

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Baja

Baja merupakan logam paduan dengan besi sebagai unsur utama dan karbon sebagai unsur paduan 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. 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 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. 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, 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 [10] :

- 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. 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 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 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 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 baja karbon rendah yang memiliki kandungan karbon sekitar 0.12%. Baja ini diproses menggunakan metode *cold rolling*, yaitu proses pengerolan material yang dilakukan pada temperatur di bawah temperatur rekristalisasi. 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 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 [10].

Tabel 2.1 Komposisi Kimia Baja JIS G 3141 [10]

Kandungan Unsur (%)								
Fe	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

Standar JIS G 3141 menetapkan spesifikasi untuk pelat baja karbon hasil pengerolan dingin (*cold reduced steel sheet*) dan strip baja karbon hasil pengerolan dingin (*cold reduced steel strip*) dengan lebar minimum 30 mm. Dalam standar ini, strip baja hasil pengerolan dingin yang diproduksi dalam bentuk gulungan, termasuk yang memiliki lebar kurang dari 600 mm, serta pelat baja yang diperoleh

dari pemotongan strip baja hasil pengerolan dingin dalam bentuk gulungan, dikategorikan sebagai pelat dan strip baja yang tercakup dalam ruang lingkup standar tersebut. Baja hasil pengerolan dingin ini dirancang untuk aplikasi yang memerlukan ketelitian dimensi, kualitas permukaan yang baik, serta sifat mampu bentuk yang memadai. Berdasarkan standar JIS G 3141, *cold reduced steel* diklasifikasikan ke dalam beberapa *grade* sesuai dengan tingkat kemampuan deformasinya, yaitu sebagai berikut [11] :

Tabel 2.2 Klasifikasi JIS G 3141 [11]

<i>Symbols of Grade</i>	<i>Applicable Thickness</i> (mm)	<i>Application</i> (Informative)
SPCC	0.10 – 3.2	<i>For commercial</i>
SPCD	0.15 – 3.2	<i>For drawing</i>
SPCE	0.15 – 3.2	<i>For deep drawing</i>
SPCF	0.40 – 3.2	<i>For non-aging deep drawing</i>
SPCG	0.40 – 3.2	<i>For non-aging extra deep drawing</i>

2.3 Lapisan Seng (Zn)

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* [12]. 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 [7].

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 Hot Dip Galvanizing

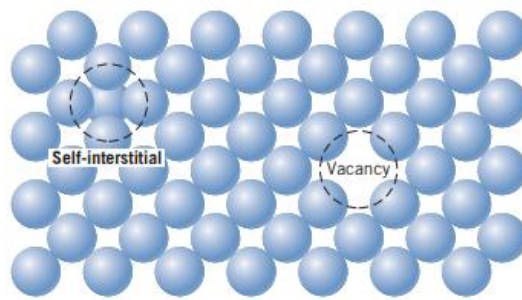
Hot dip galvanizing merupakan proses pelapisan logam dengan cara mencelupkan logam dasar ke dalam seng cair yang telah dipanaskan hingga meleleh. Saat logam dasar dicelupkan ke dalam bak berisi seng cair, terjadi reaksi metalurgi antara seng dan logam dasar, membentuk lapisan pelindung yang terdiri dari 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 [3].

Pada proses *hot-dip galvanizing*, interaksi antara logam seng cair dan spesimen baja menghasilkan lapisan intermetalik Fe–Zn pada antarmuka baja dan seng. Lapisan intermetalik ini terbentuk melalui mekanisme difusi atom, yaitu proses perpindahan atom besi dan seng yang saling berdifusi selama pencelupan berlangsung. Secara atomik, difusi didefinisikan sebagai perpindahan atom dari satu posisi kisi kristal ke posisi kisi kristal lainnya. Dalam material padat, atom tidak berada dalam kondisi statis, melainkan selalu mengalami gerakan termal yang memungkinkan terjadinya perpindahan posisi atomik [13]. Terjadinya proses difusi memerlukan beberapa kondisi dasar, antara lain adanya kekosongan atom (*vacancy*) di dalam struktur kristal serta energi yang cukup bagi atom untuk memutus ikatan dengan atom tetangganya [14]. Selama perpindahan tersebut, atom yang berdifusi menyebabkan distorsi sementara pada kisi kristal. Energi yang diperlukan untuk difusi umumnya meningkat seiring dengan kuatnya ikatan atom dan menurun dengan meningkatnya temperatur, sehingga proses difusi berlangsung lebih intensif pada suhu tinggi, seperti pada proses galvanisasi panas [13].

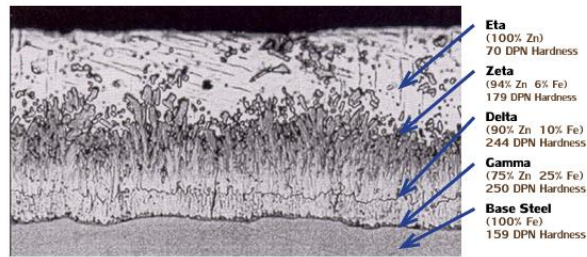
Secara umum, terdapat dua mekanisme utama difusi pada logam, yaitu difusi vakansi (*vacancy diffusion*) dan difusi interstisial (*interstitial diffusion*). Difusi vakansi merupakan mekanisme difusi yang terjadi akibat adanya kekosongan atom dalam kisi kristal, sehingga atom-atom di sekitarnya berpindah untuk menempati posisi kosong tersebut. Keberadaan vakansi menjadi syarat utama terjadinya difusi jenis ini, di mana laju difusi sangat dipengaruhi oleh jumlah cacat

vakansi yang tersedia. Pada temperatur tinggi, konsentrasi vakansi dalam logam meningkat secara signifikan, sehingga mempercepat proses difusi. Perpindahan atom melalui mekanisme ini terjadi sebagai hasil pertukaran posisi antara atom dan vakansi, sehingga arah migrasi atom berlawanan dengan arah pergerakan vakansi. Mekanisme difusi vakansi memungkinkan terjadinya difusi diri (*self-diffusion*) maupun difusi antar unsur (*interdiffusion*) dalam material logam [14].



Gambar 2.2 Representasi Difusi Vakansi dan Difusi Interstisial [14]

Sementara itu, difusi interstisial melibatkan perpindahan atom-atom berukuran kecil yang bermigrasi melalui posisi interstisial dalam kisi kristal menuju posisi interstisial kosong atau vakansi. Mekanisme ini umumnya terjadi pada unsur-unsur seperti hidrogen, karbon, nitrogen, dan oksigen yang memiliki ukuran atom cukup kecil untuk menempati celah interstisial. Pada sebagian besar paduan logam, laju difusi interstisial jauh lebih cepat dibandingkan difusi vakansi karena atom-atom interstisial memiliki mobilitas yang lebih tinggi dan menghadapi hambatan energi yang lebih rendah. Selain itu, jumlah posisi interstisial yang tersedia dalam kisi kristal umumnya lebih banyak dibandingkan jumlah vakansi, sehingga peluang terjadinya perpindahan atom melalui mekanisme interstisial menjadi lebih besar [14].



Gambar 2.3 Struktur Mikro Lapisan Galvanis [3]

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 (η) yang berada tepat di atas permukaan baja lebih murni dan lunak, sedangkan lapisan gamma (γ) yang berada paling bawah mengandung campuran seng dan besi tertinggi, menjadikannya yang paling keras dan kuat di antara lapisan lainnya [3]. Nilai kekerasan, titik lebur, dan sifat mekanik pada fasa eta (η), zeta (ζ), delta (δ), dan gamma (γ) berbeda-beda yang dapat dilihat pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Sifat lapisan paduan Fe-Zn pada proses *Hot Dip Galvanizing* [3]

Fase	Paduan	Komposisi (%Fe)	Titik Lebur (°C)	VHN	Sifat Mekanik
Eta	Zn	0,03	419	70-72	Lunak dan ulet
Zeta	FeZn_{13}	5,7-6,3	530	175-185	Keras dan getas

Tabel 2.3 (Lanjutan)

Fase	Paduan	Komposisi (%Fe)	Titik Lebur (°C)	VHN	Sifat Mekanik
Delta	FeZn ₇	7,0-11	530-670	240-300	Ulet
Gamma	Fe ₃ Zn ₁₀	20-27	670-780		Tipis, keras dan getas
<i>Base Steel</i>	Fe	98-99	1530	150-175	Ulet

Reaksi antara besi (Fe) dan seng cair (Zn) terbentuk empat fasa intermetalik yaitu fasa eta (η), zeta (ζ), delta (δ), dan gamma (γ) seperti yang dapat dilihat pada Gambar 2.3. Masing-masing fasa ini memiliki struktur kristal dan karakteristik yang berbeda yaitu sebagai berikut [15].

1. Fasa eta (η)

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 (ζ)

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 (δ)

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 (γ)

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 (δ) terbentuk melalui transformasi dari fasa zeta (ζ) serta fasa gamma (γ), yang merupakan hasil reaksi peritektik antara besi padat dan seng cair. Sementara itu, fasa eta (η) terbentuk karena adanya seng murni yang melekat pada permukaan benda kerja saat diangkat dari bak galvanisasi [15]. 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* [3].

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. 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 [16]. 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 [3].

2.4.1.2 Pickling

Pickling merupakan tahap penting dalam proses *pre-treatment* sebelum proses galvanisasi untuk menghilangkan karat dan lapisan oksida seperti Fe_2O_3 , FeO , dan Fe_3O_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 H_2SO_4 dengan konsentrasi 10%-15% selama 15-20 menit [3]. Konsentrasi asam, kadar besi, dan sirkulasi atau pengadukan larutan asam memengaruhi efektivitas proses *pickling*. Perbedaan HCl dan H_2SO_4 dalam proses *pickling* ditunjukkan pada Tabel 2.4.

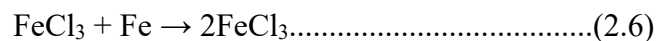
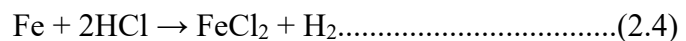
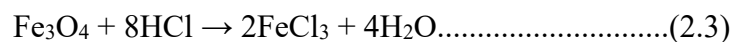
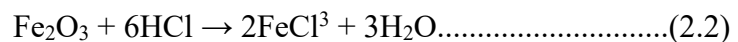
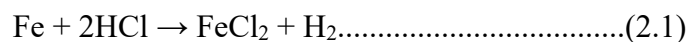
Tabel 2.4 Perbedaan *Pickling* antara HCl dengan H_2SO_4

Keterangan	H_2SO_4	HCl
Biaya	Murah	Lebih mahal
Temperatur optimal	65-80°C	20-35°C
Laju <i>pickling</i>	Rendah	Tinggi
Kondisi lapangan	Stabil, tidak berbau	Berasap dan berbau

Tabel 2.4 (Lanjutan)

Keterangan	H ₂ SO ₄	HCl
Pencemaran lingkungan	Rendah	Tinggi
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 (H₂). 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 [3].



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* [16]. 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_2SO_4 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 [3].

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 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 [3]. 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 [15]. 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 [17].

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 :

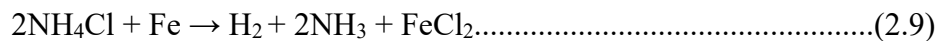
$$\text{Ammonium Chloride Number (ACN)} = \frac{\text{weight \% of ammonium chloride}}{\text{weight \% of zinc chloride}} \dots\dots(2.7)$$

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 *bare spot* pada permukaan material setelah proses galvanisasi selesai [9]. Jika konsentrasi NH_4Cl dalam *flux* lebih rendah, ini juga akan mengurangi ketebalan lapisan galvanis. Kondisi ini sangat cocok untuk industri lembaran baja galvanis. Dalam praktik industri galvanisasi, rasio ACN yang umum digunakan berada pada rentang 1,25 hingga 2,5. Selama proses *fluxing* terdapat reaksi kimia yang terjadi yaitu sebagai berikut [8].

1. Reaksi *flux* dengan oksida besi



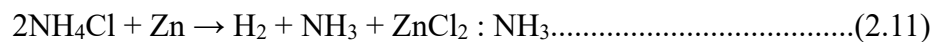
2. Reaksi *flux* dengan baja (*base metal*)



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



4. Reaksi *flux* dengan *zinc*



Reaksi (2.8), (2.9), (2.10), dan (2.11) yang menghasilkan amonia dan hidrogen tidak menimbulkan pelepasan gas berbahaya, karena *molten zinc* dan ZnCl_2 bereaksi dengan sangat cepat untuk menghambat pelepasan amonia dan hidrogen ke lingkungan. Reaksi (2.8) dan (2.9), yang melibatkan reaksi antara *flux* dan oksida, dapat mengakibatkan larutan di dalam bak berubah warna menjadi jingga kecokelatan. Perubahan warna ini terjadi akibat pembentukan FeCl_2 selama proses *fluxing* berlangsung berulang kali. Seiring dengan meningkatnya konsentrasi FeCl_2 , senyawa ini cenderung menempel pada permukaan baja (logam dasar) dan terbawa saat perendaman ke dalam *zinc* cair. Kemudian, FeCl_2 akan bereaksi membentuk *dross* melalui reaksi berikut [8].



2.4.3 *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 [3].

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 [3]. 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 [15]. 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 [18]. Dalam proses *hot-dip galvanizing* pada temperatur 450–550 °C, peningkatan temperatur menyebabkan lapisan galvanis menjadi lebih tebal. Pada rentang temperatur ini, pertumbuhan lapisan intermetalik berlangsung secara stabil dan menghasilkan ketebalan maksimum lapisan galvanis. Namun, ketika temperatur dinaikkan di atas 550 °C, terjadi penurunan ketebalan lapisan galvanis. Pada temperatur tinggi (≥ 550 °C), fasa intermetalik seperti zeta (ζ) dan delta (δ) berada pada kondisi semi-padat sesuai dengan diagram kesetimbangan Fe–Zn. Dalam kondisi ini, sebagian fasa intermetalik dapat tertinggal di dalam bak seng saat spesimen ditarik keluar, sehingga terjadi kehilangan lapisan pelapis. Selain itu, pada temperatur tinggi, seng cair memiliki kemampuan yang lebih besar untuk melarutkan kembali fasa-fasa intermetalik yang telah terbentuk melalui batas butir, yang menyebabkan lapisan intermetalik menjadi lebih tipis, terfragmentasi, dan kurang stabil. Akibatnya, ketebalan total lapisan galvanis menurun pada temperatur di atas 550 °C [19]. Rata-rata ketebalan minimum lapisan berdasarkan kategori material sesuai standar ASTM A123 dapat dilihat pada Tabel 2.5

Tabel 2.5 *Grade* Ketebalan Lapisan Berdasarkan Kategori Material Sesuai Standar ASTM A123 [6]

<i>Material category</i>	<i>All Specimens Tested</i>				
	<i>Steel Thickness Range (mm)</i>				
	<1.6	1.6 - 3.2	3.2 – 4.8	4.8 – 6.4	≥ 6.4
<i>Structural Shapes and Plate</i>	45	65	75	85	100
<i>Strip and Bar</i>	45	65	75	85	100
<i>Pipe and Tubing</i>	45	45	75	75	75
<i>Wire</i>	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 [3]. 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 μm) 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, ada tiga faktor penting yang harus diperhatikan yaitu sebagai berikut [20].

1. Konsentrasi *sodium 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 (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 [15].

2.5 Pemeriksaan Hasil *Hot Dip Galvanizing*

Standar pemeriksaan *hot dip galvanizing* diterapkan untuk menilai hasil galvanisasi secara visual. Secara umum, lapisan galvanis yang dihasilkan sebaiknya memiliki permukaan yang rata, sementara variasi warna yang muncul tidak

mempengaruhi ketahanan terhadap korosi. Beberapa aspek yang diperiksa secara visual pada lapisan galvanis antara lain [21] :

1. *Dull grey* muncul akibat kandungan *silicon* yang relatif tinggi pada baja, yang merangsang pertumbuhan paduan Fe-Zn yang reaktif selama proses hot dip. Biasanya, lapisan dengan tampilan *dull grey* memiliki ketebalan lebih dari normal sehingga memberikan proteksi korosi yang lebih baik. Munculnya *dull grey* atau *dark grey* juga dipengaruhi oleh perbedaan laju pendinginan pada permukaan material, terutama pada material besar atau tebal antara pinggir dan tengah. Tampilan ini akan memudar seiring waktu dan tidak menjadi alasan untuk *reject*



Gambar 2.4 *Dull Grey* [21]

2. *Rust stain* dan *weld seepage* muncul sebagai noda karat kemerahan pada permukaan galvanis. Noda ini dapat berasal dari kontak permukaan galvanis dengan besi berkarat atau serbuk besi dari proses gerinda, serta cairan karat akibat hujan. Celah pada pengelasan yang tidak sempurna, area *intermittent welding*, atau *overlap* dapat menahan cairan *quenching* yang kemudian mengalir keluar membawa kontaminasi karat, dikenal sebagai *weld seepage*. Noda karat ini hanya bersifat estetika dan harus dibersihkan sebelum diserahkan.



Gambar 2.5 *Rust stain* [21]

3. *Blister* merupakan gelembung pada lapisan galvanis yang membentuk ruang kosong, disebabkan oleh hidrogen yang diserap material selama proses *pickling* atau fabrikasi sebelumnya. Hidrogen terdorong keluar saat proses *dipping* sehingga mendorong lapisan galvanis membentuk *blister*. *Blister* kecil seperti bintik jerawat tidak memengaruhi proteksi galvanis dan tidak perlu diperbaiki, tetapi *blister* yang lebih besar berpotensi pecah akibat *handling* dan meninggalkan area tidak terlindungi, sehingga harus diperbaiki sesuai standar.



Gambar 2.6 *Blister* [21]

4. *Roughness* dan *thick coating*, yaitu lapisan galvanis yang kasar, tebal, dan tidak rata, terjadi karena permukaan material yang tidak halus (misal karat parah), komposisi *silicon* dan *phosphor* yang tinggi, proses *pickling*

berlebihan, waktu *dipping* terlalu lama, atau temperatur ketel yang tinggi. Lapisan kasar dan tebal ini mengikuti kontur permukaan material, memberikan proteksi korosi lebih baik, dan tidak menjadi alasan untuk *reject*.



Gambar 2.7 *Roughness and thick coating* [21]

5. *Lumps* adalah gumpalan *zinc* yang terbentuk pada permukaan material dan dikategorikan sebagai *accepted* atau perlu diperbaiki. Saat material diangkat dari ketel, cairan *zinc* akan mengalir kembali ke dalam ketel, namun jika aliran lambat akibat drainase yang kurang memadai atau pengangkatan yang terlalu lambat, sebagian cairan *zinc* dapat membeku di permukaan, terutama pada ujung atau sisi material. *Lumps* yang mengganggu penggunaan akhir, misalnya saat dibutuhkan permukaan yang rata, harus dibersihkan dengan hati-hati agar lapisan galvanis yang sebenarnya tidak rusak.



Gambar 2.8 *Roughness and thick coating* [21]

6. *Dross* adalah paduan *zinc* (Zn) dengan partikel besi (Fe) yang terlepas dari material selama proses pencelupan dan mengendap di dasar ketel. Jika selama pencelupan terjadi pengadukan cairan *zinc* atau material menyentuh lapisan *dross* di dasar ketel, partikel-partikel tersebut dapat terangkat dan terperangkap pada lapisan galvanis. *Dross* yang menempel dalam bentuk butiran kecil, dikenal sebagai *dross pimples*, tidak memerlukan perbaikan. Sementara *dross* yang menempel dalam bentuk deposit tebal, disebut *gross dross*, harus dibersihkan dan diperbaiki karena bersifat rapuh, mudah pecah, dan dapat meninggalkan area permukaan yang tidak terlapisi.



Gambar 2.9 *Dross* [21]

7. *Bare spot* adalah area pada permukaan material yang tidak tertutup lapisan galvanis dan dikategorikan sebagai *reject* atau memerlukan perbaikan. Kondisi ini dapat terjadi akibat hilangnya lapisan *fluxing* karena jeda waktu yang terlalu lama sebelum *hot dipping* atau pemanasan awal material yang berlebihan. Persiapan permukaan yang tidak memadai, seperti adanya cat, *varnish*, oli, stiker, tulisan spidol *non-water based*, *mill scale*, atau karat yang tersisa setelah *pickling*, juga dapat menyebabkan *bare spot*. Faktor lain termasuk konsentrasi aluminium yang tinggi di ketel (*black spot*), kerak las

yang tidak dibersihkan sempurna sehingga menghalangi reaksi galvanis, *blowouts* dari cairan *pretreatment* yang terperangkap di celah material, serta *touch mark* akibat kontak antar permukaan material atau dengan alat penggantung selama proses galvanis. *Bare spot* harus diperbaiki sesuai standar yang berlaku, dan jika luasannya melebihi batas standar, material harus digalvanis ulang.



Gambar 2.10 *Bare Spot* [21]

8. *Spike* atau *sharp point* adalah tetesan galvanis yang membeku dan menempel di sepanjang sisi atau ujung material, juga dikenal sebagai “jaruman”. Mirip dengan *lumps*, cairan galvanis kembali mengalir ke ketel saat material diangkat, namun sebagian dapat membeku di sisi atau ujung material. Penyapuan (*skimming*) sepanjang sisi dapat mengurangi terbentuknya *spike*. Demi keselamatan saat *handling* karena bentuknya yang tajam, *spike* harus dibersihkan.



Gambar 2.7 *Spike* [21]

2.6 Polarisasi Potensiodynamik

Polarisasi potensiodynamik 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 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 laju korosi dan arus korosi (I_{corr}) melalui pendekatan matematis yaitu sebagai berikut [22].

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

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

Keterangan :

I_{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 ekivalen logam (g/mol.ekivalen)

P = Masa jenis logam (g/cm^3)

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 (β_a) dan katodik (β_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, β_a dan β_c menggambarkan kecenderungan logam dalam bereaksi sebagai anoda atau katoda [22].

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 [22].

2.7 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. 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 logam memiliki sifat yang berbeda-beda tergantung pada struktur mikro yang dimilikinya. 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 logam atau paduan logam tersebut, serta proses yang telah dialaminya [23]

Untuk mengamati struktur mikro yang terbentuk pada logam, penggunaan mikroskop optik biasanya menjadi metode yang umum digunakan. Sebelum benda uji diamati menggunakan mikroskop optik, benda uji tersebut harus melewati tahapan preparasi. Tahapan ini bertujuan untuk memastikan bahwa 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 [24].

a. *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* [24].

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 ketidakraturan 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 [24].

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 dilakukan dengan menggunakan kertas amplas silikon karbida (SiC) dengan berbagai tingkat kekasaran yang dinyatakan dalam ukuran mesh, seperti 220#, 330#, 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° atau 90° terhadap arah sebelumnya [24].

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 ketidakrataan 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 [24].

e. *Etching* (Etsa)

Etsa adalah proses yang digunakan untuk mengikis batas butir secara selektif dan terkendali dengan mencelupkan sampel ke dalam larutan pengetsa, 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 pengetsa yang sesuai. Metode etsa dibagi menjadi dua yaitu etsa kimia dan etsa elektrolitik. Etsa kimia adalah metode pengetsaan yang menggunakan larutan kimia. Zat-zat pengetsa yang digunakan memiliki karakteristik khusus, sehingga pemilihan zat pengetsa disesuaikan dengan jenis sampel yang akan diamati. Contoh zat pengetsa yang umum digunakan antara lain adalah *nitrit acid* atau nital (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 tegangan arus, kuat listrik, dan waktu pengetsaan. Etsa elektrolitik umumnya digunakan khusus untuk stainless steel, karena sulit mendapatkan detail struktur dengan metode etsa kimia [24].

2.7 SEM-EDX

SEM–EDX (*Scanning Electron Microscope–Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy*) merupakan metode yang широко digunakan untuk pengamatan morfologi permukaan, struktur mikro, serta pemetaan kandungan unsur pada berbagai jenis sampel, mulai dari bahan alam, organik, anorganik, polimer, logam, hingga sampel biologi [25]. Metode ini bekerja dengan memanfaatkan berkas elektron berenergi tinggi yang dipindai (*scanning*) pada permukaan spesimen, sehingga menghasilkan citra mikrostruktur sekaligus informasi komposisi kimia berdasarkan sinar-X karakteristik yang dihasilkan dari interaksi antara berkas elektron dan material.

Berkas elektron yang digunakan dalam SEM memiliki panjang gelombang yang jauh lebih pendek dibandingkan panjang gelombang cahaya tampak, sehingga citra yang dihasilkan memiliki resolusi dan tingkat detail yang jauh lebih tinggi dibandingkan mikroskop optik [26]. Keunggulan ini memungkinkan SEM–EDX menghasilkan citra dengan efek tiga dimensi, perbesaran tinggi, serta kedalaman fokus (*depth of field*) yang besar, sehingga sangat unggul untuk karakterisasi topografi permukaan dan struktur mikro material.

Secara historis, pengembangan SEM berawal dari karya Cosslett dan Duncumb (1956) yang merancang dan membangun *scanning electron probe*

microanalyzer pertama di Cavendish Laboratories, Cambridge, Inggris. Berbeda dengan mikroprobe elektron sebelumnya yang menggunakan berkas elektron statis, mereka memperkenalkan konsep pemindaian berkas elektron dalam pola raster, sebagaimana yang digunakan pada SEM modern. Konsep pemindaian ini menjadi tonggak penting dalam pengembangan teknik analisis mikrostruktur dan komposisi material [27].

Pada tahap awal, SEM dan EPMA (*Electron Probe Microanalyzer*) dianggap sebagai instrumen yang terpisah. Namun dalam perkembangannya, EPMA kini dipandang sebagai SEM yang dilengkapi secara khusus dengan sistem optik cahaya serta satu atau lebih spektrometer dispersi panjang gelombang (*wavelength-dispersive spectrometers*, WDS). Integrasi kemampuan analisis sinar-X semakin berkembang dengan penambahan sistem *energy-dispersive X-ray* (EDX) pada SEM, yang memungkinkan pengukuran sinar-X karakteristik yang dihasilkan akibat interaksi berkas elektron dengan material [27].

Sistem EDX pada SEM memungkinkan deteksi sinar-X karakteristik dari hampir semua unsur dengan nomor atom lebih besar dari 4, sehingga sebagian besar SEM modern saat ini telah dilengkapi dengan sistem SEM–EDX. Teknik SEM–EDX menyediakan metode yang cepat dan efisien untuk mengevaluasi komposisi unsur suatu sampel, baik secara kualitatif maupun kuantitatif [27]

Dalam SEM yang dilengkapi dengan sistem EDX dan WDS, EDX umumnya digunakan untuk analisis cepat unsur mayor, sedangkan WDS digunakan untuk analisis unsur minor hingga jejak (*trace elements*) dengan sensitivitas dan resolusi energi yang lebih tinggi. Selain itu, SEM–EDX juga memungkinkan

pemetaan komposisi (*elemental mapping*), sehingga distribusi unsur dalam berbagai fasa mikrostruktur dapat divisualisasikan secara langsung. Kemampuan ini sangat penting dalam karakterisasi material, identifikasi fasa, serta analisis segregasi unsur dalam sistem metalurgi dan ilmu material [27].

Perkembangan teknologi detektor modern, seperti silicon drift detector (SDD), telah meningkatkan kecepatan akuisisi data, resolusi energi, serta akurasi analisis SEM–EDX secara signifikan. Hal ini memungkinkan analisis komposisi yang lebih andal dengan resolusi spasial hingga orde mikrometer, serta meningkatkan kemampuan SEM sebagai alat karakterisasi material yang terintegrasi antara pencitraan dan analisis kimia [27].

Dengan kombinasi kemampuan pencitraan resolusi tinggi, analisis unsur berbasis EDX, serta pemetaan komposisi, SEM–EDX menjadi instrumen yang sangat serbaguna untuk karakterisasi topografi, mikrostruktur, dan komposisi kimia material pada skala mikro hingga nano. Oleh karena itu, SEM–EDX digunakan dalam bidang metalurgi, ilmu material, elektronik, geologi, serta berbagai aplikasi penelitian dan industri [27].