sulit

Reaksi (2.1), (2.2), dan (2.3) merupakan bagian dari mekanisme proses *pickling* yang menunjukkan bahwa karat dapat dihilangkan melalui reaksi ionik pembentukan garam klorida. Namun, jika proses ini berlangsung terlalu lama atau tidak terkontrol, dapat terjadi *overpickling* yang ditunjukkan oleh reaksi (2.4), (2.5), dan (2.6) yang menghasilkan gas hidrogen (H<sub>2</sub>). Untuk mendapatkan permukaan baja yang halus, bersih, dan mendapatkan kualitas lapisan galvanis yang baik, waktu dan konsentrasi larutan selama proses *pickling* harus dikontrol dengan tepat karena gas hidrogen yang dihasilkan dapat menyebabkan permukaan baja melepuh dan menurunkan kualitas akhir pelapisan [2].





#### 2.4.1.3 Pembilasan (*Rinsing*)

Setelah proses *pickling*, permukaan baja cenderung masih mengandung sisa asam klorida (HCl), ion besi, dan berbagai bahan lainnya. Sisa-sisa ini dapat menghambat efektivitas proses *fluxing* dan galvanisasi selanjutnya. Selain itu, sisa-sisa tersebut juga berpotensi menurunkan kualitas lapisan galvanis serta mengganggu kestabilan proses produksi berikutnya. Untuk mengatasi hal ini, proses pembilasan permukaan baja secara menyeluruh sangat penting sebelum tahap pencelupan ke larutan *flux* [8]. Proses pembilasan dilakukan dalam dua tahap, yaitu pembilasan pertama dilakukan setelah proses *caustic cleaning* untuk menghilangkan sisa-sisa soda kaustik (NaOH) dengan menggunakan air bersih pada temperatur kamar, dan pembilasan kedua dilakukan setelah proses *pickling* untuk menghilangkan sisa-sisa asam seperti HCl atau H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> yang menempel pada permukaan baja, juga menggunakan air bersih pada temperatur kamar. Tahap pembilasan kedua sangat penting karena apabila tidak dilakukan dengan baik, maka sisa-sisa asam dapat mengkontaminasi permukaan baja [2].

#### 2.4.2 *Fluxing*

*Fluxing* merupakan proses pelapisan awal permukaan baja menggunakan larutan *Zinc Ammonium Chloride* (ZAC) dengan temperatur

*fluxing* sekitar 60°C-80°C selama 5-10 menit. Pemilihan rentang temperatur *fluxing* ini bertujuan untuk memastikan <sup>3</sup> perpindahan panas pada baja berlangsung secara perlahan dan bertahap, sehingga dapat menghindari deformasi plastis yang berpotensi mengganggu pelekatan lapisan seng pada benda kerja saat proses galvanisasi [2]. Adapun tujuan utama dilakukannya proses *fluxing* yaitu meningkatkan daya lekat lapisan seng pada permukaan baja, bertindak sebagai katalisator dalam pembentukan lapisan intermetalik Fe-Zn, serta mencegah oksidasi ulang pada permukaan baja yang telah dibersihkan [7]. Pada umumnya, larutan *fluxing* dalam proses *hot dip galvanizing* menggunakan campuran *Zinc Chloride* ( $ZnCl_2$ ) dan *Ammonium Chloride* ( $NH_4Cl$ ). Namun, terdapat beberapa alternatif *flux* lainnya seperti  $NiCl_2$ ,  $SnCl_2$ , dan  $CdCl_2$ .  $NiCl_2$  mampu membuat permukaan baja menjadi mengkilap, akan tetapi dapat mengurangi ketebalan lapisan galvanis.  $SnCl_2$  juga mampu membuat permukaan baja menjadi mengkilap dan dapat mengurangi ketebalan lapisan. Namun, penggunaan Sn perlu dikontrol dengan ketat karena jika timah yang berlebih dapat menghasilkan inklusi eutektik Zn-Sn yang menurunkan ketahanan korosi.  $CdCl_2$  digunakan sebagai alternatif untuk mengurangi volatilitas selama proses galvanisasi. Berbeda dengan larutan *fluxing*, penggunaan  $CdCl_2$  menghasilkan lebih sedikit uap berbahaya, sehingga lebih ramah lingkungan. Namun, sifat toksik  $CdCl_2$  membuatnya perlu digunakan dengan pengawasan yang ketat [9].

Dalam proses *fluxing* terdapat beberapa faktor penting yang perlu diperhatikan yaitu komposisi larutan, temperatur, dan waktu pencelupan.

Rasio campuran antara  $ZnCl_2$  dan  $NH_4Cl$  harus disesuaikan dengan tepat. Dalam mengendalikan komposisi *fluxing* dilakukan dengan memperhatikan nilai perbandingan antara konsentrasi *amonium chloride* ( $NH_4Cl$ ) terhadap *zinc chloride* ( $ZnCl_2$ ) yang dikenal sebagai *Ammonium Chloride Number* (ACN). Persamaan matematis ACN dapat ditulis sebagai berikut :

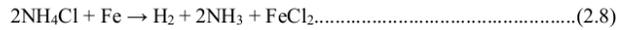
$$\text{Ammonium Chloride Number (ACN)} = \frac{\text{weight \% of ammonium chloride}}{\text{weight \% of zinc chloride}}$$

Komposisi *fluxing* sangat berpengaruh terhadap kualitas lapisan galvanis yang dihasilkan. Rasio komposisi yang tidak tepat dapat menghasilkan kualitas lapisan yang kurang optimal sehingga akan menurunkan ketahanan baja terhadap korosi. Jika kandungan  $ZnCl_2$  terlalu tinggi, maka akan memperlambat proses pengeringan setelah *fluxing*, yang dapat memicu letupan pada permukaan seng cair saat material dicelup, sehingga berpotensi menimbulkan bahaya. Sebaliknya, kadar  $ZnCl_2$  yang terlalu rendah dapat menyebabkan oksidasi pada permukaan material selama tahap pengeringan, yang mengakibatkan penurunan efisiensi *fluxing* dan peningkatan jumlah *dross* selama pencelupan. Sementara itu, kadar  $NH_4Cl$  yang berlebihan akan menimbulkan asap tebal saat proses pencelupan berlangsung, sedangkan kadar  $NH_4Cl$  yang terlalu rendah dapat mengakibatkan terbentuknya *black Spot* pada permukaan material setelah proses galvanisasi selesai [3]. Jika konsentrasi  $NH_4Cl$  dalam *flux* lebih rendah, ini juga akan mengurangi ketebalan lapisan galvanis. Kondisi ini sangat cocok untuk industri lembaran baja galvanis. Selama proses *fluxing* terdapat reaksi kimia yang terjadi yaitu sebagai berikut [10].

1. Reaksi *flux* dengan oksida besi



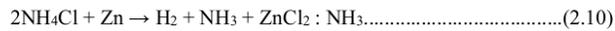
2. Reaksi *flux* dengan baja (*base metal*)



3. Reaksi *flux* dengan *top flux* ZnO (*skimming*)



4. Reaksi *flux* dengan *zinc*



Reaksi (2.7), (2.8), (2.9), dan (2.10) yang menghasilkan amonia dan hidrogen tidak menimbulkan pelepasan gas berbahaya, karena *molten zinc* dan  $\text{ZnCl}_2$  bereaksi dengan sangat cepat untuk menghambat pelepasan amonia dan hidrogen ke lingkungan. Reaksi (2.7) dan (2.8), yang melibatkan reaksi antara *flux* dan oksida, dapat mengakibatkan larutan di dalam bak berubah warna menjadi jingga kecokelatan. Perubahan warna ini terjadi akibat pembentukan  $\text{FeCl}_2$  selama proses *fluxing* berlangsung berulang kali. Seiring dengan meningkatnya konsentrasi  $\text{FeCl}_2$ , senyawa ini cenderung menempel pada permukaan baja (logam dasar) dan terbawa saat perendaman ke dalam *zinc* cair. Kemudian,  $\text{FeCl}_2$  akan bereaksi membentuk *dross* melalui reaksi berikut [10].



### 2.4.3 <sup>3</sup> *Drying*

Proses *drying* merupakan tahapan pengeringan dan pemanasan awal dengan menggunakan gas panas bersuhu sekitar 150°C. Tujuan dari proses

ini adalah untuk menghilangkan sisa cairan yang mungkin masih menempel di permukaan spesimen, sehingga dapat mencegah terjadinya ledakan uap saat proses galvanisasi berlangsung.

#### **2.4.4 Tahap Pencelupan (*Galvanizing*)**

Setelah spesimen melalui tahap persiapan (*pre-treatment*) dan dipastikan tidak ada kotoran atau kontaminan, spesimen akan masuk ke tahap pencelupan (*galvanizing*). Pada tahap ini, baja dicelupkan ke dalam seng cair dengan kemurnian minimal 98,5%. Proses ini menghasilkan seng pada permukaan baja, yang dimulai dengan lapisan paduan dan berakhir dengan lapisan luar yang sepenuhnya terdiri dari unsur seng [2]. Sebelum spesimen yang telah dilapisi seng (Zn) ditarik keluar dari bak galvanis, dilakukan proses penggetaran secara manual terlebih dahulu. Tujuannya adalah untuk memastikan agar kotoran atau sisa-sisa zat tidak menempel dan terbawa ke permukaan lapisan. Setelah proses penggetaran selesai, spesimen kemudian diangkat dari bak dengan kecepatan penarikan yang terkontrol. Hal ini bertujuan untuk memastikan terbentuknya lapisan seng murni yang membeku secara merata di permukaan benda kerja [7]. Kondisi permukaan baja, waktu pencelupan, dan temperatur pencelupan sangat mempengaruhi ketebalan lapisan galvanis. Seng cair yang digunakan dalam bak galvanisasi pada temperatur tertentu dapat memicu perubahan komposisi pada logam dasar. Saat temperatur larutan meningkat, viskositasnya menurun, yang membuat ion logam menuju katoda menjadi lebih cepat. Selain itu, peningkatan temperatur juga mendorong kenaikan

reaktivitas larutan, yang pada akhirnya dapat mempengaruhi ketebalan lapisan yang terbentuk pada permukaan logam. Untuk memperoleh ketebalan lapisan sesuai dengan standar yang berlaku, dibutuhkan temperatur pencelupan yang tepat [11]. Rata-rata ketebalan minimum lapisan berdasarkan kategori material sesuai standar ASTM A123 dapat dilihat pada Tabel 2.4

**Tabel 2.4** Grade Ketebalan Lapisan Berdasarkan Kategori Material Sesuai

Standar ASTM A123 [12]

Material category	All Specimens Tested				
	Steel Thickness Range (mm)				
	<1.6	1.6 - 3.2	3.2 - 4.8	4.8 - 6.4	≥ 6.4
Structural Shapes and Plate	45	65	75	85	100
Strip and Bar	45	65	75	85	100
Pipe and Tubing	45	45	75	75	75
Wire	35	50	60	65	80

#### 2.4.5 Quenching

Setelah tahap pencelupan dilakukan, baja galvanis kemudian dilakukan proses *quenching*. Proses *quenching* bertujuan untuk mencegah terbentuknya *white rust* (karat putih). Pendinginan dilakukan dengan mencelupkan spesimen ke dalam larutan *sodium dichromat* ( $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) hingga temperatur material mencapai temperatur kamar [2]. Seluruh permukaan logam harus terendam dalam larutan dan didiamkan

beberapa saat untuk memastikan proses berlangsung optimal. Selain berfungsi sebagai media pendingin, larutan *sodium dichromat* juga bertindak sebagai agen pasivasi, membentuk lapisan kromatik sangat tipis (sekitar 0,1–0,6  $\mu\text{m}$ ) pada permukaan baja galvanis. Lapisan ini berfungsi sebagai pelindung awal dari oksidasi, yang terutama terjadi karena embun, air hujan, atau uap asam seperti HCl. Oleh karena itu, proses *quenching* ini juga dikenal sebagai *chromating*. Untuk memastikan efektivitas proses pasivasi, <sup>24</sup> ada tiga faktor penting yang harus diperhatikan yaitu sebagai berikut [13].

1. Konsentrasi *natrium dichromat* yang ideal adalah 0,12% hingga 0,15% dengan kadar kromium 0,04% hingga 0,06%. Kadar yang terlalu tinggi dapat merusak warna pelapis dan kadar yang terlalu rendah menurunkan efek pasivasi.
2. Harga pH larutan harus tetap sedikit asam, sekitar 5 hingga 6,6, dan dapat dikurangi dengan asam sulfat jika diperlukan.
3. Kadar ion klorida ( $\text{Cl}^-$ ) yang terbawa dari proses sebelumnya seperti fluxing harus dijaga di bawah 0,5% atau 5 gram/liter untuk menghindari penurunan efektivitas pasivasi.

#### **2.4.6 Finishing**

Tahap akhir dari proses *hot dip galvanizing* adalah tahap *finishing*, berupa *drying* dan *grinding*. Proses *grinding* dilakukan dengan tujuan untuk menghaluskan bagian-bagian permukaan yang runcing akibat sisa tetesan

cairan seng yang mengering sebelum hendak menetes dengan menggunakan gerinda, sehingga permukaan akhir menjadi lebih rata [7].

## 2.5 <sup>32</sup> Polarisasi Potensiodinamik

Polarisasi potensiodinamik merupakan metode elektrokimia yang digunakan untuk menganalisis perilaku korosi logam dengan melihat hubungan antara potensial dan arus yang dihasilkan dari reaksi anodik dan katodik. Korosi pada logam terjadi ketika arus anodik dan katodik saling seimbang, meskipun <sup>12</sup> tidak ada arus eksternal yang diberikan. Hal ini disebabkan oleh adanya perbedaan potensial antara logam dengan larutan elektrolit di sekitarnya. Untuk melakukan pengukuran ini, digunakan alat bernama potensiostat dengan sistem tiga elektroda: elektroda kerja berupa baja karbon, elektroda referensi jenis kalomel (SCE), dan elektroda bantu dari platina. Hasil pengukuran akan ditampilkan dalam bentuk kurva polarisasi yang menunjukkan hubungan antara arus ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) dan potensial (mV). Dari kurva tersebut, dapat ditentukan <sup>12</sup> laju korosi dan arus korosi ( $I_{\text{corr}}$ ) melalui pendekatan matematis yaitu sebagai berikut [14].

$$I_{\text{corr}} = \frac{\beta_a \beta_c}{2.303 (\beta_a + \beta_c)} \times \frac{1}{R_p} \dots \dots \dots (2.12)$$

$$V_{\text{corr}} = 3,275 \times 10^{-3} \times \frac{A_e}{\rho} I_{\text{corr}} \dots \dots \dots (2.13)$$

### <sup>19</sup> Keterangan :

$I_{\text{corr}}$  = Rapat arus korosi ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )

$B_a$  = Slop Tafel anodik

$B_c$  = Slop Tafel katodik

$R_p$  = Hambatan polarisasi

$V_{corr}$  = Laju korosi Faraday

$A_e$  = Masa ekuivalen logam (g/mol.ekivalen)

$P$  = Masa jenis logam (g/cm<sup>3</sup>)

Untuk mengukur laju korosi lebih lanjut, digunakan metode Tafel, yang sangat berguna baik dalam kondisi tanpa maupun dengan penambahan inhibitor korosi. Dalam metode ini, tiga parameter utama dianalisis: arus korosi ( $I_{corr}$ ), potensial korosi ( $E_{corr}$ ), serta kemiringan Tafel anodik ( $\beta_a$ ) dan katodik ( $\beta_c$ ). Berdasarkan data ini, dapat dihitung nilai hambatan polarisasi ( $R_p$ ) dan laju korosi ( $V_{corr}$ ) menggunakan hukum Stern-Geary. Nilai  $R_p$  berfungsi sebagai indikator tingkat korosif suatu sistem: semakin kecil nilai  $R_p$ , maka sistem tersebut semakin korosif. Sementara itu,  $\beta_a$  dan  $\beta_c$  menggambarkan kecenderungan logam dalam bereaksi sebagai anoda atau katoda.

Secara prinsip, polarisasi Tafel terjadi karena adanya interaksi antara larutan uji dan permukaan elektroda. Interaksi ini menimbulkan polarisasi logam dan menghasilkan arus tertentu. Dari hasil ekstrapolasi kurva, dapat diketahui apakah reaksi dominan bersifat anodik (oksidasi pada logam, ditandai pergeseran potensial ke arah negatif) atau katodik (reduksi ion  $H^+$ , dengan pergeseran potensial ke arah positif). Dengan demikian, metode ini tidak hanya menunjukkan laju korosi, tetapi juga memberikan gambaran mekanisme reaksi elektrokimia yang terjadi pada permukaan logam saat terpapar lingkungan korosif.

## 2.6 Metalografi

Metalografi merupakan ilmu yang mempelajari karakteristik mikrostruktur dan makrostruktur logam, paduan logam, dan bahan lainnya, serta hubungannya dengan sifat-sifat material. Dalam istilah lain, metalografi dapat dianggap sebagai proses untuk mengukur kualitas dan kuantitas suatu material berdasarkan informasi yang diperoleh dari pengamatan material tersebut. <sup>23</sup> Dalam ilmu metalurgi, pemahaman terhadap struktur mikro memiliki peran yang sangat penting, karena struktur mikro memiliki pengaruh signifikan terhadap sifat fisik dan mekanik logam. Berbagai <sup>48</sup> logam memiliki sifat yang berbeda-beda tergantung pada struktur mikro yang dimilikinya. <sup>15</sup> Struktur mikro yang memiliki ukuran kecil akan meningkatkan kekerasan logam, sementara struktur mikro yang lebih besar akan membuat logam menjadi lebih lentur atau memiliki kekerasan yang lebih rendah. Pembentukan struktur mikro dipengaruhi oleh komposisi kimia <sup>27</sup> logam atau paduan logam tersebut, serta proses yang telah dialaminya [15]

Untuk mengamati struktur mikro yang terbentuk pada logam, penggunaan mikroskop optik biasanya menjadi metode yang umum digunakan. <sup>23</sup> Sebelum benda uji diamati menggunakan mikroskop optik, benda uji tersebut harus melewati tahapan preparasi. Tahapan ini bertujuan untuk memastikan bahwa <sup>11</sup> benda uji dapat terlihat dengan jelas ketika diamati, karena hasil gambar pada metalografi sangatlah penting. Semakin baik preparasi benda uji, semakin jelas pula gambaran struktur yang dapat diperoleh. Tahapan preparasi sampel yaitu sebagai berikut [16].

a. <sup>13</sup> *Cutting* (Pemotongan)

Pemilihan sampel yang tepat dari objek uji mikroskopik sangat penting dan didasarkan pada tujuan pengamatan. Bahan komersial umumnya tidak homogen,

sehingga satu sampel dari volume besar tidak bisa dianggap representatif. Pengambilan sampel harus direncanakan agar mencerminkan kondisi rata-rata atau kondisi area kritis, sambil mempertimbangkan kemudahan pemotongan. Sampel biasanya diambil dari area yang akan diamati secara mikrostruktur dan makrostruktur. Misalnya, saat mengamati mikrostruktur material yang gagal, sampel diambil dekat area kegagalan untuk dibandingkan dengan sampel dari area lain. Penting juga mencegah deformasi dan panas berlebih dalam proses pemotongan dengan pendinginan yang memadai. Terdapat beberapa metode pemotongan sampel berdasarkan media pemotong yang digunakan, antara lain meliputi pemotongan dengan patahan, pemotongan dengan gunting atau gergaji, pemotongan dengan abrasi, pemotongan dengan gergaji kawat, dan pemotongan dengan EDM (*Electrical Discharge Machining*). Berdasarkan tingkat deformasi yang dihasilkan, teknik pemotongan terbagi menjadi dua yaitu teknik pemotongan dengan deformasi besar dengan menggunakan gerinda, dan teknik pemotongan dengan deformasi kecil dengan menggunakan *low speed diamond saw* [16].

b. *Mounting*

Spesimen yang kecil atau memiliki bentuk tidak beraturan akan menimbulkan kesulitan dalam penanganannya, terutama saat melakukan pengamplasan dan pemolesan akhir. Contohnya adalah spesimen berupa kawat, lembaran logam tipis, atau potongan yang tipis. Untuk mempermudah penanganan, spesimen-spesimen tersebut perlu ditempatkan pada media *mounting*. Secara umum, syarat-syarat yang harus dimiliki bahan *mounting* yaitu bersifat inert, sifat eksotermis rendah, viskositas rendah, penyusutan linier rendah, sifat adhesi baik,

memiliki kekerasan yang sama dengan sampel, flowabilitas baik, dapat menembus pori, celah dan bentuk ketidakrataan yang terdapat pada sampel. Media mounting harus sesuai dengan jenis material dan reagen etsa yang akan digunakan. Biasanya, media *mounting* menggunakan bahan plastik sintetik seperti resin yang dicampur dengan hardener atau bakelit. Resin cetak lebih mudah digunakan tanpa perlu aplikasi panas dan tekanan, namun memiliki kelemahan dalam sifat mekanisnya untuk material keras. Metode *mounting* terbaik adalah menggunakan resin termosetting dengan bahan bakelit yang tersedia dalam bentuk bubuk dengan beragam warna [16].

### <sup>13</sup> c. *Grinding* (Pengamplasan)

Sampel yang baru dipotong atau yang telah terkikis biasanya memiliki permukaan yang kasar. Untuk memudahkan pengamatan struktur, permukaan yang kasar ini perlu diratakan. Proses penghalusan <sup>36</sup> dilakukan dengan menggunakan kertas amplas silikon karbida (SiC) dengan berbagai tingkat kekasaran yang dinyatakan dalam ukuran mesh, seperti 220#, 330#, <sup>6</sup>500#, 600#, 800#, dan 1000#. Pemilihan ukuran mesh pertama tergantung pada tingkat kekasaran permukaan dan kedalaman kerusakan yang dihasilkan oleh pemotongan. Hal ini termasuk perubahan struktur yang mungkin terjadi akibat panas saat pemotongan dan perubahan bentuk sampel karena beban dari alat pemotong. Pada saat melakukan pengamplasan, perlu diperhatikan penggunaan air. Air digunakan sebagai pemindah panas untuk mengurangi kerusakan pada struktur mikro sampel yang dapat terjadi akibat panas. Selain itu, penggunaan air juga dapat memperpanjang masa pemakaian kertas amplas. Selain itu, penting juga untuk memperhatikan

perubahan arah pengamplasan. Ketika mengubah arah, disarankan untuk mengarahkan pengamplasan baru dengan sudut  $45^\circ$  atau  $90^\circ$  terhadap arah sebelumnya [16].

d. *Polishing* (Pemolesan)

Setelah proses pengamplasan sampai mencapai kehalusan, langkah selanjutnya adalah melakukan pemolesan. Pemolesan bertujuan untuk mendapatkan permukaan sampel yang halus, bebas dari goresan, dan memiliki kilau seperti cermin, serta menghilangkan ketidakteraturan sampel hingga tingkat 0,001 mm. Permukaan sampel yang akan diamati di bawah mikroskop harus benar-benar rata. Jika permukaan sampel kasar atau bergelombang, pengamatan struktur mikro akan sulit dilakukan karena cahaya dari mikroskop akan dipantulkan secara acak oleh permukaan sampel. Tahap pemolesan dimulai dengan pemolesan kasar terlebih dahulu, diikuti oleh pemolesan halus [16].

e. *Etching* (Etsa)

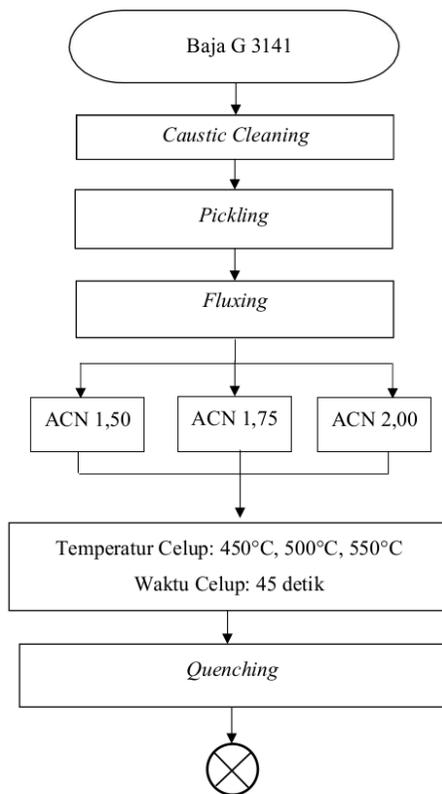
Etsa adalah proses yang digunakan untuk mengikis batas butir secara selektif dan terkendali dengan mencelupkan sampel ke dalam larutan pengetsas, baik dengan atau tanpa menggunakan arus listrik, sehingga struktur detail yang akan diamati menjadi jelas dan tajam. Pada beberapa material, mikrostruktur baru akan muncul setelah proses etsa dilakukan. Oleh karena itu, penting untuk memiliki pengetahuan yang tepat dalam memilih zat pengetsas yang sesuai. Metode etsa dibagi menjadi dua yaitu etsa kimia dan etsa elektrolitik. Etsa kimia adalah metode pengetsasan yang menggunakan larutan kimia. Zat-zat pengetsas yang digunakan memiliki karakteristik khusus, sehingga pemilihan zat pengetsas disesuaikan dengan

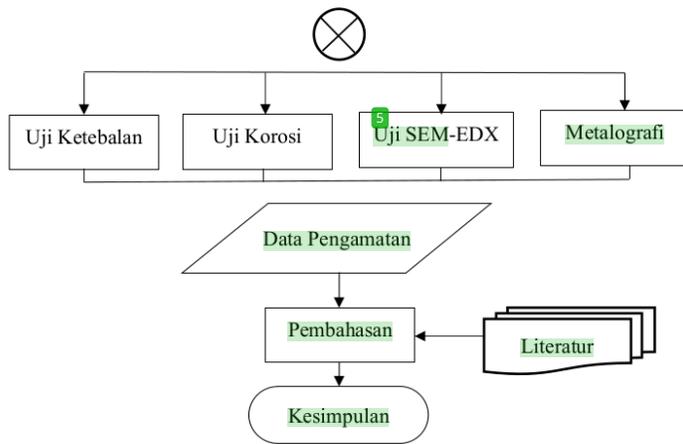
jenis sampel yang akan diamati. Contoh zat pengetsa yang umum digunakan antara lain adalah *nitrit acid* atau nital<sup>13</sup> (asam nitrit + alkohol 5%), picral (asam *picric* + alkohol), *ferric chlorode*, *hydroflouric acid*, dan lain-lain. Sedangkan etsa elektrolitik. Etsa elektrolitik adalah metode etsa yang menggunakan reaksi elektrokimia. Proses ini melibatkan pengaturan<sup>20</sup> tegangan arus, kuat listrik, dan waktu pengetsaan. Etsa elektrolitik umumnya digunakan khusus untuk stainless steel, karena sulit mendapatkan detail struktur dengan metode etsa kimia [16].

## BAB III METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1 Diagram Alir

Berikut ini merupakan diagram alir proses *hot dip galvanizing* menggunakan baja G 3141





**Gambar 3.1** Diagram Alir Penelitian

### 3.2 Alat dan Bahan

#### 3.2.1 Alat yang Digunakan

Alat-alat yang digunakan selama proses *hot dip galvanizing* menggunakan baja G 3141 yaitu sebagai berikut:

- a. Alat Pelindung Diri (APD)
- b. Bak *pretreatment*
- c. *Burner*
- d. *Dryer*
- e. *Elcometer*
- f. Gelas beker
- g. Kawat pengait
- h. Labu ukur

- i. Masker
- j. Mesin *cutting*
- k. Mesin *grinding*
- l. Mesin *polishing*
- m. Mesin *press mounting*
- n. Mesin uji SEM-EDX
- o. Mikroskop optik
- p. Neraca digital
- q. Penggaris
- r. Sarung Tangan
- s. *Skimmer*
- t. Spidol
- u. Stopwatch
- v. Tabung Gas
- w. *Thermogun*
- x. Tungku *hot dip galvanizing*

### 3.2.1 Bahan-bahan yang Digunakan

Adapun bahan-bahan yang digunakan selama proses *hot dip galvanizing* menggunakan baja G 3141 yaitu sebagai berikut:

- a. Akuades
- b. Baja G 3141
- c. Etanol
- d. Ingot *zinc* murni

- e. Kertas ampelas
- f. Larutan etsa (*amyl alcohol*)
- g. Larutan *fluxing* ( $\text{ZnCl}_2$  :  $\text{NH}_4\text{Cl}$ ) dengan komposisi ACN 1,5; 1,75; 2,00;
- h. Larutan HCl
- i. Larutan *quenching* (*sodium dichromat*)
- j. Pasta alumina
- k. Resin mounting
- l. Sabun cuci

### **3.3** **Prosedur Penelitian**

#### **3.3.1** *Pre-treatment*

**Spesimen** uji yang digunakan berupa baja G 3141 dengan dimensi 5 cm × 5 cm dan ketebalan 0,5 mm sebanyak sembilan buah. Spesimen dikaitkan menggunakan kawat pengait untuk memudahkan proses perlakuan. Tahap awal pre-treatment dilakukan melalui proses *caustic cleaning* menggunakan NaOH 10% untuk menghilangkan kotoran dan lemak pada permukaan spesimen. Selanjutnya dilakukan proses pickling dengan merendam spesimen ke dalam larutan  $\text{H}_2\text{SO}_4$  10% selama 15 menit untuk menghilangkan oksida, kemudian dibilas menggunakan air bersih. Setelah itu, spesimen melalui proses *fluxing* menggunakan larutan campuran  $\text{ZnCl}_2$  dan  $\text{NH}_4\text{Cl}$  selama 5 menit pada temperatur 60 °C.

Spesimen kemudian dikeringkan menggunakan dryer. Seluruh tahapan tersebut diulang dengan variasi komposisi ACN sebesar 1,5; 1,75; dan 2,00.

### 3.3.2 <sup>21</sup> Proses Hot Dip Galvanizing

Peralatan yang digunakan <sup>21</sup> pada proses hot-dip galvanizing meliputi tungku galvanisasi dan burner. Sebelum pencelupan, dilakukan proses skimming dengan menyapu lapisan top flux berbentuk gel pada permukaan seng cair untuk membersihkan kotoran dan *dross*. Spesimen yang telah dikaitkan kemudian dicelupkan ke dalam seng cair <sup>1</sup> dengan variasi temperatur pencelupan sebesar 450 °C, 500 °C, dan 550 °C selama 45 detik. Setelah pencelupan, spesimen diangkat secara perlahan agar sisa seng cair dapat mengalir kembali ke dalam ketel. Tahap akhir dilakukan proses quenching dengan merendam spesimen ke dalam larutan *sodium dichromate* 0,15% selama 1 menit.

### 3.3.3 Pengujian Ketebalan

Spesimen yang telah melalui proses hot-dip galvanizing selanjutnya dilakukan <sup>47</sup> pengujian ketebalan lapisan menggunakan alat elcometer. Pengukuran dilakukan pada tiga titik berbeda di permukaan masing-masing spesimen untuk memperoleh nilai ketebalan yang representatif. Prosedur pengukuran yang sama diterapkan pada seluruh spesimen uji.

### 3.3.4 Pengujian Metalografi

Spesimen hasil proses hot-dip galvanizing dipotong untuk dijadikan sampel pengujian metalografi. Sampel kemudian dilakukan proses mounting untuk memudahkan tahapan grinding dan polishing. Proses

grinding dilakukan secara bertahap menggunakan amplas dengan ukuran 100#, 220#, 320#, 500#, 800#, dan 1000#. Selanjutnya dilakukan polishing menggunakan pasta alumina hingga permukaan sampel mengkilap. Sampel kemudian direndam dalam larutan etsa berupa 3% HNO<sub>3</sub> dalam etanol selama 5–15 detik untuk menampakkan batas butir pada lapisan galvanis. Setelah itu, sampel dicuci menggunakan etanol dan dikeringkan, kemudian diamati menggunakan mikroskop optik untuk melihat struktur mikro lapisan galvanis.

### **3.3.5 Pengujian Korosi**

Spesimen uji untuk pengujian korosi dipotong dengan ukuran 10 mm × 10 mm. Pengujian dilakukan menggunakan metode polarisasi, di mana elektroda kerja dan elektroda referensi ditempatkan dalam satu tabung reaksi besar. Lembaran karbon digunakan sebagai elektroda kerja, sedangkan Saturated Calomel Electrode (SCE) digunakan sebagai elektroda referensi. Kedua elektroda dihubungkan menggunakan jembatan garam dengan hambatan rendah. Tabung polarisasi diisi dengan larutan NaCl 3,5%, kemudian elektroda kerja distabilkan dengan mencelupkannya bersama elektroda referensi selama 30 menit. Proses polarisasi dilakukan dengan kecepatan pemindaian potensial sebesar 0,16 mV/s, dimulai dari tegangan –300 mV hingga 150 mV.

### **3.3.6 Pengujian SEM-EDX**

Spesimen hasil proses hot-dip galvanizing dipotong dengan ukuran 20 mm × 20 mm untuk pengujian SEM–EDX. Sampel dilakukan proses

mounting apabila diperlukan guna memudahkan penanganan dan menjaga kestabilan posisi selama pengujian. Permukaan sampel dipersiapkan melalui proses grinding dan polishing hingga diperoleh permukaan yang rata dan halus. <sup>3</sup> Sampel kemudian diletakkan pada sample holder dan dimasukkan ke dalam ruang vakum <sup>12</sup> Scanning Electron Microscope (SEM). Pengamatan SEM dilakukan untuk memperoleh morfologi permukaan dan penampang lintang lapisan galvanis pada berbagai perbesaran. Selanjutnya dilakukan analisis Energy Dispersive X-Ray (EDX) pada beberapa titik dan area tertentu untuk mengetahui komposisi serta distribusi unsur penyusun lapisan. Data yang diperoleh berupa citra mikrostruktur dari SEM dan spektrum unsur dari EDX yang kemudian dianalisis dan dikaitkan dengan parameter proses.

## 15 BAB IV

### HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 4.1 Pengujian Ketebalan Lapisan

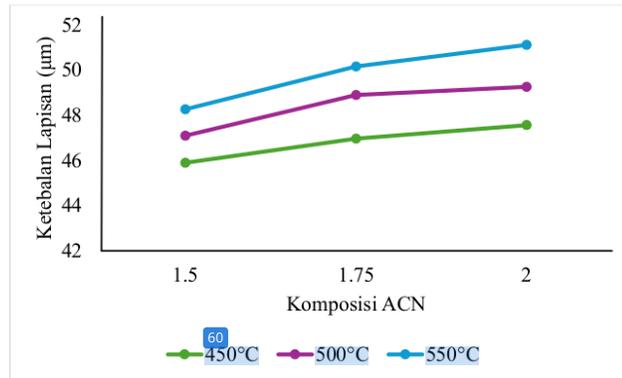
Berikut ini merupakan hasil data yang diperoleh pada pengujian ketebalan lapisan yang dapat dilihat pada tabel dibawah ini

**Tabel 4.1** Data Hasil Pengujian Ketebalan

No.	Komposisi ACN	Temperatur	Ketebalan Lapisan ( $\mu\text{m}$ )
1.	1,5	450°C	45.9
		500°C	47.1
		550°C	48.27
2.	1,75	450°C	46.97
		500°C	48.9
		550°C	50.17
3.	2	450°C	450°C
		500°C	49.27
		550°C	51.13

Spesimen baja yang telah melalui proses pelapisan menggunakan metode hot dip galvanizing dilakukan pengujian ketebalan lapisan. Pengujian ini dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui nilai ketebalan lapisan yang dihasilkan dari proses *hot dip galvanizing* serta untuk memastikan apakah nilai ketebalan lapisan tersebut sesuai dengan standar yang berlaku yaitu ASTM A123. Pengukuran ketebalan

lapisan dilakukan menggunakan alat *microthickness test.*, yang berkerja berdasarkan prinsip gaya magnet pada material baja. Ketebalan lapisan diuji sebanyak tiga kali pada titik yang berbeda di permukaan baja yang telah dilapisi, kemudian diambil nilai rata-ratanya.



**Gambar 4.1** Grafik Pengaruh Komposisi ACN dan Temperatur Pencelupan

Terhadap Ketebalan Lapisan Pada Proses *Hot Dip Galvanizing*

Berdasarkan data hasil pengujian ketebalan yang dapat dilihat pada Tabel 4.1 dan Gambar 4.1, dapat diketahui bahwa pengaruh komposisi *Ammonium Chloride Number* (ACN) dan temperatur pencelupan sangat berpengaruh terhadap ketebalan lapisan. Sampel dengan komposisi ACN 1,5 dengan temperatur pencelupan 450°C memiliki ketebalan lapisan 45,90 µm, dan ketebalan lapisan meningkat 1,2 µm temperatur pencelupan 500°C menjadi sebesar 47,10 µm. Pada temperatur 550°C terjadi peningkatan ketebalan lapisan 1.17 µm menjadi sebesar 48,27 µm. Sampel dengan komposisi ACN 1,75 dengan temperatur pencelupan

450°C memiliki ketebalan lapisan 46,97  $\mu\text{m}$ , dan ketebalan lapisan meningkat 1,93  $\mu\text{m}$  temperatur pencelupan 500°C menjadi sebesar 48,90  $\mu\text{m}$ . Pada temperatur 550°C terjadi peningkatan ketebalan lapisan 1,27  $\mu\text{m}$  menjadi sebesar 50,17  $\mu\text{m}$ . Sampel dengan komposisi ACN 2,0 dengan temperatur pencelupan 450°C memiliki ketebalan lapisan 47,57  $\mu\text{m}$ , dan ketebalan lapisan meningkat 1,7  $\mu\text{m}$  temperatur pencelupan 500°C menjadi sebesar 49,27  $\mu\text{m}$ . Pada temperatur 550°C terjadi peningkatan ketebalan lapisan 1,86  $\mu\text{m}$  menjadi sebesar 51,13  $\mu\text{m}$ . Pada hasil data tersebut terlihat semakin meningkat temperatur pencelupan, semakin meningkat juga tebal lapisan. Hal ini dikarenakan turunnya viskositas larutan akibat naiknya temperatur sehingga membuat pergerakan dan pengendapan ion logam menuju permukaan katoda menjadi lebih cepat. Selain itu, peningkatan temperatur juga meningkatkan reaktivitas larutan dan mempercepat perpindahan ion logam menuju permukaan baja, yang mendorong laju difusi Fe-Zn. Kondisi ini menyebabkan pertumbuhan lapisan galvanis berlangsung lebih cepat dan menghasilkan lapisan dengan ketebalan yang lebih besar [11].

Selain temperatur pencelupan, variasi nilai *Ammonium Chloride Number* (ACN) juga menunjukkan pengaruh yang signifikan terhadap ketebalan lapisan galvanis yang terbentuk. Pada temperatur pencelupan 450 °C, spesimen dengan nilai ACN 1,5 menghasilkan ketebalan lapisan sebesar 45,90  $\mu\text{m}$ . Pada temperatur yang sama, peningkatan nilai ACN menjadi 1,75 menyebabkan ketebalan lapisan meningkat sebesar 1,07  $\mu\text{m}$  menjadi 46,97  $\mu\text{m}$ , sedangkan pada ACN 2,00 ketebalan lapisan kembali meningkat sebesar 0,60  $\mu\text{m}$  menjadi 47,57  $\mu\text{m}$ . Pada temperatur pencelupan 500 °C, spesimen dengan ACN 1,5 menghasilkan ketebalan

lapisan sebesar 47,80  $\mu\text{m}$ . Peningkatan nilai ACN menjadi 1,75 menyebabkan ketebalan lapisan bertambah sebesar 1,10  $\mu\text{m}$  menjadi 48,90  $\mu\text{m}$ , dan pada ACN 2,00 ketebalan lapisan kembali meningkat sebesar 0,37  $\mu\text{m}$  menjadi 49,27  $\mu\text{m}$ . Sementara itu, pada temperatur pencelupan 550  $^{\circ}\text{C}$ , spesimen dengan ACN 1,5 memiliki ketebalan lapisan sebesar 48,27  $\mu\text{m}$ . Ketika nilai ACN ditingkatkan menjadi 1,75, ketebalan lapisan mengalami peningkatan yang cukup signifikan sebesar 1,90  $\mu\text{m}$  menjadi 50,17  $\mu\text{m}$ , dan pada ACN 2,00 ketebalan lapisan kembali meningkat sebesar 0,96  $\mu\text{m}$  hingga mencapai 51,13  $\mu\text{m}$ . Berdasarkan data tersebut dapat dilihat bahwa  $\text{NH}_4\text{Cl}$  dalam larutan *fluxing* berperan penting dalam meningkatkan ketebalan lapisan.

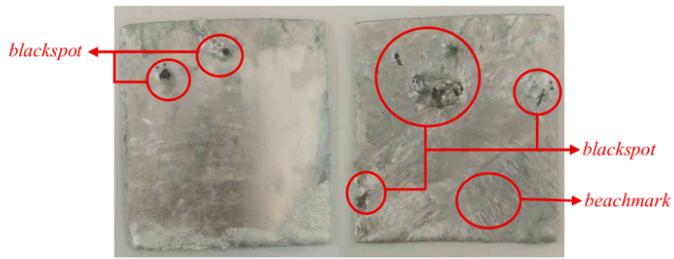
Peningkatan nilai ACN menyebabkan proses pembersihan oksida besi pada permukaan baja berlangsung lebih efektif serta menghambat terjadinya oksidasi ulang sebelum pencelupan ke dalam seng cair. Permukaan baja yang lebih bersih dan aktif memungkinkan terjadinya kontak yang lebih baik antara baja dan seng, sehingga pembentukan lapisan intermetalik Fe-Zn dapat berlangsung lebih optimal [3].

Kombinasi antara nilai ACN dan temperatur pencelupan menunjukkan efek sinergis terhadap ketebalan lapisan galvanis. Ketebalan lapisan tertinggi diperoleh pada kombinasi ACN 2,0 dan temperatur pencelupan 550  $^{\circ}\text{C}$  sebesar 51,13  $\mu\text{m}$ , sedangkan ketebalan terendah terjadi pada kombinasi ACN 1,5 dan temperatur 450  $^{\circ}\text{C}$  sebesar 45,90  $\mu\text{m}$ . Hasil ini menunjukkan bahwa kondisi *fluxing* yang optimal, didukung oleh temperatur pencelupan yang tinggi, mampu mempercepat reaksi difusi Fe-Zn dan meningkatkan pertumbuhan lapisan galvanis secara keseluruhan.

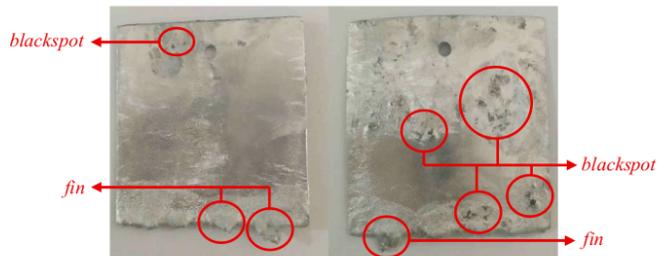
Berdasarkan standar yang berlaku, nilai ketebalan yang tertera pada standar ASTM A123 untuk material pelat dengan ketebalan 0,5 mm dibutuhkan ketebalan lapisan sebesar 45-65  $\mu\text{m}$  [12], sehingga sampel 1-9 memenuhi standar ketebalan lapisan. Dari semua sampel yang paling sesuai untuk diaplikasikan yaitu sampel 1 dengan nilai ACN 1,5 dengan temperatur pencelupan 450°C yang menghasilkan nilai ketebalan 45,90  $\mu\text{m}$ . Kondisi ini dipilih karena ketebalan lapisan yang dihasilkan telah memenuhi ketentuan standar yang berlaku, sekaligus tidak menghasilkan lapisan yang berlebihan dibandingkan dengan sampel lainnya. Ketebalan yang relatif optimum tersebut memungkinkan penggunaan seng yang lebih efisien, sehingga berpotensi menurunkan biaya produksi tanpa mengurangi kualitas perlindungan lapisan galvanis sesuai dengan standar yang ditetapkan.

#### **4.2 Hasil Visual Hot Dip Galvanizing**

Penampakan visual hasil pelapisan menggunakan metode hot dip galvanizing dengan variasi komposisi *Ammonium Chloride Number* (ACN) dan temperatur pencelupan menunjukkan perbedaan yang cukup signifikan. Perbedaan tersebut terlihat pada tingkat keseragaman permukaan, kekasaran lapisan, serta keberadaan cacat visual seperti bercak gelap dan penumpukan lapisan di bagian tepi spesimen. Variasi penampakan ini dipengaruhi oleh efektivitas proses *fluxing* dan kondisi temperatur pencelupan selama proses galvanisasi. Gambaran visual dari masing-masing spesimen hasil pengujian dapat dilihat pada gambar di bawah ini.



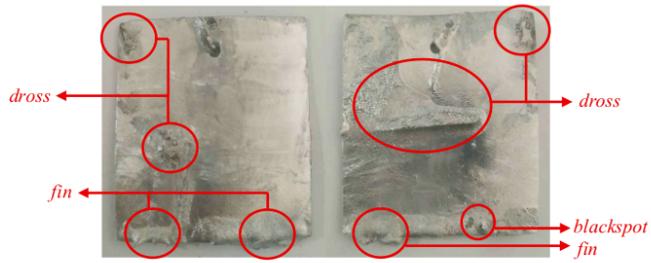
**Gambar 4.2** Visual Sampel 1 dengan Komposisi ACN 1,5 dan Temperatur  
Pencelupan 450°C



**Gambar 4.3** Visual Sampel 2 dengan Komposisi ACN 1,5 dan Temperatur  
Pencelupan 500°C

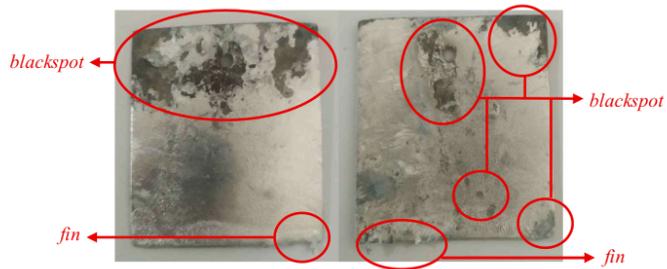


**Gambar 4.4** Visual Sampel 3 dengan Komposisi ACN 1,5 dan Temperatur  
Pencelupan 550°C



**Gambar 4.5** Visual Sampel 4 dengan Komposisi ACN 1,75 dan Temperatur

Pencelupan 450°C



**Gambar 4.6** Visual Sampel 5 dengan Komposisi ACN 1,75 dan Temperatur

Pencelupan 500°C

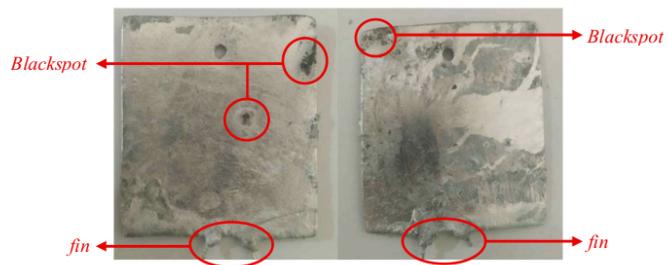


**Gambar 4.7** Visual Sampel 6 dengan Komposisi ACN 1,75 dan Temperatur

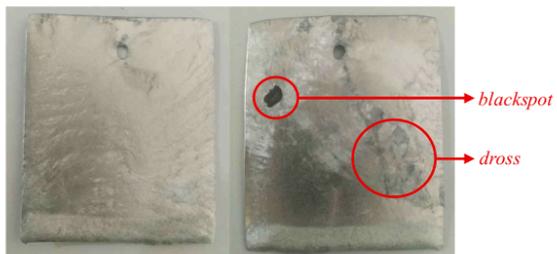
Pencelupan 550°C



**Gambar 4.8** Visual Sampel 7 dengan Komposisi ACN 2,00 dan Temperatur  
Pencelupan 450°C



**Gambar 4.9** Visual Sampel 8 dengan Komposisi ACN 2,00 dan Temperatur  
Pencelupan 500°C



**Gambar 4.10** Visual Sampel 9 dengan Komposisi ACN 2,00 dan Temperatur  
Pencelupan 550°C

Berdasarkan hasil pengamatan <sup>12</sup> visual terhadap seluruh spesimen hasil pelapisan menggunakan metode *hot dip galvanizing* dengan variasi nilai *Ammonium Chloride Number* (ACN) dan temperatur pencelupan, terlihat bahwa kualitas visual lapisan galvanis sangat dipengaruhi oleh keseimbangan komposisi flux serta kondisi suhu selama proses pencelupan. Pada Gambar 4.2 permukaan lapisan galvanis terlihat adanya *blackspot* dan *beachmark* dalam jumlah kecil. *Blackspot* ini disebabkan karena kadar  $\text{NH}_4\text{Cl}$  yang rendah, sehingga sebagian area permukaan baja masih tertutup oksida atau kontaminan dan menyebabkan area tersebut tidak bisa dilapisi oleh lapisan seng [3]. Cacat *beachmark* pada sampel 1 ini disebabkan oleh proses pengangkatan spesimen yang tidak konstan. Ketidakteraturan kecepatan pengangkatan tersebut menyebabkan terbentuknya pola garis pada permukaan lapisan galvanis, yang berdampak pada menurunnya kualitas tampilan visual lapisan. Oleh karena itu, keberadaan cacat *beachmark* perlu dihindari agar lapisan galvanis yang dihasilkan memiliki kualitas permukaan yang lebih baik.

Pada Gambar 4.3 permukaan galvanis terlihat seperti sampel satu yaitu adanya *blackspot* pada lapisan galvanis, perbedaannya terletak pada kemunculan cacat *fin* di bagian ujung bawah spesimen yang berbentuk menyerupai jarum. Cacat ini terjadi akibat kontak lapisan galvanis dengan udara sekitar saat proses pengangkatan, sehingga proses solidifikasi berlangsung dengan cepat. Kondisi tersebut menyebabkan seng cair tidak memiliki waktu yang cukup untuk seluruhnya mengalir kembali ke dalam ketel, sehingga terbentuk penumpukan lapisan pada bagian ujung spesimen.

Pada Gambar 4.4, permukaan lapisan galvanis menunjukkan adanya cacat berupa *dross* dan *fin*. Cacat berbentuk bintik-bintik menonjol pada permukaan lapisan terjadi akibat partikel *dross* yang ikut terbawa dan terperangkap di dalam lapisan seng selama proses pencelupan. *Dross* merupakan partikel intermetalik hasil reaksi antara besi dan seng (Fe-Zn) yang bersifat tidak homogen dan dapat menjadi titik awal terjadinya korosi pada lapisan galvanis. Keberadaan *dross* pada lapisan ini berpotensi menurunkan kualitas perlindungan dan dapat menyebabkan kegagalan fungsi lapisan galvanis [7].

Pada Gambar 4.5, permukaan lapisan galvanis menunjukkan adanya cacat berupa *dross*, disertai kemunculan *blackspot* dalam jumlah kecil serta *fins*. Pada sampel ini, penurunan kadar  $ZnCl_2$  dalam larutan *flux* menyebabkan permukaan material lebih rentan mengalami oksidasi selama tahap pengeringan setelah proses *fluxing*. Kondisi tersebut menurunkan efektivitas proses *fluxing*, sehingga selama pencelupan terjadi peningkatan pembentukan dan keterperangkapan *dross* pada lapisan galvanis [3].

Pada Gambar 4.6, permukaan lapisan galvanis menunjukkan cacat yang cukup dominan berupa *blackspot* dan *fin*. Tingginya jumlah *black spot* yang muncul pada sampel ini disebabkan oleh keberadaan *zinc ash* yang menempel pada permukaan lapisan. *Zinc ash* terbentuk dan mengapung di permukaan bak seng sebagai hasil oksidasi pada seng cair [17]. Proses pembersihan *zinc ash* (*skimming*) yang tidak dilakukan secara optimal selama proses *hot dip galvanizing* menyebabkan partikel *zinc ash* tersebut ikut terbawa dan melekat pada permukaan lapisan galvanis.

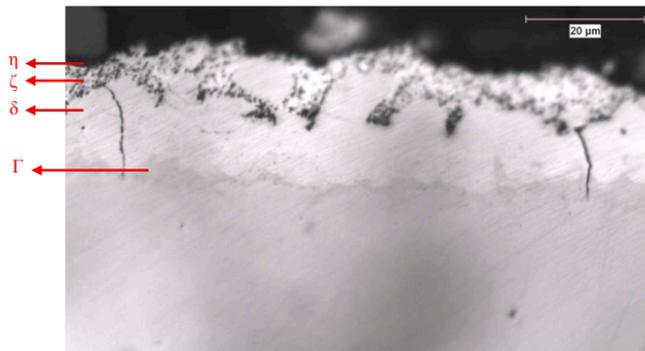
Pada Gambar 4.7 permukaan lapisan galvanis menunjukkan lapisan dengan kualitas tidak merata. Pada sampel 6 juga terlihat adanya sedikit *blackspot* yang disebabkan oleh *zinc ash* yang menempel pada permukaan sampel. Hal ini dikarenakan proses *skimming* yang kurang.

Pada Gambar 4.8 permukaan lapisan galvanis menunjukkan lapisan yang tebal dengan kualitas tidak merata. Pada sampel 7, *dross* terlihat cukup dominan meskipun suhu pencelupan relatif rendah. Hal ini menunjukkan bahwa rendahnya kandungan  $ZnCl_2$  pada nilai ACN 2,0 memiliki pengaruh terhadap pembentukan *dross*.

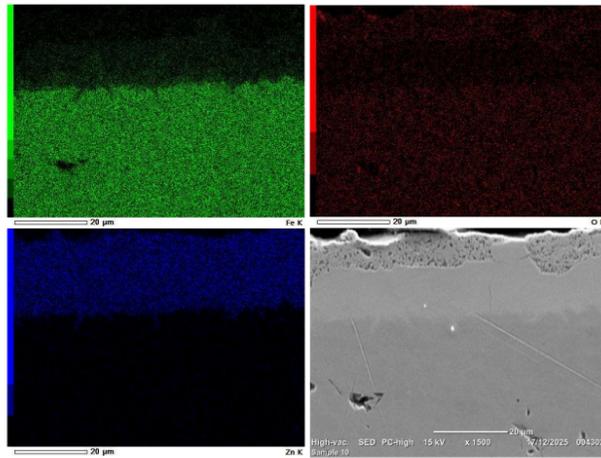
Pada Gambar 4.9 permukaan lapisan galvanis menunjukkan adanya *black spot* dan *fin*. Hal ini disebabkan oleh temperatur pencelupan yang terlalu tinggi sehingga meningkatnya oksidasi dan residu *zinc ash* selama proses *hot dip galvanizing*. Cacat *fin* juga .terjadi akibat kontak lapisan galvanis dengan udara sekitar saat proses pengangkatan, sehingga proses solidifikasi berlangsung dengan cepat.

Pada Gambar 4.10 permukaan lapisan galvanis menunjukkan adanya *blackspot* dan *dross*. Hal ini disebabkan oleh temperatur pencelupan yang terlalu tinggi sehingga meningkatnya oksidasi dan residu *zinc ash* selama proses *hot dip galvanizing* dan rendahnya kandungan  $ZnCl_2$  dalam larutan *flux* menyebabkan permukaan material lebih rentan mengalami oksidasi selama tahap pengeringan setelah proses *fluxing*.

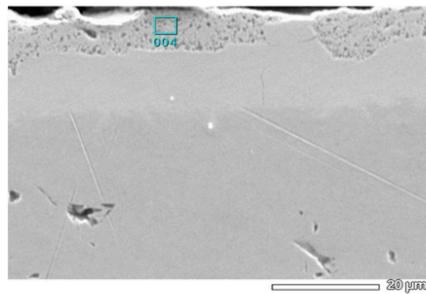
### 4.3 Pengamatan Struktur Mikro



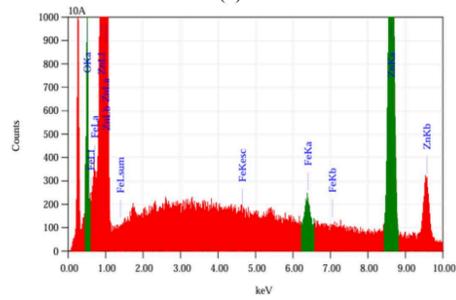
**Gambar 4.11** Struktur Mikro Hasil *Hot Dip Galvanizing* dengan Komposisi ACN 1,5 dan Temperatur Pencelupan 450°C Perbesaran 1000x



**Gambar 4.12** Pemetaan Unsur Fe, O dan Zn Sampel 1 dengan Komposisi ACN 1,5 dan Temperatur Pencelupan 450°C



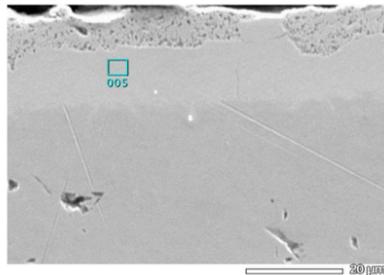
(a)



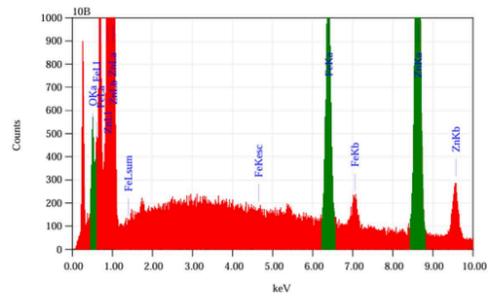
(b)

**Gambar 4.13** (a) Titik 004 Pengujian SEM EDX (b) Hasil SEM EDX Titik 004

Sampel 1 dengan Komposisi ACN 1,5 dan Temperatur Pencelupan 450°C

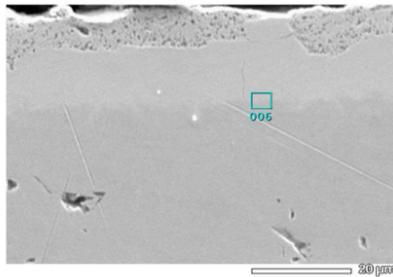


(a)

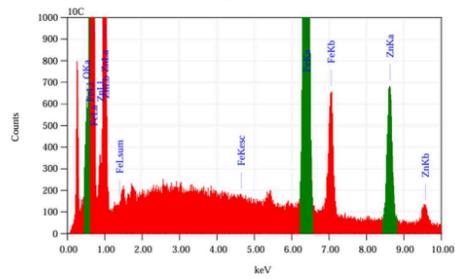


(b)

**Gambar 4.14** (a) Titik 005 Pengujian SEM EDX (b) Hasil EDX Titik 005  
Sampel 1 dengan Komposisi ACN 1,5 dan Temperatur Pencelupan 450°C



(a)



(b)

**Gambar 4.15** (a) Titik 006 Pengujian SEM EDX (b) Hasil EDX Titik 006

Sampel 1 dengan Komposisi ACN 1,5 dan Temperatur Pencelupan 450°C

**Tabel 4.2** Hasil SEM EDX Sampel 1 dengan Komposisi ACN 1,5 dan Temperatur Pencelupan 450°C

No.	Titik SEM EDX	Element	KeV	Mass(%)
1.	Titik 004	Zn K	8.630	94.72
		O K	0.525	3.75
		Fe K	6.398	1.53
		Total		100.00
2.	Titik 005	Zn K	8.630	83.66
		Fe K	6.398	14.71
		O K	0.525	1.62
		Total		100.00
3	Titik 006	Fe K	6.398	66.88
		Zn K	8.630	32.95
		O K	0.525	1.62
		Total		100.00

Berdasarkan hasil pengamatan struktur mikro pada Gambar 4.11, lapisan hasil *hot dip galvanizing* dengan komposisi ACN 1,5 dan temperatur pencelupan 450 °C menunjukkan terbentuknya lapisan berlapis yang tersusun dari beberapa fasa Fe–Zn. Secara morfologi, lapisan paling luar tampak tidak homogen dan

memiliki tekstur kasar, diikuti oleh lapisan yang lebih kompak dan halus menuju arah substrat baja. Kondisi ini menunjukkan bahwa lapisan Zn murni (fasa  $\eta$ ) yang biasanya berada di permukaan sangat tipis atau tidak kontinu, sehingga lapisan intermetalik di bawahnya, khususnya fasa  $\zeta$ , tampak dominan pada permukaan penampang. Di bawah zona tersebut terlihat lapisan intermetalik yang lebih padat yang diidentifikasi sebagai fasa  $\delta$ , sedangkan fasa  $\Gamma$  berada sangat tipis di dekat antarmuka baja dan sulit dibedakan secara visual.

Hasil pemetaan unsur menggunakan SEM-EDX menunjukkan bahwa unsur Zn terdistribusi secara dominan pada lapisan bagian atas dan ditandai dengan intensitas warna biru yang tinggi. Hal ini sesuai dengan literatur dimana lapisan terluar yaitu fasa  $\eta$  (eta) dengan kandungan Zn yang sangat tinggi yaitu 100% [18]. Adapun zona yang mengandung unsur O yang menunjukkan oksida pada lapisan dan ditandai dengan warna merah. Distribusi unsur Fe menunjukkan peningkatan intensitas secara bertahap ke arah substrat baja. Hal ini menunjukkan adanya mekanisme difusi Fe dari substrat baja menuju lapisan Zn selama proses galvanisasi. Pada zona lapisan atas yaitu fasa  $\eta$  (eta) dan  $\zeta$  (zeta) kandungan Fe relatif rendah, pada zona dekat substrat baja yaitu fasa  $\Gamma$  (gamma) kandungan Fe meningkat. Peningkatan kandungan Fe ini sejalan dengan karakteristik fasa intermetalik yang semakin kaya Fe ketika mendekati substrat. Pola gradien distribusi Fe tersebut menunjukkan bahwa pertumbuhan lapisan intermetalik dikendalikan oleh proses difusi, di mana atom Fe dari baja bereaksi dengan Zn cair dan membentuk fasa Fe-Zn secara berlapis. Selain itu, pemetaan unsur juga memperlihatkan adanya zona yang mengandung unsur O yang terdistribusi secara

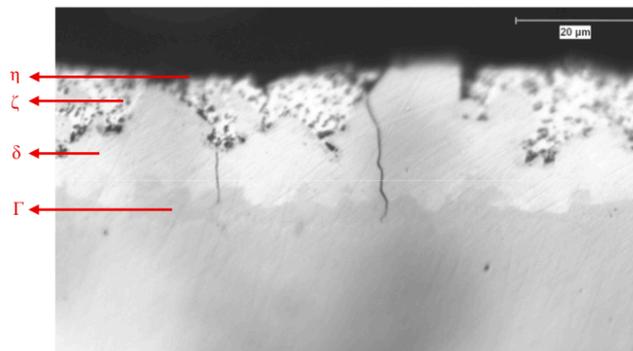
lokal pada lapisan tertentu dan ditandai dengan warna merah. Kehadiran unsur O ini mengindikasikan terbentuknya oksida, yang kemungkinan berasal dari oksidasi permukaan Zn setelah proses pencelupan atau selama preparasi spesimen.

Hasil analisis SEM–EDX pada titik 004 menunjukkan komposisi unsur Zn sebesar 94,72%, Fe sebesar 1,53%, dan O sebesar 3,75%. Kandungan Zn yang sangat tinggi disertai keberadaan Fe, meskipun dalam jumlah kecil, menunjukkan bahwa titik zona fasa  $\zeta$  ( $\text{FeZn}_{13}$ ) yang bersifat kaya Zn. Hal ini sesuai dengan literatur yang menyatakan bahwa fasa  $\zeta$  memiliki kandungan Zn sekitar 94% dan mengandung Fe sekitar 6% sebagai unsur intermetalik [18]. Keberadaan oksigen dalam jumlah kecil diduga berasal dari oksidasi permukaan Zn selama ekspos udara atau preparasi spesimen. Pada zona ini cenderung bersifat keras dan getas [2].

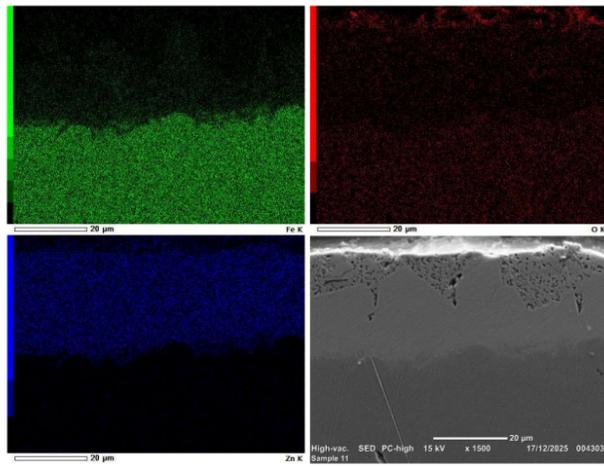
Pada titik 005, hasil SEM–EDX menunjukkan kandungan Zn sebesar 83,66%, Fe sebesar 14,71% dan O sebesar 1,62%. Komposisi ini menunjukkan peningkatan kandungan Fe yang signifikan dibandingkan titik 004, yang menandakan bahwa titik ini berada lebih ke arah dalam lapisan intermetalik. Berdasarkan perbandingan komposisi tersebut, titik 005 diidentifikasi sebagai zona fasa  $\delta$ . Hal ini sesuai dengan literatur yang menyatakan bahwa fasa  $\delta$  memiliki kandungan Zn sekitar 90% dan mengandung Fe sekitar 10% [18]. sebagai pada zona ini cenderung bersifat ulet dibandingkan lapisan di atasnya.

Hasil SEM–EDX pada titik 006 menunjukkan komposisi Fe sebesar 66,88% dan Zn sebesar 32,95%, dengan kandungan O sebesar 0,17%. Berdasarkan komposisi ini mengindikasikan bahwa titik tersebut berada pada zona fasa  $\Gamma$  ( $\text{Fe}_3\text{Zn}_{10}$ ) atau mendekati *base steel*. Lapisan ini bersifat keras, getas, dan tipis [2].

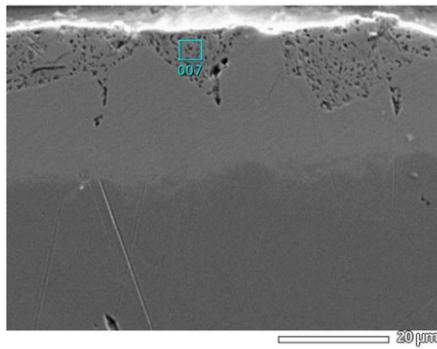
Secara keseluruhan, hasil pengamatan struktur mikro dan analisis SEM-EDX menunjukkan bahwa pada temperatur pencelupan 450 °C dan komposisi ACN 1,5, lapisan galvanisfasa  $\eta$  yang sangat tipis dan tidak beraturan, serta lapisan intermetalik  $\Gamma$  yang relatif tipis di dekat substrat baja. Kondisi ini terjadi karena suhu 450 °C masih tergolong rendah sehingga laju difusi Fe ke dalam Zn berjalan lambat [19]. Selain itu, dengan komposisi ACN 1,5 masih terdapat residu  $\text{NH}_4\text{Cl}$  dan  $\text{ZnCl}_2$  yang membentuk lapisan klorida di antarmuka Fe-Zn. Lapisan klorida ini bertindak sebagai penghambat difusi, sehingga pertumbuhan fasa intermetalik tertekan dan lapisan Zn murni menjadi dominan [20].



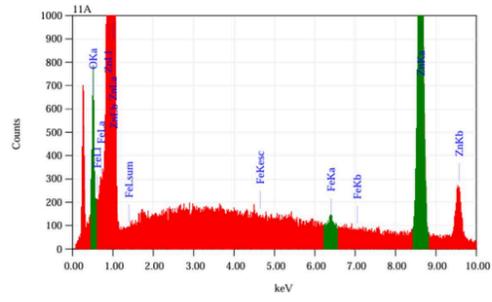
**Gambar 4.16** Struktur Mikro Hasil *Hot Dip Galvanizing* dengan Komposisi ACN 1,5 dan Temperatur Pencelupan 500°C



**Gambar 4.17** Pemetaan Unsur Fe, O, dan Zn Sampel 2 dengan Komposisi ACN 1,5 dan Temperatur Pencelupan 500°C

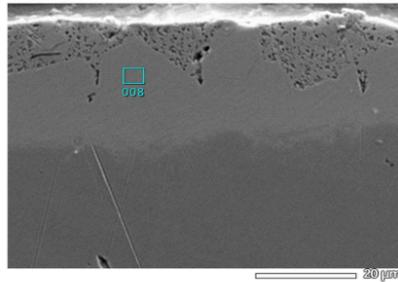


(a)

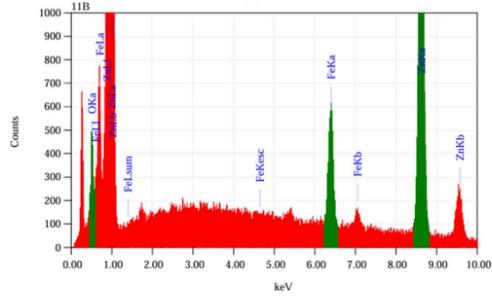


(b)

**Gambar 4.18** (a) Titik 007 Pengujian SEM EDX (b) Hasil EDX Titik 007 Sampel 2 dengan Komposisi ACN 1,5 dan Temperatur Pencelupan 500°C

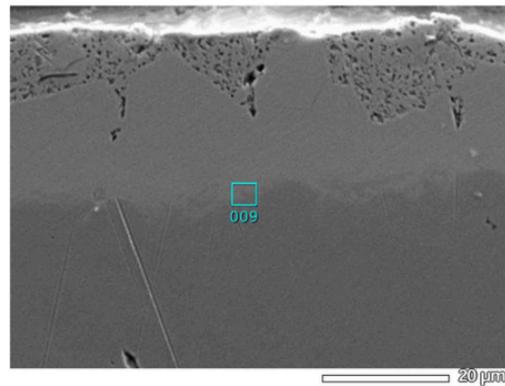


(a)

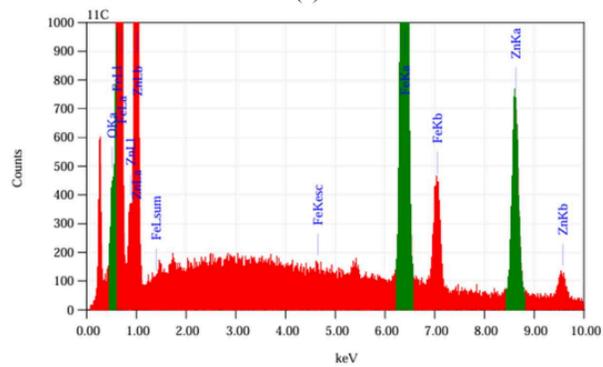


(b)

**Gambar 4.19** (a) Titik 008 Pengujian SEM EDX (b) Hasil EDX Titik 008  
Sampel 2 dengan Komposisi ACN 1,5 dan Temperatur Pencelupan 500°C



(a)



(b)

**Gambar 4.19** (a) Titik 009 Pengujian SEM EDX (b) Hasil EDX Titik 009  
Sampel 2 dengan Komposisi ACN 1,5 dan Temperatur Pencelupan 500°C

**Tabel 4.3** Hasil SEM EDX Sampel 2 dengan Komposisi ACN 1,5 dan  
Temperatur Pencelupan 500°C

No.	Titik SEM EDX	Element	KeV	Mass(%)
1.	Titik 007	Zn K	8.630	96.14
		O K	0.525	3.26
		Fe K	6.398	0.60
		Total		100.00
2.	Titik 008	Zn K	8.630	89.64
		Fe K	6.398	8.48
		O K	0.525	1.88
		Total		100.00
3	Titik 009	Fe K	6.398	56.56
		Zn K	8.630	43.20
		O K	0.525	0.25
		Total		100.00

Berdasarkan pengamatan struktur mikro pada Gambar 4.16, lapisan hasil hot dip galvanizing dengan komposisi ACN 1,5 dan temperatur pencelupan 500 °C menunjukkan lapisan bagian atas yaitu fasa  $\eta$  (eta) lebih kasar dan tidak homogen. Di bawahnya, fasa  $\zeta$  (zeta) tampak lebih tebal dan tidak seragam, dengan morfologi bergerigi yang khas akibat pertumbuhan intermetalik. Selanjutnya, fasa  $\delta$  (delta) terlihat lebih kompak dan relatif kontinu sebelum mencapai substrat baja,

sedangkan fasa  $\Gamma$  (gamma) berada sangat tipis di dekat antarmuka baja dan sulit diamati secara visual.

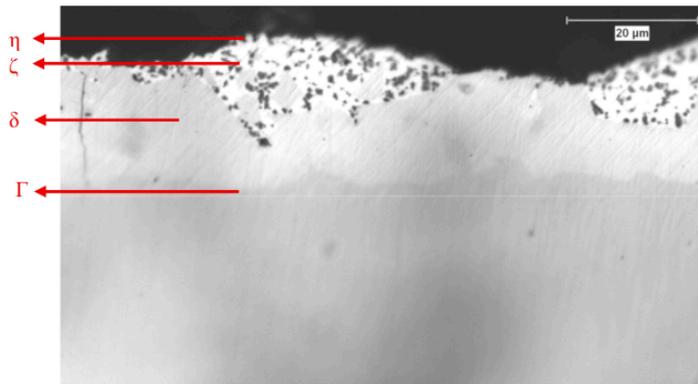
Hasil pemetaan unsur SEM-EDS menunjukkan bahwa unsur Zn terdistribusi dominan pada lapisan bagian atas dengan intensitas warna biru yang tinggi, yang mengindikasikan keberadaan fasa  $\eta$  (eta) sebagai lapisan terluar dengan kandungan Zn sangat tinggi. Distribusi unsur Fe (warna hijau) tampak rendah pada lapisan atas dan meningkat secara bertahap ke arah substrat baja, menunjukkan adanya gradien difusi Fe dari baja ke dalam lapisan Zn selama proses hot dip galvanizing. Zona transisi antara Zn-dominan dan Fe-dominan mengindikasikan terbentuknya fasa intermetalik  $\zeta$  (zeta) dan  $\delta$  (delta). Unsur O (warna merah) terdeteksi secara lokal pada lapisan atas, yang menunjukkan terbentuknya oksida Zn, kemungkinan akibat oksidasi setelah pencelupan atau selama preparasi spesimen. Pola distribusi ini menegaskan bahwa pertumbuhan lapisan dikendalikan oleh mekanisme difusi Fe-Zn

Hasil analisis SEM-EDX pada titik 007 menunjukkan komposisi unsur Zn sebesar 96,14%, Fe sebesar 0.60%, dan O sebesar 3,26%. Kandungan Zn yang sangat tinggi disertai keberadaan Fe, meskipun dalam jumlah kecil, menunjukkan bahwa titik zona fasa  $\zeta$  ( $\text{FeZn}_{13}$ ) yang bersifat kaya Zn. Hal ini sesuai dengan literatur yang menyatakan bahwa fasa  $\zeta$  memiliki kandungan Zn sekitar 94% dan mengandung Fe sekitar 6% sebagai unsur intermetalik [18]. Keberadaan oksigen dalam jumlah kecil diduga berasal dari oksidasi permukaan Zn selama ekspos udara atau preparasi spesimen. Pada zona ini cenderung bersifat keras dan getas [2].

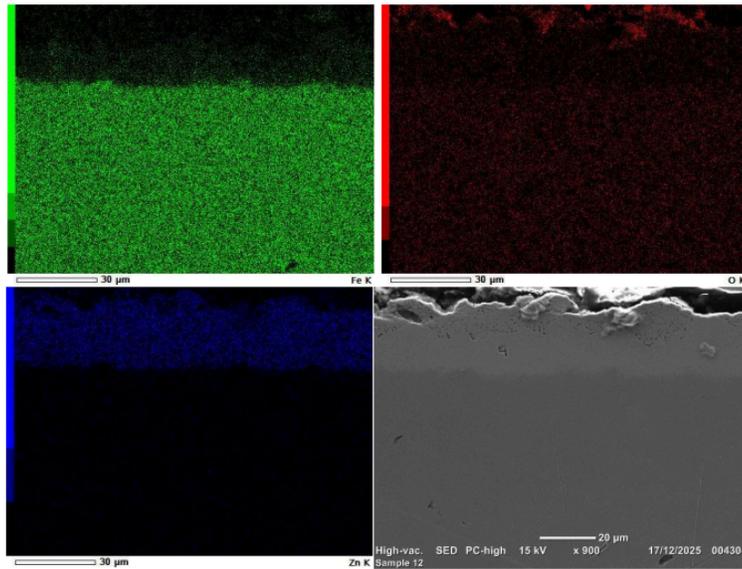
Pada titik 008, hasil SEM–EDX menunjukkan kandungan Zn sebesar 89,64%, Fe sebesar 8,48% dan O sebesar 1.88% . Komposisi ini menunjukkan peningkatan kandungan Fe dibandingkan titik 007, yang menandakan bahwa titik ini berada lebih ke arah dalam lapisan intermetalik. Berdasarkan perbandingan komposisi tersebut, titik 008 diidentifikasi sebagai zona fasa  $\delta$ . Hal ini sesuai dengan literatur yang menyatakan bahwa fasa  $\delta$  memiliki kandungan Zn sekitar 90% dan mengandung Fe sekitar 10% [18]. sebagai pada zona ini cenderung bersifat ulet dibandingkan lapisan di atasnya.

Hasil SEM–EDX pada titik 009 menunjukkan komposisi Fe sebesar 56,56% dan Zn sebesar 43,20%, dengan kandungan O sebesar 0,25%. Berdasarkan komposisi ini mengindikasikan bahwa titik tersebut berada pada zona fasa  $\Gamma$  ( $\text{Fe}_3\text{Zn}_{10}$ ) atau mendekati *base steel*. Lapisan ini bersifat keras, getas, dan tipis [2].

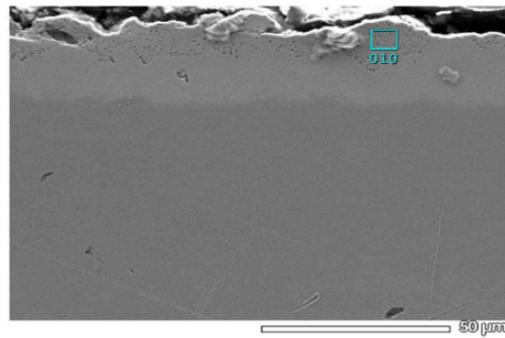
Secara keseluruhan, hasil pengamatan struktur mikro dan analisis SEM–EDX menunjukkan bahwa peningkatan temperatur pencelupan dari 450 °C menjadi 500 °C pada komposisi ACN 1,5 menyebabkan pertumbuhan lapisan intermetalik yang berjalan dengan cepat, khususnya pada fasa  $\zeta$  dan  $\delta$ . Difusi Fe–Zn yang lebih intens menghasilkan lapisan intermetalik yang lebih tebal, namun juga meningkatkan kecenderungan terbentuknya retakan akibat sifat getas fasa Fe–Zn dan perbedaan koefisien muai termal antar lapisan [19].



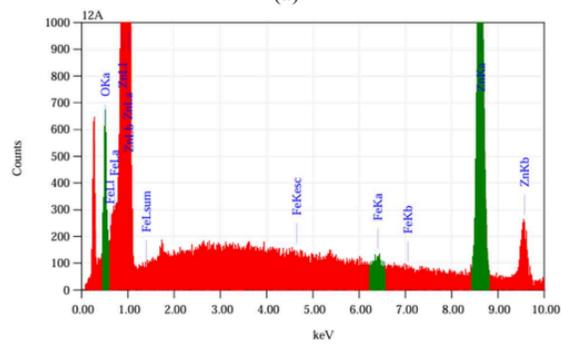
**Gambar 4.20** Struktur Mikro Hasil *Hot Dip Galvanizing* dengan Komposisi ACN 1,5 dan Temperatur Pencelupan 550°C Perbesaran 1000x



**Gambar 4.21** Pemetaan Unsur Fe, O, dan Zn Sampel 3 dengan Komposisi ACN 1,5 dan Temperatur Pencelupan 550°C



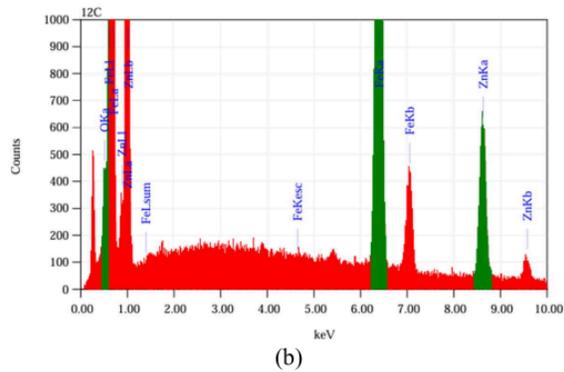
(a)



(b)

**Gambar 4.22** (a) Titik 010 Pengujian SEM EDX (b) Hasil EDX Titik 010 Sampel 3 dengan Komposisi ACN 1,5 dan Temperatur Pencelupan 550°C





**Gambar 4.24** (a) Titik 012 Pengujian SEM EDX (b) Hasil EDX Titik 012 Sampel 3 dengan Komposisi ACN 1,5 dan Temperatur Pencelupan 550°C

**Tabel 4.4** Hasil SEM EDX Sampel 3 dengan Komposisi ACN 1,5 dan Temperatur Pencelupan 550°C

No.	Titik SEM EDX	Element	KeV	Mass(%)
1.	Titik 010	Zn K	8.630	96.33
		O K	0.525	3.03
		Fe K	6.398	0.64
		Total		100.00
2.	Titik 011	Zn K	8.630	88.67
		Fe K	6.398	9.52
		O K	0.525	1.81
		Total		100.00
3	Titik 012	Fe K	6.398	58.83

Zn K	8.630	40.92
O K	0.525	0.25
Total		100.00

---

Berdasarkan pengamatan struktur mikro pada Gambar 4.20, lapisan hasil hot dip galvanizing dengan komposisi ACN 1,5 dan temperatur pencelupan 550 °C menunjukkan lapisan atas tampak lebih kasar dan tidak homogen, dengan morfologi berpori dan tidak teratur, yang mengindikasikan bahwa fasa  $\eta$  (eta) telah menipis secara drastis atau hanya tersisa sebagai lapisan yang sangat tipis dan tidak kontinu. Lapisan intermetalik di bawahnya tampak lebih tebal dan dominan, terutama fasa  $\zeta$  (zeta) yang berkembang secara tidak seragam. Selanjutnya, menuju ke arah substrat baja terlihat lapisan yang lebih kompak dan padat yang dikaitkan dengan fasa  $\delta$  (delta), sedangkan fasa  $\Gamma$  (gamma) berada sangat tipis di dekat antarmuka baja. Retakan mikro yang terlihat pada lapisan intermetalik menunjukkan meningkatnya tegangan sisa akibat pertumbuhan lapisan yang lebih tebal dan sifat getas fasa Fe–Zn pada temperatur tinggi.

Pemetaan unsur SEM–EDX memperlihatkan bahwa distribusi Zn masih dominan pada lapisan atas, namun ketebalannya tampak lebih tipis dibandingkan sampel pada temperatur lebih rendah. Hal ini ditunjukkan oleh menurunnya intensitas warna biru di lapisan permukaan. Distribusi unsur Fe menunjukkan peningkatan intensitas yang lebih cepat ke arah permukaan, yang menandakan bahwa difusi Fe semakin aktif akibat peningkatan temperatur pencelupan. Kondisi ini menyebabkan pertumbuhan lapisan intermetalik Fe–Zn menjadi lebih dominan,

terutama fasa  $\zeta$  dan  $\delta$ , sementara fasa  $\eta$  menjadi sangat tipis atau tidak kontinu. Unsur O terdeteksi pada lapisan atas dan area berpori, yang mengindikasikan terbentuknya oksida Zn pada permukaan lapisan..

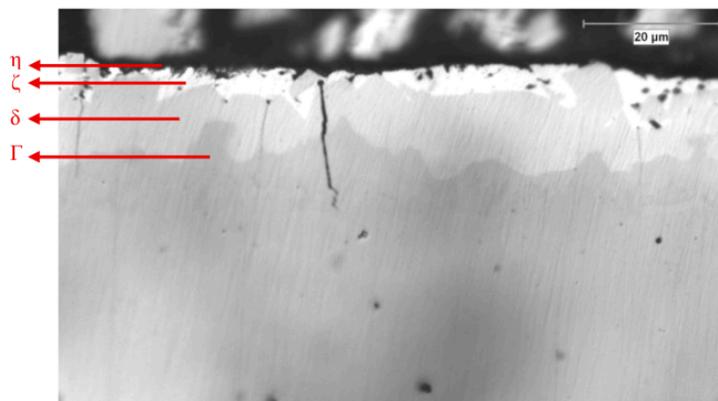
Hasil analisis SEM–EDX pada titik 010 menunjukkan komposisi unsur Zn sebesar 96,33%, Fe sebesar 3.03%, dan O sebesar 0.64%. Kandungan Zn yang sangat tinggi disertai keberadaan Fe, meskipun dalam jumlah kecil, menunjukkan bahwa titik zona fasa  $\zeta$  ( $\text{FeZn}_{13}$ ) yang bersifat kaya Zn. Hal ini sesuai dengan literatur yang menyatakan bahwa fasa  $\zeta$  memiliki kandungan Zn sekitar 94% dan mengandung Fe sekitar 6% sebagai unsur intermetalik [18]. Keberadaan oksigen dalam jumlah kecil yaitu sekitar 0,64% diduga berasal dari oksidasi permukaan Zn selama ekspos udara atau preparasi spesimen. Pada zona ini cenderung bersifat keras dan getas [2].

Pada titik 011, hasil SEM–EDX menunjukkan kandungan Zn sebesar 88,67%, Fe sebesar 9,52% dan O sebesar 1,81%. Komposisi ini menunjukkan peningkatan kandungan Fe dibandingkan titik 010, yang menandakan bahwa titik ini berada lebih ke arah dalam lapisan intermetalik. Berdasarkan perbandingan komposisi tersebut, titik 011 diidentifikasi sebagai zona fasa  $\delta$ . Hal ini sesuai dengan literatur yang menyatakan bahwa fasa  $\delta$  memiliki kandungan Zn sekitar 90% dan mengandung Fe sekitar 10% [18]. sebagai pada zona ini cenderung bersifat ulet dibandingkan lapisan di atasnya.

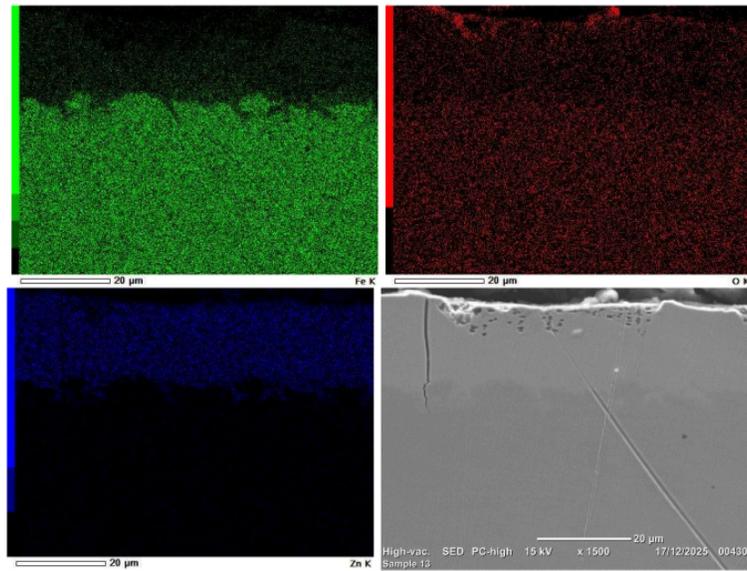
Hasil SEM–EDX pada titik 012 menunjukkan komposisi Fe sebesar 58,83% dan Zn sebesar 40,92%, dengan kandungan O sebesar 0,25%. Berdasarkan

komposisi ini mengindikasikan bahwa titik tersebut berada pada zona fasa  $\Gamma$  ( $\text{Fe}_3\text{Zn}_{10}$ ) atau mendekati *base steel*. Lapisan ini bersifat keras, getas, dan tipis [2].

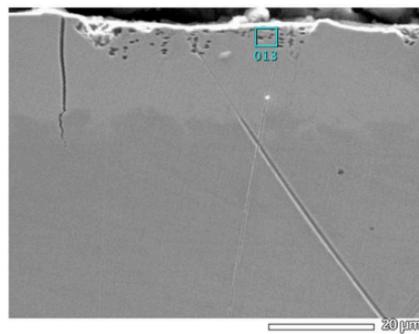
Secara keseluruhan, hasil pengamatan struktur mikro dan analisis SEM-EDX menunjukkan bahwa peningkatan temperatur pencelupan  $550\text{ }^\circ\text{C}$  pada komposisi ACN 1,5 menyebabkan pertumbuhan lapisan intermetalik yang berjalan dengan cepat, sehingga lapisan intermetalik  $\zeta$  dan  $\delta$  tumbuh lebih tebal dan dominan. Lapisan  $\eta$  masih terbentuk, namun menjadi sangat tipis dan tidak kontinu. Pertumbuhan lapisan intermetalik yang berlebihan ini meningkatkan kecenderungan terbentuknya retakan mikro akibat sifat getas fasa Fe-Zn dan perbedaan koefisien muai termal antara lapisan dan substrat baja. Kondisi ini menunjukkan bahwa meskipun temperatur tinggi dapat meningkatkan reaksi Fe-Zn, namun dapat berdampak negatif terhadap integritas mekanik lapisan galvanis. [19].



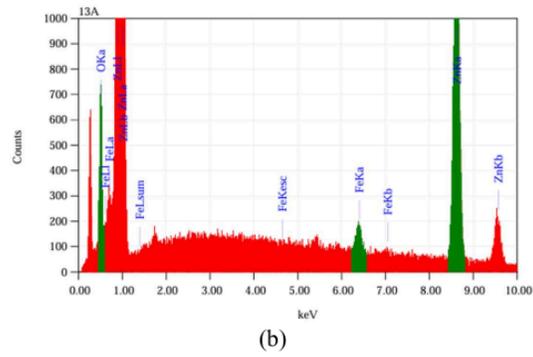
**Gambar 4.25** Struktur Mikro Hasil *Hot Dip Galvanizing* dengan Komposisi ACN 1,75 dan Temperatur Pencelupan  $450\text{ }^\circ\text{C}$  Perbesaran 1000x



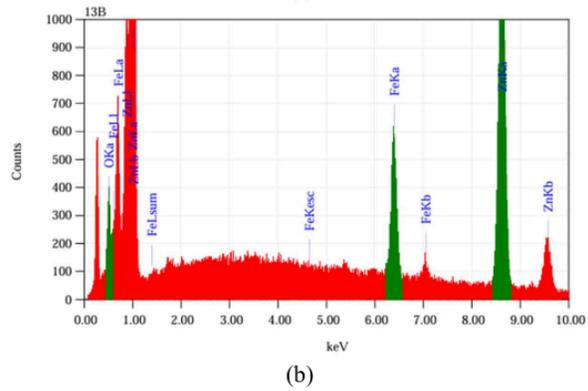
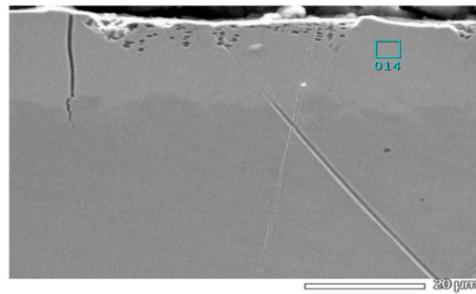
**Gambar 4.26** Pemetaan Unsur Fe, O, dan Zn Sampel 4 dengan Komposisi ACN 1,75 dan Temperatur Pencelupan 450°C



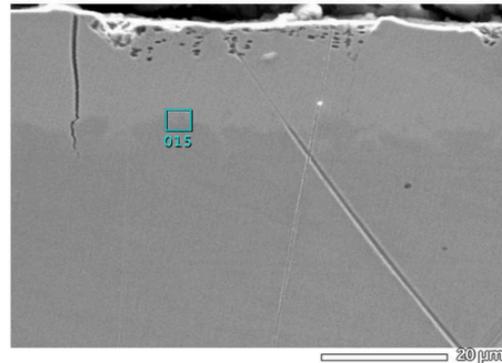
(a)



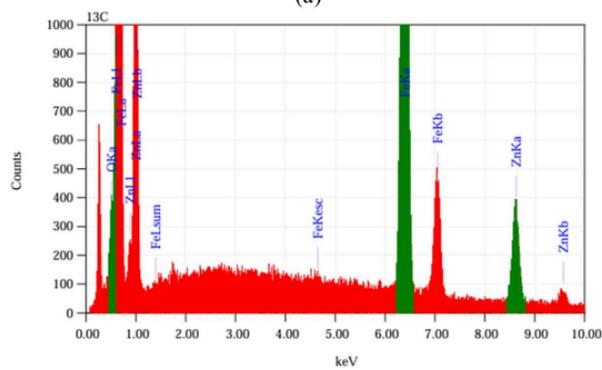
**Gambar 4.27** (a) Titik 013 Pengujian SEM EDX (b) Hasil EDX Titik 013 Sampel 4 dengan Komposisi ACN 1,75 dan Temperatur Pencelupan 450°C



**Gambar 4.30** (a) Titik 014 Pengujian SEM EDX (b) Hasil EDX Titik 014  
Sampel 4 dengan Komposisi ACN 1,75 dan Temperatur Pencelupan 450°C



(a)



(b)

**Gambar 4.31** (a) Titik 015 Pengujian SEM EDX (b) Hasil EDX Titik 015  
Sampel 4 dengan Komposisi ACN 1,75 dan Temperatur Pencelupan 450°C

**Tabel 4.5** Hasil SEM EDX Sampel 4 dengan Komposisi ACN 1,5 dan  
Temperatur Pencelupan 550°C

No.	Titik SEM EDX	Element	KeV	Mass(%)
1.	Titik 013	Zn K	8.630	93.82
		O K	0.525	4.19
		Fe K	6.398	1.99
		Total		100.00
2.	Titik 014	Zn K	8.630	88.77
		Fe K	6.398	9.55
		O K	0.525	1.68
		Total		100.00
3	Titik 015	Fe K	6.398	74.30
		Zn K	8.630	25.70
		O K	-	ND
		Total		100.00

Berdasarkan pengamatan struktur mikro pada Gambar 4.25, lapisan hasil hot dip galvanizing dengan komposisi ACN 1,75 dan temperatur pencelupan 450 °C menunjukkan lapisan atas tampak lebih halus dan merata. Sementara itu lapisan  $\zeta$  (zeta) dan  $\delta$  (delta) menjadi lebih relatif lebih tipis dan tidak berkembang secara dominan. Hal ini dikarenakan adanya residu  $\text{NH}_4\text{Cl}$  dan  $\text{ZnCl}_2$  yang membentuk lapisan klorida di antarmuka Fe–Zn sehingga difusi Fe-Zn jadi terhambat [19].

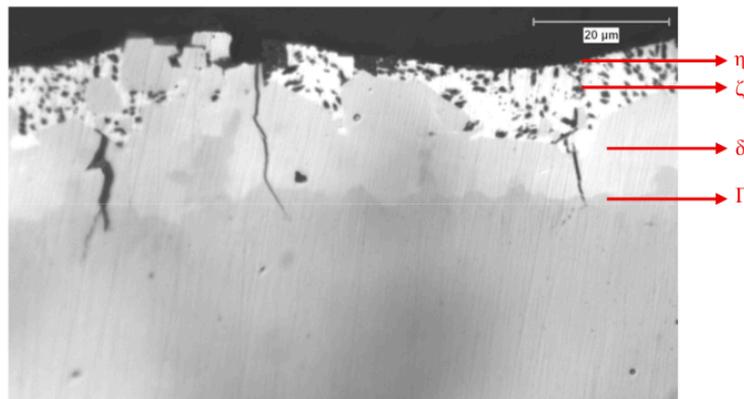
Hasil pemetaan unsur menunjukkan bahwa Zn terdistribusi dominan dan relatif homogen pada lapisan bagian atas, yang mengindikasikan keberadaan fasa  $\eta$  (eta) yang masih tebal dan kontinu. Intensitas unsur Fe pada lapisan atas relatif rendah dan meningkat secara bertahap menuju substrat baja, menunjukkan pembentukan lapisan intermetalik Fe–Zn yang terkendali. Zona transisi ini mengindikasikan keberadaan fasa  $\zeta$  dan  $\delta$  yang belum berkembang secara signifikan akibat temperatur pencelupan yang relatif rendah. Unsur O terdeteksi secara lokal pada permukaan lapisan, yang menunjukkan adanya oksida Zn sebagai hasil reaksi oksidasi pasca pencelupan.

Hasil analisis SEM–EDX pada titik 013 menunjukkan komposisi unsur Zn sebesar 93,82%, Fe sebesar 1.99%, dan O sebesar 4.19%. Kandungan Zn yang sangat tinggi disertai keberadaan Fe, meskipun dalam jumlah kecil, menunjukkan bahwa titik zona fasa  $\zeta$  ( $\text{FeZn}_{13}$ ) yang bersifat kaya Zn. Hal ini sesuai dengan literatur yang menyatakan bahwa fasa  $\zeta$  memiliki kandungan Zn sekitar 94% dan mengandung Fe sekitar 6% sebagai unsur intermetalik [18]. Keberadaan oksigen dalam jumlah kecil yaitu sekitar 1.99% diduga berasal dari oksidasi permukaan Zn selama ekspos udara atau preparasi spesimen. Pada zona ini cenderung bersifat keras dan getas [2].

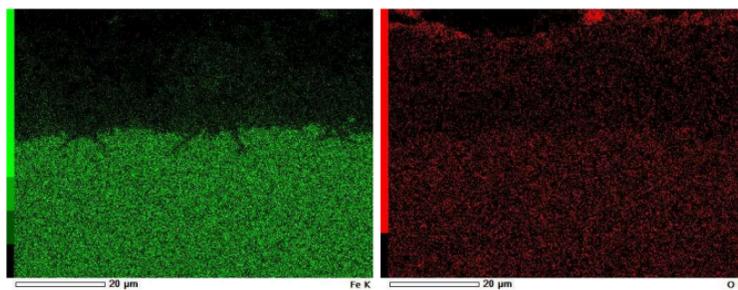
Pada titik 014, hasil SEM–EDX menunjukkan kandungan Zn sebesar 88,77% , Fe sebesar 9,55% dan O sebesar 1.68%. Komposisi ini menunjukkan peningkatan kandungan Fe dibandingkan titik 013, yang menandakan bahwa titik ini berada lebih ke arah dalam lapisan intermetalik. Berdasarkan perbandingan komposisi tersebut, titik 014 diidentifikasi sebagai zona fasa  $\delta$ . Hal ini sesuai

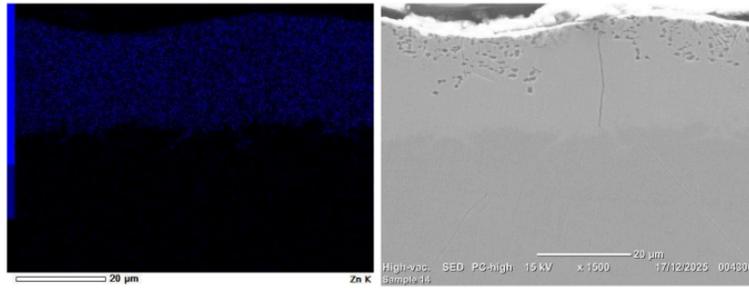
dengan literatur yang menyatakan bahwa fasa  $\delta$  memiliki kandungan Zn sekitar 90% dan mengandung Fe sekitar 10% [18]. sebagai pada zona ini cenderung bersifat ulet dibandingkan lapisan di atasnya.

Hasil SEM-EDX pada titik 015 menunjukkan komposisi Fe sebesar 74,30% dan Zn sebesar 25,70%. Berdasarkan komposisi ini mengindikasikan bahwa titik tersebut berada pada zona fasa  $\Gamma$  ( $\text{Fe}_3\text{Zn}_{10}$ ) atau mendekati *base steel*. Lapisan ini bersifat keras, getas, dan tipis [2].

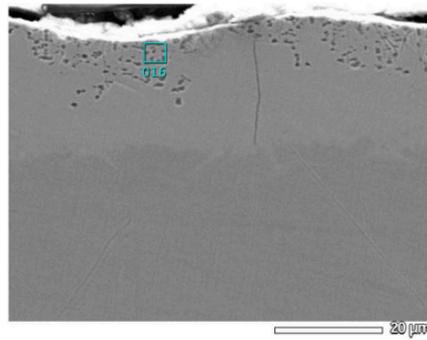


**Gambar 4.32** Struktur Mikro Hasil *Hot Dip Galvanizing* dengan Komposisi ACN 1,75 dan Temperatur Pencelupan 500°C Perbesaran 1000x

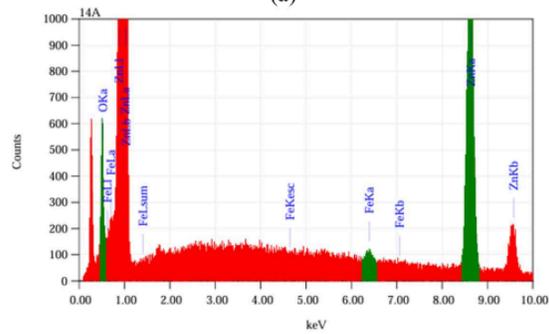




**Gambar 4.33** Pemetaan Unsur Fe, O, dan Zn Sampel 5 dengan Komposisi ACN 1,75 dan Temperatur Pencelupan 500°C

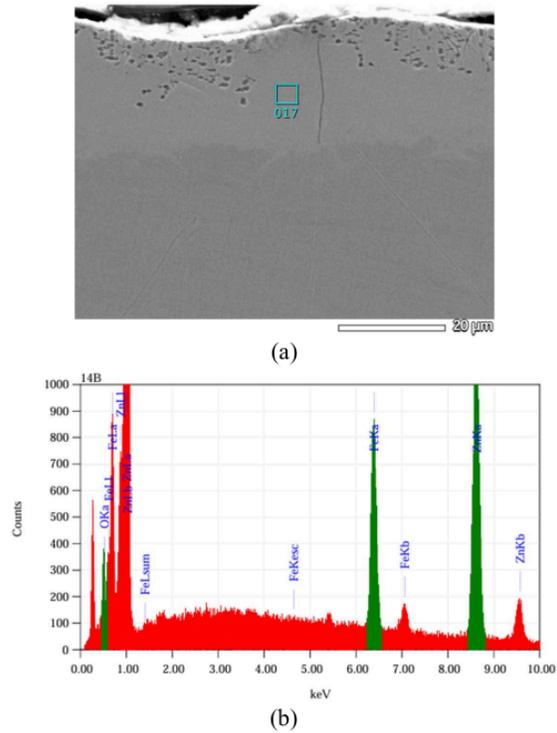


(a)

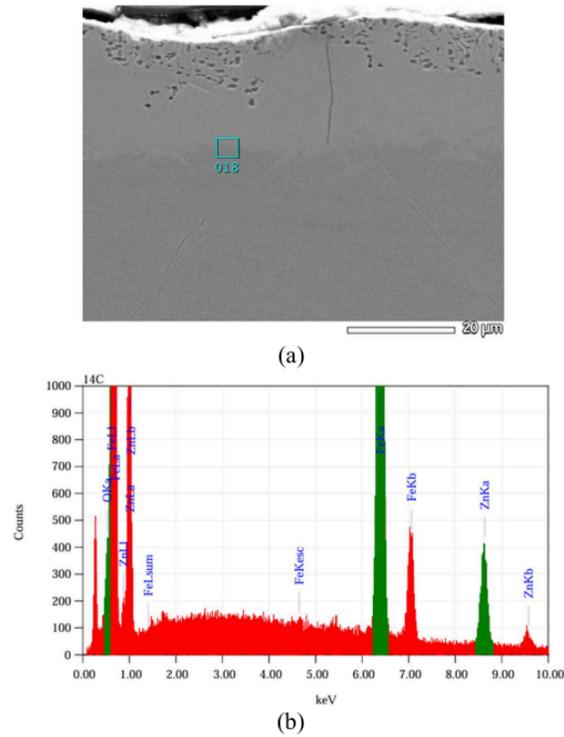


(b)

**Gambar 4.34** (a) Titik 016 Pengujian SEM EDX (b) Hasil EDX Titik 016  
Sampel 5 dengan Komposisi ACN 1,75 dan Temperatur Pencelupan 500°C



**Gambar 4.35** (a) Titik 017 Pengujian SEM EDX (b) Hasil EDX Titik 017  
Sampel 5 dengan Komposisi ACN 1,75 dan Temperatur Pencelupan 500°C



**Gambar 4.36** (a) Titik 018 Pengujian SEM EDX (b) Hasil EDX Titik 018 Sampel 5 dengan Komposisi ACN 1,75 dan Temperatur Pencelupan 500°C

**Tabel 4.6** Hasil SEM EDX Sampel 5 dengan Komposisi ACN 1,75 dan Temperatur Pencelupan 500°C

No.	Titik SEM EDX	Element	KeV	Mass(%)
1.	Titik 016	Zn K	8.630	95.67
		O K	0.525	3.50
		Fe K	6.398	0.83

	Total		100.00
2. Titik 017	Zn K	8.630	82.51
	Fe K	6.398	16.11
	O K	0.525	1.38
	Total		100.00
3 Titik 018	Fe K	6.398	71.11
	Zn K	8.630	28.89
	O K	-	ND
	Total		100.00

---

Berdasarkan pengamatan struktur mikro pada Gambar 4.32, lapisan hasil hot dip galvanizing dengan komposisi ACN 1,75 dan temperatur pencelupan 500 °C menunjukkan lapisan atas tampak relatif tidak homogen, dengan permukaan kasar dan disertai porositas lokal, yang mengindikasikan bahwa lapisan  $\eta$  (eta) seng murni mulai menipis dan tidak lagi terbentuk secara kontinu. Kondisi ini menunjukkan bahwa pada temperatur 500 °C, stabilitas lapisan  $\eta$  menurun akibat meningkatnya laju difusi Fe dari substrat baja ke dalam seng cair. Di bawah lapisan  $\eta$ , terlihat lapisan intermetalik yang lebih tebal dan dominan, terutama fasa  $\zeta$  (zeta) yang berkembang secara tidak seragam dengan morfologi kasar. Peningkatan temperatur pencelupan menyebabkan pertumbuhan fasa  $\zeta$  (zeta) menjadi lebih cepat dan cenderung membentuk struktur kasar dan berpori [21]. Fasa  $\delta$  (delta) tampak tidak beraturan terutama dari segi ketebalan dan bentuk antarmukanya, dimana lapisan ini terlihat menebal dan menipis secara lokal serta memiliki batas yang

bergelombang dengan fasa  $\zeta$  di atasnya. Fasa  $\Gamma$  (gamma) berada sangat tipis di dekat antarmuka baja dan sulit teramati secara jelas.

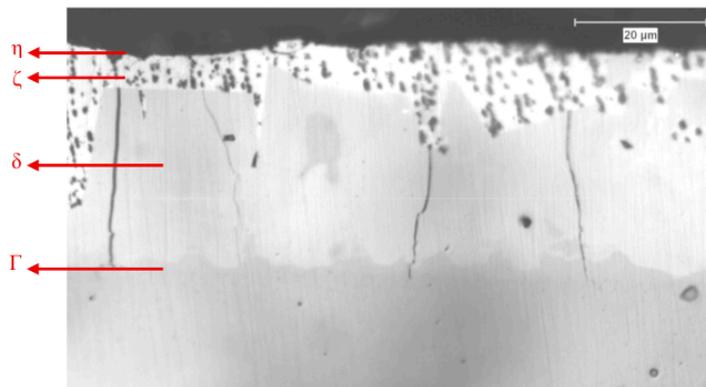
Hasil pemetaan unsur menunjukkan distribusi unsur Zn masih mendominasi lapisan terluar, namun terlihat adanya peningkatan kandungan Fe pada lapisan menengah yang ditunjukkan oleh intensitas warna hijau yang lebih jelas. Hal ini mengindikasikan pertumbuhan lapisan intermetalik Fe–Zn yang lebih tebal akibat peningkatan temperatur pencelupan. Fasa  $\zeta$  dan  $\delta$  mulai berkembang lebih dominan, sementara lapisan  $\eta$  mengalami penipisan. Unsur O terdeteksi pada lapisan atas dan area berpori, yang mengindikasikan terbentuknya oksida Zn. Pola distribusi unsur ini menunjukkan bahwa mekanisme difusi Fe semakin berperan dalam pembentukan lapisan

Hasil analisis SEM–EDX pada titik 016 menunjukkan komposisi unsur Zn sebesar 95,67%, Fe sebesar 0,83%, dan O sebesar 3,50%. Kandungan Zn yang sangat tinggi disertai keberadaan Fe, meskipun dalam jumlah kecil, menunjukkan bahwa titik zona fasa  $\zeta$  ( $\text{FeZn}_{13}$ ) yang bersifat kaya Zn. Hal ini sesuai dengan literatur yang menyatakan bahwa fasa  $\zeta$  memiliki kandungan Zn sekitar 94% dan mengandung Fe sekitar 6% sebagai unsur intermetalik [18]. Keberadaan oksigen yaitu sekitar 3.50% diduga berasal dari oksidasi permukaan Zn selama ekspos udara atau preparasi spesimen. Pada zona ini cenderung bersifat keras dan getas [2].

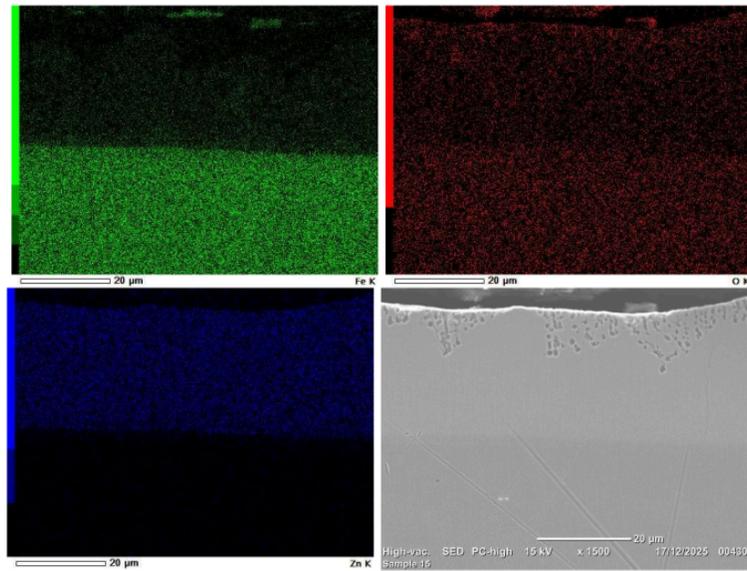
Pada titik 017, hasil SEM–EDX menunjukkan kandungan Zn sebesar 82,51% , Fe sebesar 16,11% dan O sebesar 1.38%. Komposisi ini menunjukkan peningkatan kandungan Fe dibandingkan titik 016, yang menandakan bahwa titik ini berada lebih ke arah dalam lapisan intermetalik. Berdasarkan perbandingan

komposisi tersebut, titik 017 diidentifikasi sebagai zona fasa  $\delta$ . Hal ini sesuai dengan literatur yang menyatakan bahwa fasa  $\delta$  memiliki kandungan Zn sekitar 90% dan mengandung Fe sekitar 10% [18]. sebagai pada zona ini cenderung bersifat ulet dibandingkan lapisan di atasnya.

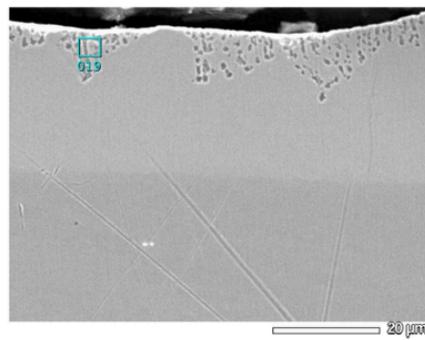
Hasil SEM-EDX pada titik 018 menunjukkan komposisi Fe sebesar 71,11% dan Zn sebesar 28,89%. Berdasarkan komposisi ini mengindikasikan bahwa titik tersebut berada pada zona fasa  $\Gamma$  ( $\text{Fe}_3\text{Zn}_{10}$ ) atau mendekati *base steel*. Lapisan ini bersifat keras, getas, dan tipis [2].



**Gambar 4.37** Struktur Mikro Hasil *Hot Dip Galvanizing* dengan Komposisi ACN 1,75 dan Temperatur Pencelupan 550°C Perbesaran 1000x



**Gambar 4.38** Pemetaan Unsur Fe, O, dan Zn Sampel 6 dengan Komposisi ACN 1,75 dan Temperatur Pencelupan 550°C

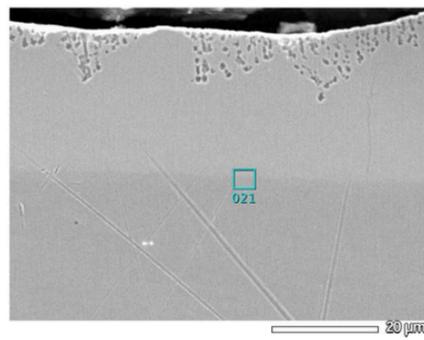


(a)

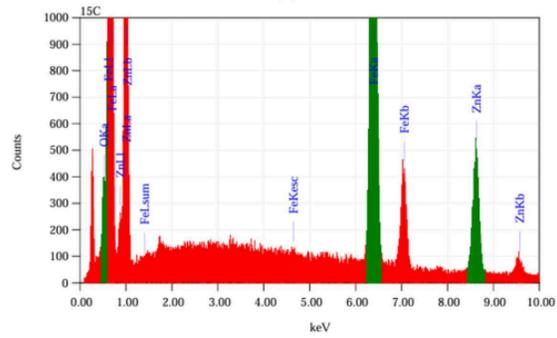


(b)

**Gambar 4.40** (a) Titik 020 Pengujian SEM EDX (b) Hasil EDX Titik 020  
Sampel 6 dengan Komposisi ACN 1,75 dan Temperatur Pencelupan 550°C



(a)



(b)

**Gambar 4.41** (a) Titik 021 Pengujian SEM EDX (b) Hasil EDX Titik 021  
Sampel 6 dengan Komposisi ACN 1,75 dan Temperatur Pencelupan 550°C

**Tabel 4.7** Hasil SEM EDX Sampel 6 dengan Komposisi ACN 1,5 dan  
Temperatur Pencelupan 550°C

No.	Titik SEM EDX	Element	KeV	Mass(%)
1.	Titik 019	Zn K	8.630	94.17
		O K	0.525	5.06
		Fe K	6.398	0.77
		Total		100.00
2.	Titik 020	Zn K	8.630	87.91
		Fe K	6.398	10.74
		O K	0.525	1.35
		Total		100.00
3	Titik 021	Fe K	6.398	63.44
		Zn K	8.630	32.76
		O K	0.525	0.13
		Total		100.00

Berdasarkan pengamatan struktur mikro pada Gambar 4.32, lapisan hasil *hot dip galvanizing* dengan komposisi ACN 1,75 dan temperatur pencelupan 500 °C menunjukkan lapisan atas yaitu fasa  $\eta$  (eta) tampak sangat tipis. Di bawahnya, fasa  $\zeta$  (zeta) berkembang dengan morfologi kasar dan berpori, diikuti oleh fasa  $\delta$  (delta) yang terlihat paling tebal, padat, dan tidak seragam ketebalannya akibat difusi Fe–Zn yang intens. Fasa  $\Gamma$  (gamma) berada sangat tipis di dekat antarmuka baja dan sulit dibedakan secara visual. Kehadiran retakan mikro yang menjalar

vertikal pada lapisan intermetalik menunjukkan meningkatnya tegangan sisa dan sifat getas lapisan Fe–Zn pada temperatur pencelupan 550 °C [21].

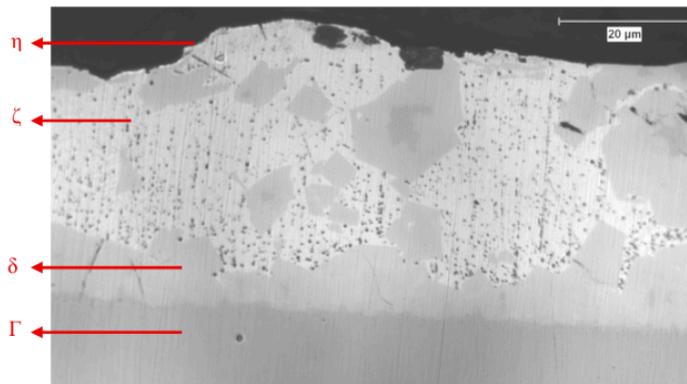
Hasil pemetaan unsur SEM–EDX menunjukkan bahwa distribusi Fe meningkat secara signifikan hingga mendekati lapisan permukaan, sedangkan distribusi Zn tampak menurun pada lapisan terluar. Hal ini menandakan bahwa lapisan intermetalik Fe–Zn berkembang secara dominan akibat temperatur pencelupan yang tinggi. Fasa  $\eta$  menjadi sangat tipis, sementara fasa  $\zeta$  dan  $\delta$  mendominasi struktur lapisan. Unsur O masih terdeteksi pada permukaan, yang menunjukkan adanya oksida Zn. Kondisi ini mencerminkan laju difusi Fe yang tinggi sehingga mempercepat pertumbuhan lapisan intermetalik.

Hasil analisis SEM–EDX pada titik 019 menunjukkan komposisi unsur Zn sebesar 94.17%, Fe sebesar 0.77%, dan O sebesar 5.06%. Kandungan Zn yang sangat tinggi disertai keberadaan Fe, meskipun dalam jumlah kecil, menunjukkan bahwa titik zona fasa  $\zeta$  ( $\text{FeZn}_{13}$ ) yang bersifat kaya Zn. Hal ini sesuai dengan literatur yang menyatakan bahwa fasa  $\zeta$  memiliki kandungan Zn sekitar 94% dan mengandung Fe sekitar 6% sebagai unsur intermetalik [18]. Keberadaan oksigen yaitu sekitar 5,06% diduga berasal dari oksidasi permukaan Zn selama ekspos udara atau preparasi spesimen. Pada zona ini cenderung bersifat keras dan getas [2].

Pada titik 020, hasil SEM–EDX menunjukkan kandungan Zn sebesar 87.91% , Fe sebesar 10.74% dan O sebesar 1.35%. Komposisi ini menunjukkan peningkatan kandungan Fe dibandingkan titik 019, yang menandakan bahwa titik ini berada lebih ke arah dalam lapisan intermetalik. Berdasarkan perbandingan komposisi tersebut, titik 020 diidentifikasi sebagai zona fasa  $\delta$ . Hal ini sesuai

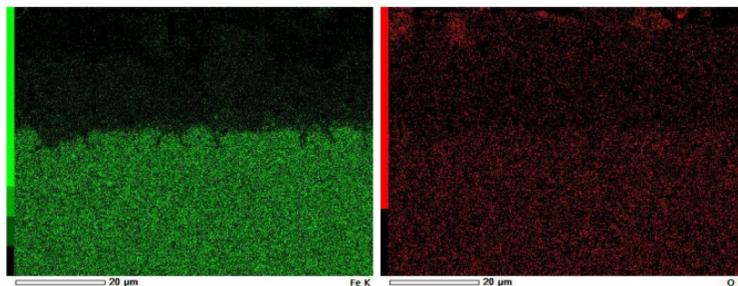
dengan literatur yang menyatakan bahwa fasa  $\delta$  memiliki kandungan Zn sekitar 90% dan mengandung Fe sekitar 10% [18]. sebagai pada zona ini cenderung bersifat ulet dibandingkan lapisan di atasnya.

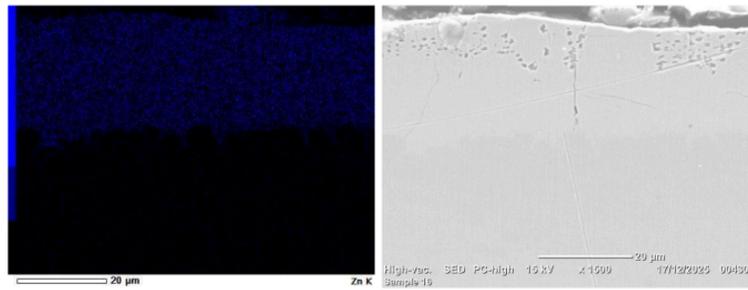
Hasil SEM-EDX pada titik 021 menunjukkan komposisi Fe sebesar 63.44%, Zn sebesar 32.76% dan O sebesar 0.13%. Berdasarkan komposisi ini mengindikasikan bahwa titik tersebut berada pada zona fasa  $\Gamma$  ( $\text{Fe}_3\text{Zn}_{10}$ ) atau mendekati *base steel*. Lapisan ini bersifat keras, getas, dan tipis [2].



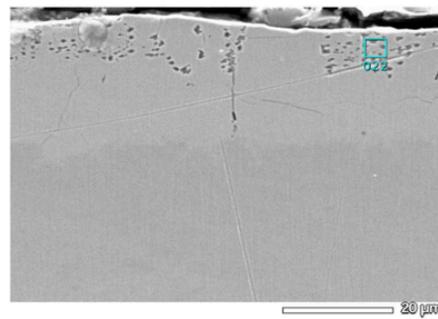
**Gambar 4.42** Struktur Mikro Hasil *Hot Dip Galvanizing* dengan Komposisi ACN

2,00 dan Temperatur Pencelupan 450°C Perbesaran 1000x

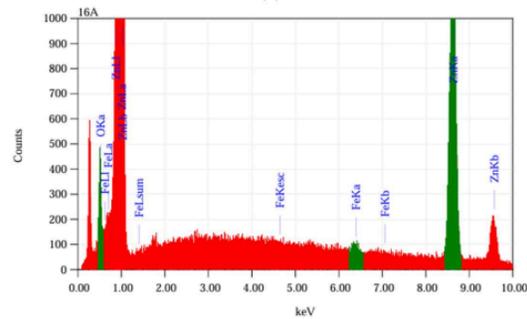




**Gambar 4.43** Pemetaan Unsur Fe, O, dan Zn Sampel 7 dengan Komposisi ACN 2,00 dan Temperatur Pencelupan 450°C

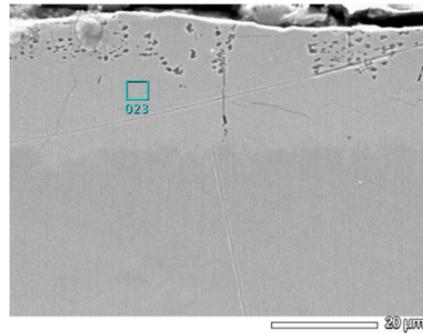


(a)

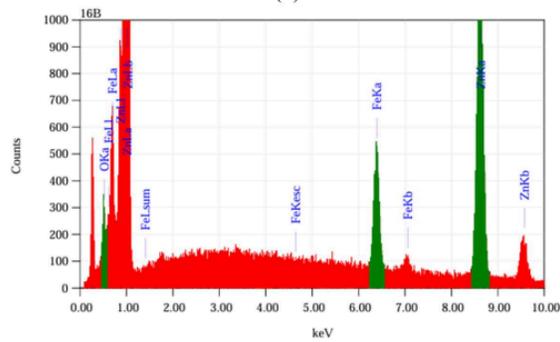


(b)

**Gambar 4.44** (a) Titik 022 Pengujian SEM EDX (b) Hasil EDX Titik 022 Sampel 6 dengan Komposisi ACN 2,00 dan Temperatur Pencelupan 450°C

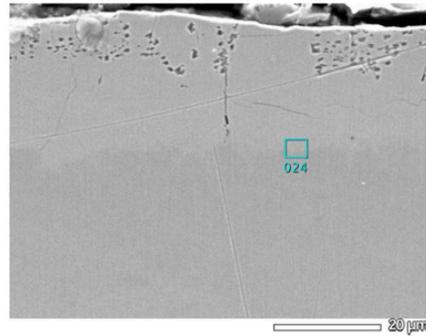


(a)

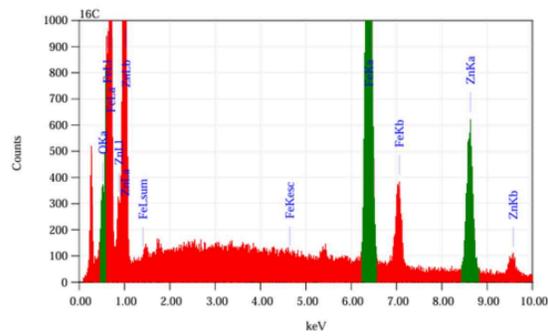


(b)

**Gambar 4.45** (a) Titik 023 Pengujian SEM EDX (b) Hasil EDX Titik 023 Sampel 6 dengan Komposisi ACN 2,00 dan Temperatur Pencelupan 450°C



(a)



(b)

**Gambar 4.46** (a) Titik 024 Pengujian SEM EDX (b) Hasil EDX Titik 024 Sampel 6 dengan Komposisi ACN 2,00 dan Temperatur Pencelupan 450°C

**Tabel 4.8** Hasil SEM EDX Sampel 7 dengan Komposisi ACN 2,00 dan Temperatur Pencelupan 450°C

No.	Titik SEM EDX	Element	KeV	Mass(%)
1.	Titik 022	Zn K	8.630	96.83
		O K	0.525	2.43

	Fe K	6.398	0.74
	Total		100.00
2. Titik 023	Zn K	8.630	88.90
	Fe K	6.398	9.53
	O K	0.525	1.57
	Total		100.00
3 Titik 024	Fe K	6.398	56.15
	Zn K	8.630	43.65
	O K	0.525	0.20
	Total		100.00

Berdasarkan pengamatan struktur mikro pada Gambar 4.42, lapisan hasil hot dip galvanizing dengan komposisi ACN 1,75 dan temperatur pencelupan 500 °C menunjukkan lapisan atas yaitu fasa  $\eta$  (eta) tampak ada lapisan terluar tampak masih cukup tebal dan kontinu. Di bawahnya, fasa  $\zeta$  (zeta) terlihat lebih tebal dari pada sampel lainnya. Fasa  $\delta$  (delta) terlihat tidak membentuk lapisan yang benar-benar kontinu, melainkan muncul sebagai segmen-segmen terpisah atau terfragmentasi di atas antarmuka baja. Fasa  $\Gamma$  (gamma) berada sangat tipis di dekat antarmuka baja dan sulit dibedakan secara visual.

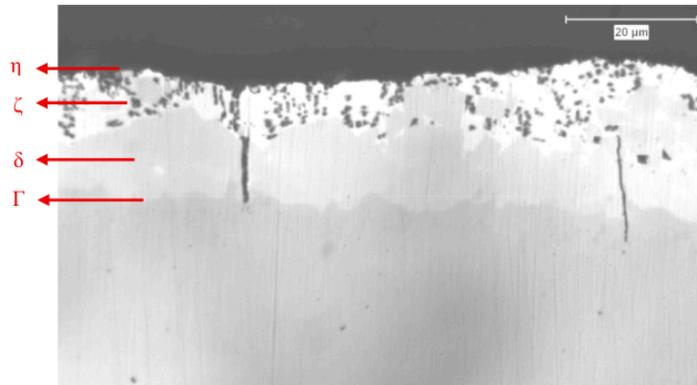
Hasil analisis SEM–EDX pada titik 022 menunjukkan komposisi unsur Zn sebesar 94.17%, Fe sebesar 0.77%, dan O sebesar 5.06%. Kandungan Zn yang sangat tinggi disertai keberadaan Fe, meskipun dalam jumlah kecil, menunjukkan bahwa titik zona fasa  $\zeta$  ( $\text{FeZn}_{13}$ ) yang bersifat kaya Zn. Hal ini sesuai dengan

literatur yang menyatakan bahwa fasa  $\zeta$  memiliki kandungan Zn sekitar 94% dan mengandung Fe sekitar 6% sebagai unsur intermetalik [18]. Keberadaan oksigen yaitu sekitar 5,06% diduga berasal dari oksidasi permukaan Zn selama ekspos udara atau preparasi spesimen. Pada zona ini cenderung bersifat keras dan getas [2].

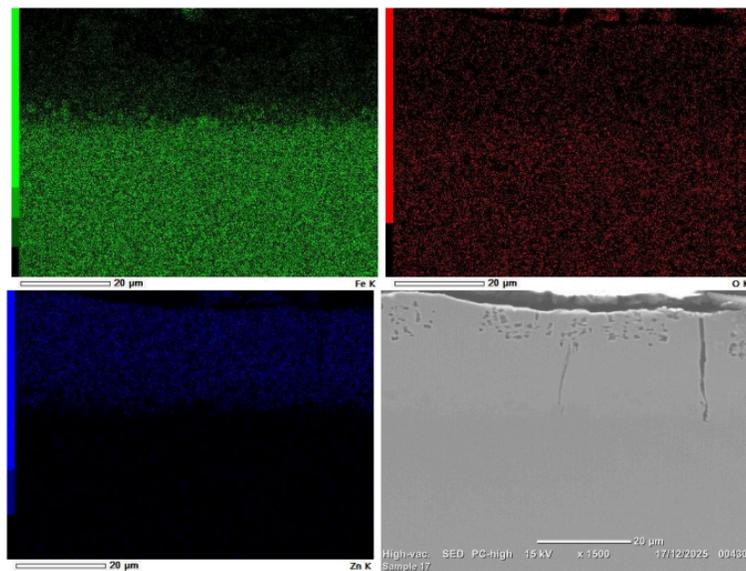
Pemetaan unsur menunjukkan bahwa Zn masih terdistribusi dominan pada lapisan atas, namun intensitas Fe mulai terlihat lebih tinggi dibandingkan sampel dengan komposisi ACN yang lebih rendah. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan komposisi ACN mempercepat reaksi Fe–Zn meskipun temperatur pencelupan masih relatif rendah. Zona transisi Fe–Zn menunjukkan pembentukan lapisan intermetalik yang mulai berkembang. Unsur O terdeteksi secara lokal pada permukaan lapisan, yang mengindikasikan adanya oksida Zn.

Pada titik 023, hasil SEM–EDX menunjukkan kandungan Zn sebesar 87.91% , Fe sebesar 10.74% dan O sebesar 1.35%. Komposisi ini menunjukkan peningkatan kandungan Fe dibandingkan titik 022, yang menandakan bahwa titik ini berada lebih ke arah dalam lapisan intermetalik. Berdasarkan perbandingan komposisi tersebut, titik 023 diidentifikasi sebagai zona fasa  $\delta$ . Hal ini sesuai dengan literatur yang menyatakan bahwa fasa  $\delta$  memiliki kandungan Zn sekitar 90% dan mengandung Fe sekitar 10% [18]. sebagai pada zona ini cenderung bersifat ulet dibandingkan lapisan di atasnya.

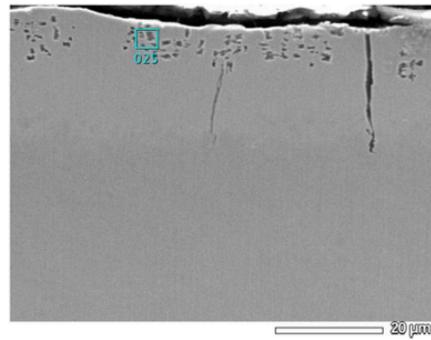
Hasil SEM–EDX pada titik 018 menunjukkan komposisi Fe sebesar 63.44%, Zn sebesar 32.76% dan O sebesar 0.13%. Berdasarkan komposisi ini mengindikasikan bahwa titik tersebut berada pada zona fasa  $\Gamma$  ( $\text{Fe}_3\text{Zn}_{10}$ ) atau mendekati *base steel*. Lapisan ini bersifat keras, getas, dan tipis [2].



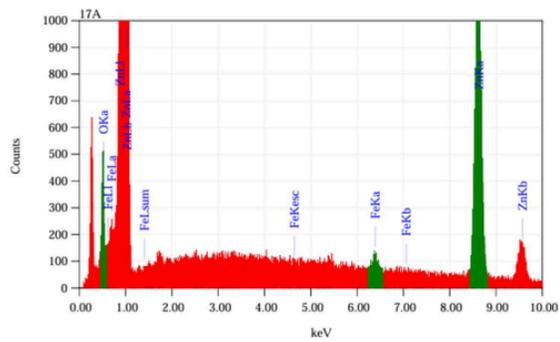
**Gambar 4.46** Struktur Mikro Hasil *Hot Dip Galvanizing* dengan Komposisi ACN 2,00 dan Temperatur Pencelupan 500°C Perbesaran 1000x



**Gambar 4.47** Pemetaan Unsur Fe, O, dan Zn Sampel 8 dengan Komposisi ACN 2,00 dan Temperatur Pencelupan 500°C

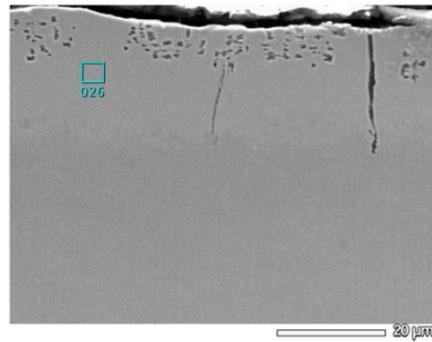


(a)

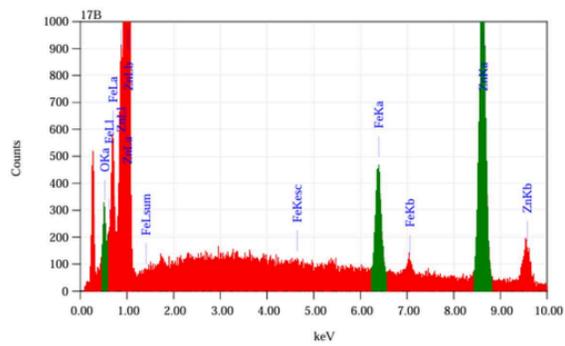


(b)

**Gambar 4.48** (a) Titik 025 Pengujian SEM EDX (b) Hasil EDX Titik 025  
Sampel 8 dengan Komposisi ACN 2,00 dan Temperatur Pencelupan 500°C

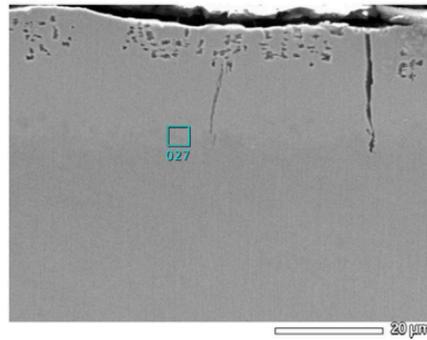


(a)

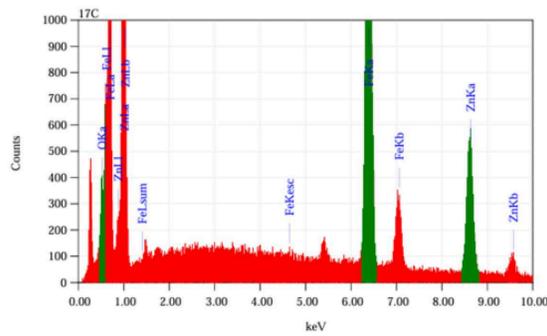


(b)

**Gambar 4.49** (a) Titik 026 Pengujian SEM EDX (b) Hasil EDX Titik 025 Sampel 8 dengan Komposisi ACN 2,00 dan Temperatur Pencelupan 500°C



(a)



(b)

**Gambar 4.50** (a) Titik 026 Pengujian SEM EDX (b) Hasil EDX Titik 025 Sampel 8 dengan Komposisi ACN 2,00 dan Temperatur Pencelupan 500°C

**Tabel 4.9** Hasil SEM EDX Sampel 8 dengan Komposisi ACN 2,00 dan Temperatur Pencelupan 500°C

No.	Titik SEM EDX	Element	KeV	Mass(%)
1.	Titik 025	Zn K	8.630	95.57

	O K	0.525	3.09
	Fe K	6.398	1.34
	Total		100.00
2. Titik 026	Zn K	8.630	89.45
	Fe K	6.398	8.84
	O K	0.525	1.71
	Total		100.00
3 Titik 027	Fe K	6.398	54.37
	Zn K	8.630	44.71
	O K	0.525	0.92
	Total		100.00

---

Berdasarkan pengamatan struktur mikro pada Gambar 4.46, lapisan hasil *hot dip galvanizing* dengan komposisi ACN 2,00 dan temperatur pencelupan 500 °C menunjukkan perkembangan lapisan intermetalik yang lebih menonjol dibandingkan pada temperatur 450 °C. Lapisan  $\eta$  (eta) pada permukaan tampak menipis dan tidak sepenuhnya kontinu, sementara fasa  $\zeta$  (zeta) di bawahnya berkembang dengan morfologi kasar dan berpori. Fasa  $\delta$  (delta) terlihat lebih tebal dan relatif kompak di dekat substrat baja, meskipun ketebalannya tidak seragam sepanjang permukaan. Fasa  $\Gamma$  (gamma) berada sangat tipis di dekat antarmuka baja dan sulit diamati secara visual. Kehadiran retakan mikro yang menjalar vertikal pada lapisan intermetalik menunjukkan meningkatnya tegangan sisa dan sifat getas

lapisan Fe–Zn akibat meningkatnya laju difusi Fe–Zn pada temperatur pencelupan 500 °C.

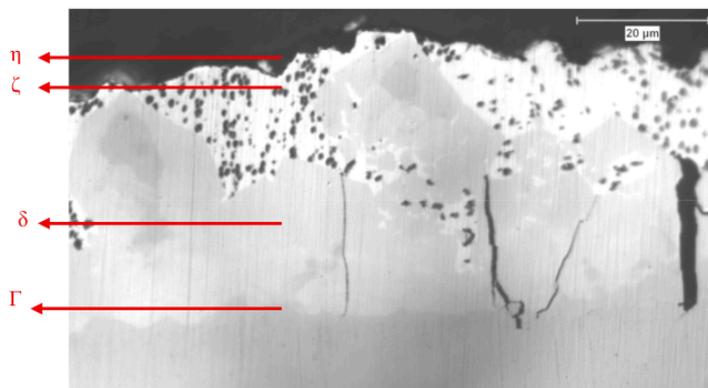
Hasil pemetaan unsur menunjukkan Distribusi unsur Zn pada lapisan permukaan masih terlihat, namun lapisan tersebut mulai menipis dan tidak sepenuhnya homogen. Intensitas Fe meningkat secara bertahap menuju lapisan atas, menunjukkan pertumbuhan lapisan intermetalik Fe–Zn yang lebih tebal. Hal ini mengindikasikan bahwa kombinasi peningkatan komposisi ACN dan temperatur pencelupan mempercepat difusi Fe dari substrat baja. Unsur O terdeteksi pada lapisan atas dan area berpori, yang menunjukkan terbentuknya oksida Zn.

Hasil analisis SEM–EDX pada titik 025 menunjukkan komposisi unsur Zn sebesar 95.57%, Fe sebesar 1.34%, dan O sebesar 3.09%. Kandungan Zn yang sangat tinggi disertai keberadaan Fe, meskipun dalam jumlah kecil, menunjukkan bahwa titik zona fasa  $\zeta$  ( $\text{FeZn}_{13}$ ) yang bersifat kaya Zn. Hal ini sesuai dengan literatur yang menyatakan bahwa fasa  $\zeta$  memiliki kandungan Zn sekitar 94% dan mengandung Fe sekitar 6% sebagai unsur intermetalik [18]. Keberadaan oksigen yaitu sekitar 3.09% diduga berasal dari oksidasi permukaan Zn selama ekspos udara atau preparasi spesimen. Pada zona ini cenderung bersifat keras dan getas [2].

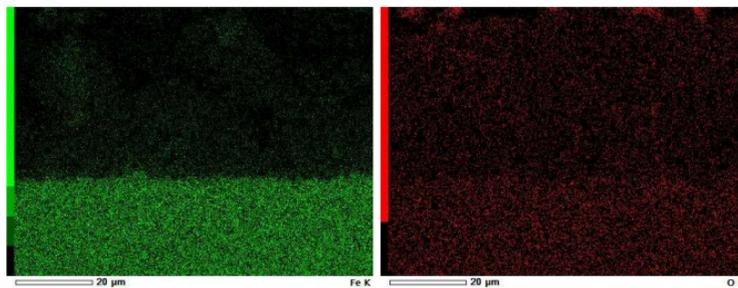
Pada titik 026, hasil SEM–EDX menunjukkan kandungan Zn sebesar 89.45% , Fe sebesar 8.84% dan O sebesar 1.71%. Komposisi ini menunjukkan peningkatan kandungan Fe dibandingkan titik 025, yang menandakan bahwa titik ini berada lebih ke arah dalam lapisan intermetalik. Berdasarkan perbandingan komposisi tersebut, titik 026 diidentifikasi sebagai zona fasa  $\delta$ . Hal ini sesuai dengan literatur yang menyatakan bahwa fasa  $\delta$  memiliki kandungan Zn sekitar

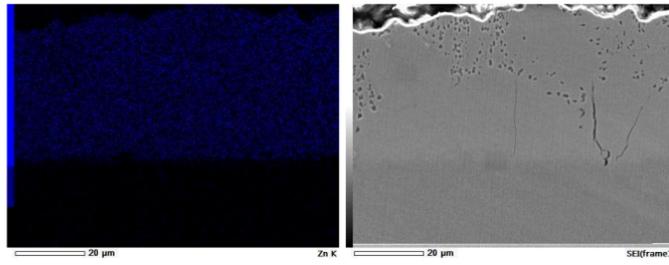
90% dan mengandung Fe sekitar 10% [18]. sebagai pada zona ini cenderung bersifat ulet dibandingkan lapisan di atasnya.

Hasil SEM–EDX pada titik 018 menunjukkan komposisi Fe sebesar 54.37%, Zn sebesar 44.71% dan O sebesar 0.92%. Berdasarkan komposisi ini mengindikasikan bahwa titik tersebut berada pada zona fasa  $\Gamma$  ( $\text{Fe}_3\text{Zn}_{10}$ ) atau mendekati *base steel*. Lapisan ini bersifat keras, getas, dan tipis [2].

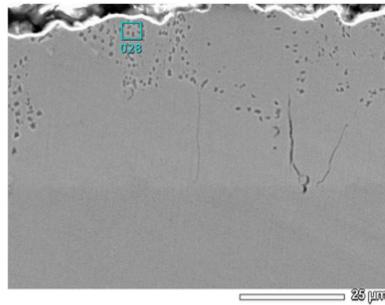


**Gambar 4.51** Struktur Mikro Hasil *Hot Dip Galvanizing* dengan Komposisi ACN 2,00 dan Temperatur Pencelupan 550°C Perbesaran 1000x

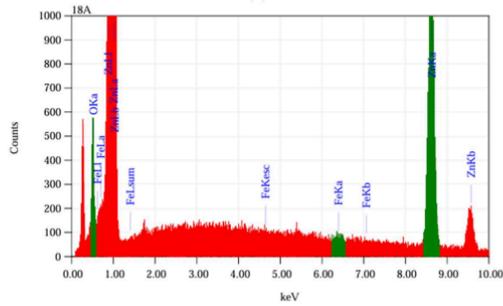




**Gambar 4.52** Pemetaan Unsur Fe, O, dan Zn Sampel 9 dengan Komposisi ACN 2,00 dan Temperatur Pencelupan 550°C

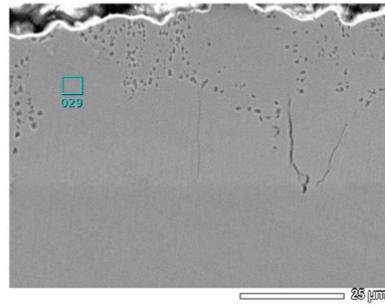


(a)

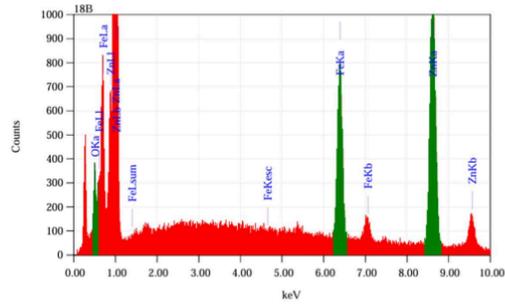


(b)

**Gambar 4.52** (a) Titik 028 Pengujian SEM EDX (b) Hasil EDX Titik 028  
Sampel 9 dengan Komposisi ACN 2,00 dan Temperatur Pencelupan 550°C

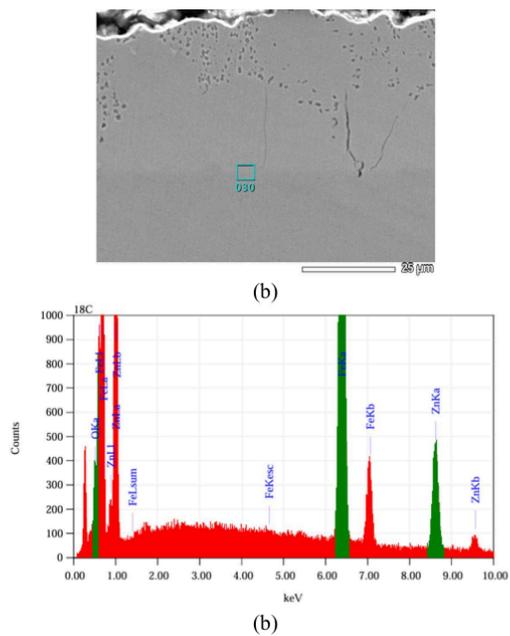


(a)



(b)

**Gambar 4.53** (a) Titik 029 Pengujian SEM EDX (b) Hasil EDX Titik 029  
Sampel 9 dengan Komposisi ACN 2,00 dan Temperatur Pencelupan 550°C



**Gambar 4.54** (a) Titik 030 Pengujian SEM EDX (b) Hasil EDX Titik 030 Sampel 9 dengan Komposisi ACN 2,00 dan Temperatur Pencelupan 550°C

**Tabel 4.10** Hasil SEM EDX Sampel 9 dengan Komposisi ACN 2,00 dan Temperatur Pencelupan 550°C

No.	Titik SEM EDX	Element	KeV	Mass(%)
1.	Titik 028	Zn K	8.630	96.29
		O K	0.525	3.34
		Fe K	6.398	0.36
		Total		100.00

2. Titik 029	Zn K	8.630	81.99
	Fe K	6.398	16.44
	O K	0.525	1.58
	Total		100.00
3 Titik 030	Fe K	6.398	62.79
	Zn K	8.630	36.72
	O K	0.525	0.49
	Total		100.00

---

Berdasarkan pengamatan struktur mikro pada Gambar 4.51, lapisan hasil hot dip galvanizing dengan komposisi ACN 2,00 dan temperatur pencelupan 550 °C menunjukkan dominasi lapisan intermetalik Fe–Zn yang tebal dan tidak homogen. Lapisan  $\eta$  (eta) pada bagian terluar tampak sangat tipis dan tidak kontinu, menandakan berkurangnya kestabilan seng murni pada temperatur tinggi. Di bawahnya, fasa  $\zeta$  (zeta) berkembang dengan morfologi kasar dan berpori, sedangkan fasa  $\delta$  (delta) terlihat paling dominan, tebal, dan tidak seragam ketebalannya akibat difusi Fe–Zn yang intens. Fasa  $\Gamma$  (gamma) berada sangat tipis di dekat antarmuka baja dan sulit dibedakan secara visual. Keberadaan retakan mikro yang jelas dan menjalar vertikal menunjukkan tingginya tegangan sisa serta sifat getas lapisan intermetalik pada temperatur pencelupan 550 °C, yang berpotensi menurunkan integritas mekanik lapisan galvanis.

Hasil pemetaan unsur menunjukkan bahwa unsur Fe terdistribusi dominan hingga mendekati lapisan permukaan, sedangkan distribusi Zn pada lapisan terluar

sangat menipis. Kondisi ini mengindikasikan dominasi lapisan intermetalik Fe–Zn, terutama fasa  $\zeta$  dan  $\delta$ , akibat laju difusi Fe yang sangat tinggi pada temperatur pencelupan 550 °C. Unsur O terdeteksi cukup jelas pada lapisan atas, yang menunjukkan adanya oksida Zn. Pola distribusi unsur ini menegaskan bahwa pertumbuhan lapisan dikendalikan oleh mekanisme difusi Fe–Zn yang intens

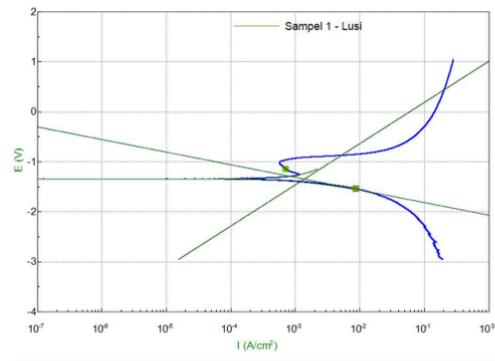
Hasil analisis SEM–EDX pada titik 028 menunjukkan komposisi unsur Zn sebesar 96.29%, Fe sebesar 0.36%, dan O sebesar 3.34%. Kandungan Zn yang sangat tinggi disertai keberadaan Fe, meskipun dalam jumlah kecil, menunjukkan bahwa titik zona fasa  $\zeta$  ( $\text{FeZn}_{13}$ ) yang bersifat kaya Zn. <sup>4</sup> Hal ini sesuai dengan literatur yang menyatakan bahwa fasa  $\zeta$  memiliki kandungan Zn sekitar 94% dan mengandung Fe sekitar 6% sebagai unsur intermetalik [18]. Keberadaan oksigen yaitu sekitar 3.34% diduga berasal dari oksidasi permukaan Zn selama ekspos udara atau preparasi spesimen. Pada zona ini cenderung bersifat keras dan getas [2].

Pada titik 029, hasil SEM–EDX menunjukkan kandungan Zn sebesar 81.99% , Fe sebesar 16.44% dan O sebesar 1.58%. Komposisi ini menunjukkan peningkatan kandungan Fe dibandingkan titik 028, yang menandakan bahwa titik ini berada lebih ke arah dalam lapisan intermetalik. Berdasarkan perbandingan komposisi tersebut, titik 029 diidentifikasi sebagai zona fasa  $\delta$ . <sup>4</sup> Hal ini sesuai dengan literatur yang menyatakan bahwa fasa  $\delta$  memiliki kandungan Zn sekitar 90% dan mengandung Fe sekitar 10% [18]. sebagai pada zona ini cenderung bersifat ulet dibandingkan lapisan di atasnya.

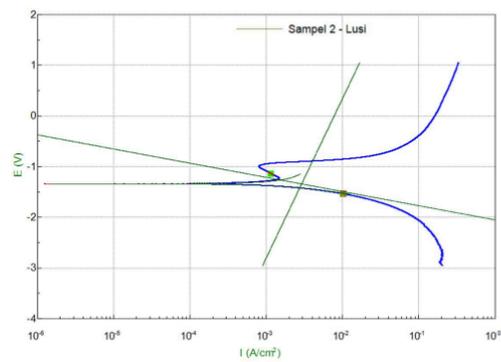
Hasil SEM–EDX pada titik 030 menunjukkan komposisi Fe sebesar 62.79%, Zn sebesar 36.72% dan O sebesar 0.49%. Berdasarkan komposisi ini

mengindikasikan bahwa titik tersebut berada pada zona fasa  $\Gamma$  ( $\text{Fe}_3\text{Zn}_{10}$ ) atau mendekati *base steel*. Lapisan ini bersifat keras, getas, dan tipis [2].

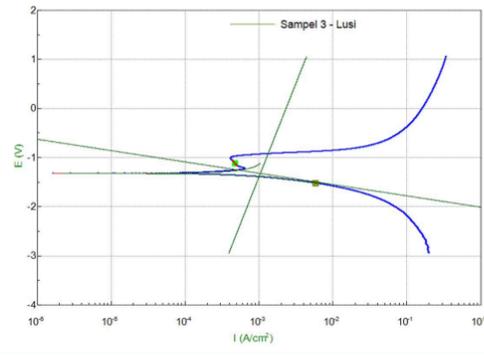
### 4.3 Analisa Hasil Korosi



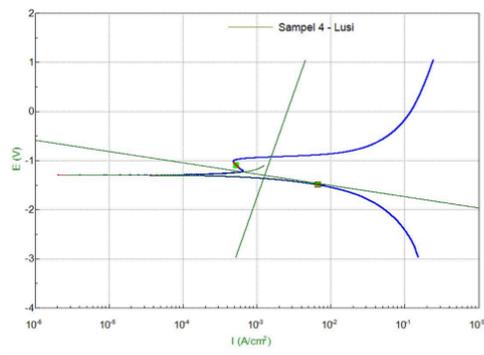
**Gambar 4.55** Kurva Polarisisasi Sampel 1 dengan Komposisi ACN 1,5 dan Temperatur Pencelupan 450°C



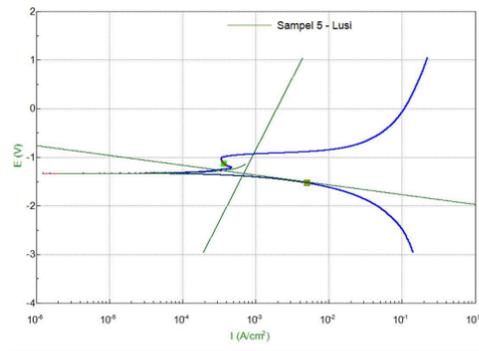
**Gambar 4.56** Kurva Polarisasi Sampel 2 dengan Komposisi ACN 1,5 dan Temperatur Pencelupan 500°C



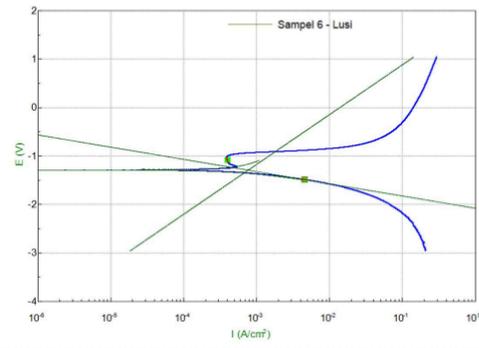
**Gambar 4.57** Kurva Polarisasi Sampel 3 dengan Komposisi ACN 1,5 dan Temperatur Pencelupan 550°C



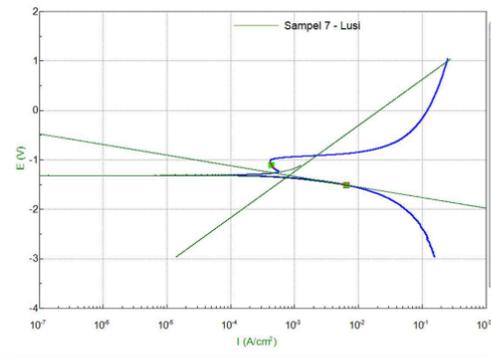
**Gambar 4.58** Kurva Polarisasi Sampel 4 dengan Komposisi ACN 1,75 dan Temperatur Pencelupan 450°C



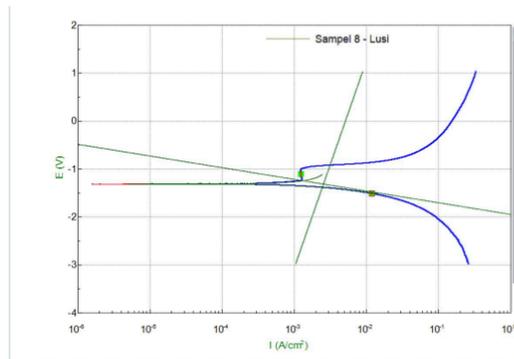
**Gambar 4.59** Kurva Polarisasi Sampel 5 dengan Komposisi ACN 1,75 dan Temperatur Pencelupan 500°C



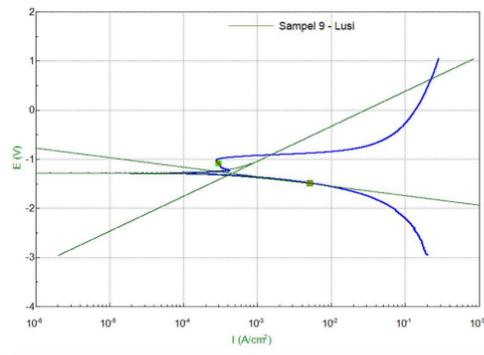
**Gambar 4.60** Kurva Polarisasi Sampel 6 dengan Komposisi ACN 1,75 dan Temperatur Pencelupan 550°C



**Gambar 4.61** Kurva Polarisasi Sampel 7 dengan Komposisi ACN 2,00 dan Temperatur Pencelupan 450°C



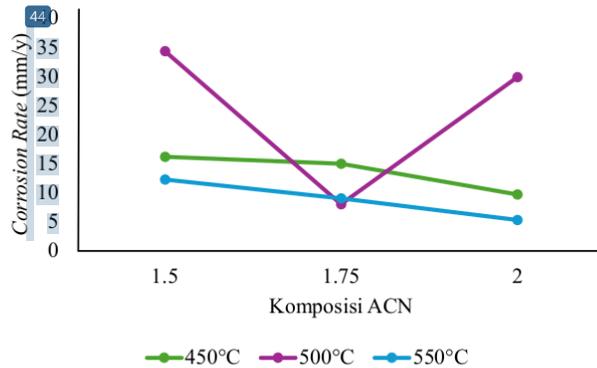
**Gambar 4.62** Kurva Polarisasi Sampel 8 dengan Komposisi ACN 2,00 dan Temperatur Pencelupan 500°C



**Gambar 4.63** Kurva Polarisasi Sampel 9 dengan Komposisi ACN 2,00 dan Temperatur Pencelupan 550°C

**Tabel 4.11** Nilai *Corrosion Rate*

No.	Komposisi ACN	Temperatur Pencelupan (°C)	Corrosion Rate (mm/y)
1.	1,50	450	16.155
		500	34.327
		550	12.257
2.	1,75	450	14.975
		500	8.0221
		550	9.0097
3.	2,00	450	9.6847
		500	29.843
		550	5.3009



**Gambar 4.64** Grafik Nilai *Corrosion Rate*

Berdasarkan analisis Grafik 1–9, variasi laju korosi yang diperoleh tidak hanya dipengaruhi oleh komposisi ACN dan temperatur pencelupan. Pada data tersebut yang memiliki *corrosion rate* yang paling rendah yaitu pada sampel 9 dengan dengan komposisi ACN 2,00 dan temperatur pencelupan 550°C. Hal ini berkaitan dengan lapisan pelindung yang terbentuk pada permukaan material. Secara prinsip, lapisan yang lebih tebal berfungsi sebagai penghalang (*barrier*) yang lebih efektif terhadap difusi ion agresif dari lingkungan korosif menuju substrat logam. Ketika ketebalan lapisan meningkat, jalur difusi ion korosif menjadi lebih panjang dan resistansi elektrokimia meningkat, sehingga reaksi anodik pada permukaan logam dapat ditekan dan densitas arus korosi menurun. Pada data tersebut terdapat beberapa sampel hasil pengujian korosi yang tidak sesuai dengan literatur yaitu sampel 2 yang dimana sampel ini memilikinilai *corrosion rate* yang lebih tinggi daripada sampel 1. Hal ini dapat disebabkan oleh struktur mikro dan

cacat yang terdapat pada sampel tersebut yang dimana sampel 2 struktur mikro yang dihasilkan terdapat banyak retakan dan tidak homogen sehingga dapat meningkatkan laju korosi. Selain itu, secara visual sampel 2 lebih banyak cacat yang terdapat pada lapisan galvanis dibandingkan dengan sampel 1. Pada sampel 6 memiliki *corrosion rate* lebih tinggi dibandingkan sampel 5. Hal ini dikarenakan retakan yang terbentuk pada sampel 5 cenderung dangkal, tidak saling terhubung, dan sebagian besar berhenti di dalam lapisan pelindung, sehingga tidak membentuk jalur kontinu menuju substrat logam. Retakan seperti ini berfungsi sebagai *stress-relief cracks*, yaitu retakan yang terbentuk untuk melepaskan tegangan internal akibat pertumbuhan lapisan, tetapi tidak efektif sebagai jalur difusi elektrolit. Akibatnya, meskipun jumlah retakan lebih banyak, ion agresif sulit mencapai logam dasar, sehingga reaksi elektrokimia tetap terhambat dan laju korosi relatif rendah.

Sebaliknya, pada Sampel 6, meskipun jumlah retakan tampak lebih sedikit, retakan yang terbentuk bersifat lebih panjang, lebih dalam, dan lebih kontinu, serta sebagian besar menembus hampir seluruh ketebalan lapisan. Retakan tipe ini sangat berbahaya karena berfungsi sebagai jalur difusi langsung (*fast diffusion paths*) bagi elektrolit dan ion klorida menuju substrat. Kondisi ini menyebabkan terbentuknya sel galvanik lokal di sepanjang retakan, yang secara signifikan meningkatkan densitas arus korosi dan akhirnya menaikkan laju korosi. Pada sampel 8 juga memiliki *corrosion rate* yang lebih tinggi dibandingkan sampel 7. Hal ini dikarenakan mikrostruktur sampel 8 terdapat banyak retakan. Selain itu sampel 8 juga terdapat cacat *blackspot* yang membuat laju korosi pada sampel 8 meningkat.

Peningkatan temperatur pencelupan dan komposisi ACN tertentu mendorong pertumbuhan lapisan yang lebih tebal akibat meningkatnya kinetika reaksi dan difusi atom. Semakin meningkat temperatur pencelupan, semakin meningkat juga tebal lapisan. Hal ini dikarenakan turunnya viskositas larutan akibat naiknya temperatur sehingga membuat pergerakan dan pengendapan ion logam menuju permukaan katoda menjadi lebih cepat. Selain itu, peningkatan temperatur juga meningkatkan reaktivitas larutan dan mempercepat perpindahan ion logam menuju permukaan baja, yang mendorong laju difusi Fe-Zn. Kondisi ini menyebabkan pertumbuhan lapisan galvanis berlangsung lebih cepat dan menghasilkan lapisan dengan ketebalan yang lebih besar [11]. Peningkatan nilai ACN menyebabkan proses pembersihan oksida besi pada permukaan baja berlangsung lebih efektif serta menghambat terjadinya oksidasi ulang sebelum pencelupan ke dalam seng cair. Permukaan baja yang lebih bersih dan aktif memungkinkan terjadinya kontak yang lebih baik antara baja dan seng, sehingga pembentukan lapisan intermetalik Fe-Zn dapat berlangsung lebih optimal [3].

## BAB V

### KESIMPULAN & SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, penulis mengkaji pengaruh variasi komposisi *fluxing* pada tahap *fluxing* dan temperatur pencelupan pada proses *hot dip galvanizing*. Dari kajian tersebut diperoleh hasil sebagai berikut:

1. Pada tebal lapisan terlihat pengaruh komposisi *Ammonium Chloride Number* (ACN) dan temperatur pencelupan, semakin tinggi nilai ACN dan temperatur pencelupan maka semakin tebal lapisan galvanis yang dihasilkan. Pada setiap variasi yang berbeda, sampel yang paling sesuai dengan standar yaitu pada sampel satu dengan komposisi ACN 1,5 dan temperatur pencelupan 450°C dan didapatkan ketebalan lapisan yang sesuai dengan standar yaitu 45µm.
2. Pada Hasil visual secara kasat mata terdapat adanya cacat pada lapisan galvanis seiring perubahan komposisi ACN dan temperatur pencelupan. Sampel yang memiliki visual yang rapih dan sedikit cacat yaitu pada sampel 9 dengan komposisi ACN 2,00 dan temperatur pencelupan 550°C. Hal ini berkaitan dengan komposisi *fluxing* yang dimana kadar  $ZnCl_2$  yang terlalu rendah dapat menyebabkan peningkatan jumlah *dross* selama pencelupan. Sementara itu, kadar  $NH_4Cl$  yang terlalu

rendah dapat mengakibatkan terbentuknya *black Spot* pada permukaan material

3. Pengaruh komposisi *fluxing* dalam ketahanan terhadap laju korosi yaitu semakin tinggi komposisi ACN dan temperatur pencelupan maka laju korosi akan semakin berkurang. Pada penelitian ini *corrosion rate* paling rendah yaitu pada sampel 9 komposisi ACN 2,00 dan temperatur pencelupan 550°C didapatkan *corrosion rate* sebesar 5.3009 mm/y
4. Variasi komposisi ACN dan temperatur pencelupan memengaruhi struktur mikro lapisan, di mana peningkatan keduanya menambah ketebalan lapisan, tetapi temperatur yang terlalu tinggi dapat memicu cacat mikro seperti retakan dan ketidakhomogenan
5. Komposisi ACN dan temperatur pencelupan juga memengaruhi distribusi unsur dalam lapisan, khususnya peningkatan difusi Fe ke dalam lapisan Zn pada temperatur tinggi, yang berdampak pada pembentukan fasa intermetalik dan kestabilan lapisan.

## 5.2 Saran

Penelitian ini masih memiliki keterbatasan, sehingga penulis memberikan beberapa saran untuk pengembangan penelitian selanjutnya.

1. Proses *skimming* perlu dilakukan dengan lebih teliti selama proses galvanisasi
2. Memvariasikan jenis *fluxing* yang digunakan
3. Penelitian selanjutnya dapat menambahkan variasi temperatur pencelupan *fluxing*

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] I. Gusti, A. Arwati, and F. Tifani, "Corrosion rate analysis of JIS G-3141 steel for automotive inner wheel house production using the weight loss method," *World Chemical Engineering Journal*, vol. 6, no. 1, 2022. [Online]. Available: <http://jurnal.untirta.ac.id/index.php/WCEJ>
- [2] S. Sumardi and D. Yoga, "Pengaruh variasi temperatur pencelupan terhadap sifat mekanik pada baja karbon rendah (0.02% C) dengan metode pelapisan hot-dip galvanizing," *Jurnal Rekayasa, Teknologi, dan Sains*, vol. 1, no. 1, 2017
- [3] R. N. Pamujiningtyas and D. Hardjono, "Pengaruh komposisi ammonium chloride number (ACN) dan suhu terhadap kualitas baja hasil proses fluxing," *Distilat*, vol. 2, pp. 162–169, 2021. [Online]. Available: <http://distilat.polinema.ac.id>
- [4] A. Husen and A. Fato, "Analisa sifat mekanis baja pada bahan SPCC-HD dengan proses deep curling dalam pembuatan drum," *PRESISI*, vol. 23, no. 1, 2021.
- [5] R. Candra, U. Budiarto, and H. Yudo, "Pengaruh temperatur dan tegangan listrik pada proses elektroplating lapisan seng terhadap laju korosi baja karbon rendah A36," *Jurnal Teknik Perkapalan*, 2024. [Online]. Available: <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/naval>
- [6] American Galvanizers Association, *Hot-Dip Galvanizing for Corrosion Protection*, 2012.
- [7] F. Gapsari, H. Setyarini, and F. A. Alamsyah, "Pengaruh kekasaran permukaan terhadap porositas hasil hot-dipped galvanizing (HDG)," *Jurnal Rekayasa Mesin*, vol. 3, no. 1, 2012.
- [8] Q. Liu et al., "Hot-dip galvanizing process and the influence of metallic elements on composite coatings," *Journal of Composites Science*, vol. 8, no. 5, 2024, doi: 10.3390/jcs8050160.
- [9] N. Pistofidis, G. Vourlias, S. Konidaris, E. Pavlidou, G. Stergioudis, and D. Tsipas, "The effect of preflux bath additives on the morphology and structure of the hot-dip galvanized coatings," *Crystal Research and Technology*, vol. 41, no. 8, pp. 759–765, 2006, doi: 10.1002/crat.200510664.
- [10] R. M. Woods and J. A. Cole, *Galvanizing Handbook*. Cleveland, OH, USA: Zaclon Inc., 1996.

- [11] M. Nugroho and M. Arya, "Pengaruh waktu dan temperatur hot-dip galvanizing terhadap ketebalan dan kekuatan bending pada baja ST 41," *Jurnal Teknik Mesin*, vol. 8, no. 1, 2020.
- [12] ASTM International, *ASTM A123: Specification for Zinc (Hot-Dip Galvanized) Coatings on Iron and Steel Products*. West Conshohocken, PA, USA, 2002.
- [13] B. Agustami, "Pengaruh variasi komposisi fluxing dan waktu celup terhadap nilai laju korosi, tebal lapisan, dan struktur mikro hot-dip galvanizing baja karbon rendah SSPC-SD," Skripsi, Fakultas Teknik, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa, Cilegon, 2013.
- [14] F. Alif, "Analisa hipotesa menggunakan perangkat lunak dari hasil pengujian polarisasi pada material implan tulang dengan variasi lapisan permukaan," Skripsi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2020.
- [15] Munawir, Azwar, and Turmizi, "Analisa kegagalan poros pompa sentrifugal Ebara tipe 56-GA 4002 A melalui evaluasi pola patahan serta pengujian kekerasan dan metalografi," *Jurnal Mesin Sains Terapan*, vol. 3, no. 2, 2019.
- [16] D. Juliaptini, "Analisis sifat mekanik dan metalografi baja karbon rendah untuk aplikasi tabung gas 3 kg," Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Syarif Hidayatullah, Jakarta, 2010.
- [17] Z. Takáčová, B. Hluchánová, and J. Trpčevská, "Leaching of zinc from zinc ash originating from hot-dip galvanizing," *Metall*, vol. 64, no. 12, p. 600, 2010.
- [18] J. Jarwanto, A. B. M. Yusuf, and A. Suprihanto, "Pengaruh variasi waktu pencelupan hot-dip galvanizing terhadap ketebalan dan kekerasan lapisan baja ST 60," *Jurnal Teknik Mesin*, vol. 11, no. 3, pp. 247–260, 2023.
- [19] R. H. Eleue and B. S. Mahdi, "Effect of dipping time and temperature on produced intermetallic phases thickness in hot-dip galvanizing process," *Al-Muhandis Journal (JMISE)*, p. 50, 2018.
- [20] G. Vourlias et al., "Inhibition effect of chloride layers in hot-dip galvanized steels," *Journal of Materials Science Letters*, vol. 20, no. 8, pp. 729–731, 2001. [21] Marder, Arnold Robert. "The metallurgy of zinc-coated steel." *Progress in materials science* 45.3 (2000): 191-271.

**LAMPIRAN A**  
**CONTOH PERHITUNGAN**

**Contoh Perhitungan Pe,buatan Larutan *Fluxing***

$$\begin{aligned} \text{Wt\% ZAC} &= \frac{\text{Massa ZAC}}{\text{Massa total larutan}} \times 1000 \\ &= \frac{20}{100} \times 1000 \\ &= 200 \text{ gr} \end{aligned}$$

ORIGINALITY REPORT

<b>16%</b> SIMILARITY INDEX	<b>15%</b> INTERNET SOURCES	<b>3%</b> PUBLICATIONS	<b>7%</b> STUDENT PAPERS
--------------------------------	--------------------------------	---------------------------	-----------------------------

PRIMARY SOURCES

<b>1</b>	<b>eprints.untirta.ac.id</b> Internet Source	<b>3%</b>
<b>2</b>	<b>docplayer.info</b> Internet Source	<b>1%</b>
<b>3</b>	<b>www.scribd.com</b> Internet Source	<b>1%</b>
<b>4</b>	<b>pt.scribd.com</b> Internet Source	<b>1%</b>
<b>5</b>	<b>Submitted to Universitas Sultan Ageng Tirtayasa</b> Student Paper	<b>1%</b>
<b>6</b>	<b>es.scribd.com</b> Internet Source	<b>1%</b>
<b>7</b>	<b>Submitted to Universitas Gadjah Mada</b> Student Paper	<b>1%</b>
<b>8</b>	<b>ejournalmalahayati.ac.id</b> Internet Source	<b>1%</b>
<b>9</b>	<b>jurnal.polinema.ac.id</b> Internet Source	<b>&lt;1%</b>
<b>10</b>	<b>pdfcoffee.com</b> Internet Source	<b>&lt;1%</b>
<b>11</b>	<b>Submitted to Politeknik Negeri Bandung</b> Student Paper	<b>&lt;1%</b>

12	<a href="http://repository.its.ac.id">repository.its.ac.id</a> Internet Source	<1 %
13	<a href="http://text-id.123dok.com">text-id.123dok.com</a> Internet Source	<1 %
14	<a href="http://metalurgi.untirta.ac.id">metalurgi.untirta.ac.id</a> Internet Source	<1 %
15	<a href="http://123dok.com">123dok.com</a> Internet Source	<1 %
16	Submitted to Universitas Respati Indonesia Student Paper	<1 %
17	Submitted to Binus University International Student Paper	<1 %
18	<a href="http://www.sangchareongroup.com">www.sangchareongroup.com</a> Internet Source	<1 %
19	Submitted to Universitas Pertamina Student Paper	<1 %
20	<a href="http://html.pdfcookie.com">html.pdfcookie.com</a> Internet Source	<1 %
21	<a href="http://ejournal.unesa.ac.id">ejournal.unesa.ac.id</a> Internet Source	<1 %
22	<a href="http://edoc.tips">edoc.tips</a> Internet Source	<1 %
23	<a href="http://repository.unmuhpnk.ac.id">repository.unmuhpnk.ac.id</a> Internet Source	<1 %
24	<a href="http://repositori.usu.ac.id">repositori.usu.ac.id</a> Internet Source	<1 %
25	<a href="http://repository.unhas.ac.id">repository.unhas.ac.id</a> Internet Source	<1 %

26	<a href="http://adoc.pub">adoc.pub</a> Internet Source	<1 %
27	<a href="http://e-jurnal.pnl.ac.id">e-jurnal.pnl.ac.id</a> Internet Source	<1 %
28	<a href="http://journal.eng.unila.ac.id">journal.eng.unila.ac.id</a> Internet Source	<1 %
29	<a href="http://repository.polman-babel.ac.id">repository.polman-babel.ac.id</a> Internet Source	<1 %
30	<a href="http://ejournal3.undip.ac.id">ejournal3.undip.ac.id</a> Internet Source	<1 %
31	<a href="http://journal.unifa.ac.id">journal.unifa.ac.id</a> Internet Source	<1 %
32	<a href="http://jrk.fmipa.unand.ac.id">jrk.fmipa.unand.ac.id</a> Internet Source	<1 %
33	Submitted to LL Dikti IX Turnitin Consortium Student Paper	<1 %
34	Submitted to Universitas Bengkulu Student Paper	<1 %
35	Submitted to Universitas PGRI Palembang Student Paper	<1 %
36	Submitted to Institut Teknologi Kalimantan Student Paper	<1 %
37	Submitted to Universitas Brawijaya Student Paper	<1 %
38	<a href="http://core.ac.uk">core.ac.uk</a> Internet Source	<1 %
39	<a href="http://library.universitaspertamina.ac.id">library.universitaspertamina.ac.id</a> Internet Source	<1 %

40	<a href="http://repo.bunghatta.ac.id">repo.bunghatta.ac.id</a> Internet Source	<1 %
41	<a href="http://repository.uinsu.ac.id">repository.uinsu.ac.id</a> Internet Source	<1 %
42	Submitted to Sriwijaya University Student Paper	<1 %
43	Submitted to Universitas Negeri Surabaya The State University of Surabaya Student Paper	<1 %
44	<a href="http://seca.doe.gov">seca.doe.gov</a> Internet Source	<1 %
45	Submitted to Universitas Tadulako Student Paper	<1 %
46	<a href="http://ejurnal.stmik-budidarma.ac.id">ejurnal.stmik-budidarma.ac.id</a> Internet Source	<1 %
47	<a href="http://journal.umpo.ac.id">journal.umpo.ac.id</a> Internet Source	<1 %
48	<a href="http://lib.unnes.ac.id">lib.unnes.ac.id</a> Internet Source	<1 %
49	<a href="http://library.binus.ac.id">library.binus.ac.id</a> Internet Source	<1 %
50	<a href="http://www.bondigalva.co.id">www.bondigalva.co.id</a> Internet Source	<1 %
51	<a href="http://kopijati.blogspot.com">kopijati.blogspot.com</a> Internet Source	<1 %
52	<a href="http://repositori.widyagamahusada.ac.id">repositori.widyagamahusada.ac.id</a> Internet Source	<1 %
53	<a href="http://de.scribd.com">de.scribd.com</a> Internet Source	<1 %

54	<a href="http://infosepeda.net">infosepeda.net</a> Internet Source	<1%
55	<a href="http://repository.gunadarma.ac.id">repository.gunadarma.ac.id</a> Internet Source	<1%
56	<a href="http://www.angelfire.com">www.angelfire.com</a> Internet Source	<1%
57	<a href="http://www.mdpi.com">www.mdpi.com</a> Internet Source	<1%
58	<a href="http://docobook.com">docobook.com</a> Internet Source	<1%
59	<a href="http://id.wikipedia.org">id.wikipedia.org</a> Internet Source	<1%
60	<a href="http://medium.com">medium.com</a> Internet Source	<1%

Exclude quotes Off

Exclude matches Off

Exclude bibliography On