

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Definisi Korosi

Korosi sering diidentifikasi oleh orang awam sebagai karat, yang merupakan istilah khusus untuk korosi yang terjadi pada baja. Namun, korosi adalah gejala destruktif yang mempengaruhi hampir semua logam. Besi (Fe) adalah logam yang paling banyak digunakan oleh manusia, sehingga tidak mengherankan jika karat dan korosi dianggap sebagai istilah yang serupa [14].

Kerusakan spontan pada material, khususnya logam dan paduannya, dikenal sebagai korosi. Penyebab kerusakan ini adalah reaksi kimia, biokimia, dan elektrokimia yang terjadi antara logam dan lingkungan korosifnya. Faktor-faktor yang membentuk lingkungan korosif meliputi kelembaban, oksigen, larutan asam organik dan anorganik, tekanan tinggi, suhu, dan keberadaan klorida. Saat korosi terjadi, logam akan mengalami transformasi menjadi bentuk yang lebih stabil secara termodinamika seperti oksida, hidroksida, garam, atau karbonat [1].

Korosi bisa didefinisikan sebagai degradasi logam yang disebabkan oleh interaksi kimia atau elektrokimia dengan lingkungannya. Korosi memiliki dampak besar dalam sektor industri. Secara ekonomi, korosi menimbulkan biaya langsung, seperti penggantian bagian atau struktur yang rusak, serta dampak tidak langsung seperti penurunan efisiensi produksi, kontaminasi produk industri, dan bahkan penghentian proses produksi [15]. Terdapat beberapa komponen utama yang wajib ada agar proses terbentuknya korosi dapat terjadi, komponen-komponen tersebut antara lain [16]:

1. Anoda

Merupakan elektroda logam bermuatan sel negatif. Korosi logam umumnya terjadi pada anoda. Pada anoda, terjadi reaksi oksidasi di mana logam atau zat anoda melepaskan elektron sebagai bagian dari proses reaksi kimia atau elektrokimia yang terjadi.

2. Katoda

Merupakan elektroda logam bermuatan sel positif. Reaksi reduksi terjadi di katoda yang menangkap elektron dari anoda dan material logam tidak akan mengalami korosi karena mengkonsumsi elektron dari anoda yang mempertebal permukaan logam.

3. Elektrolit

Merupakan larutan penghantar listrik berada diantara elektroda positif dan negatif. Elektrolit menghantarkan listrik karena adanya ion-ion yang mampu menghantarkan gaya ekuivalen elektron sehingga terjadi reaksi redoks. Selain itu, elektrolit sebagai penghubung kontak listrik antara anoda dan katoda. Apabila kandungan ion dalam elektrolit semakin banyak maka proses penghantaran listrik semakin cepat.

4. Konduktor atau *Metallic Path*

Metallic path merupakan media yang mengalirkan elektron dari anoda ke katoda, sehingga arus dalam sel korosi dapat mengalir. Pada umumnya material yang digunakan sebagai konduktor ialah material yang mampu mengalirkan arus.

2.2. Persamaan Laju Korosi

Laju Korosi adalah kecepatan di mana suatu logam mengalami kerusakan akibat reaksi kimia dengan lingkungannya, seperti oksidasi atau reaksi dengan larutan korosif. Laju ini biasanya diukur dalam satuan ketebalan logam yang terkikis per satuan waktu. Semakin tinggi laju korosi, semakin cepat logam mengalami kerusakan [15]. Satuan yang paling umum digunakan untuk laju korosi yaitu *mils per year* (mpy). Rumus laju korosi dalam mpy dapat dilihat pada persamaan 2.1 [17].

$$CR = \frac{534W}{\rho At} \quad (2.1)$$

dimana:

W: Kehilangan berat logam (mg)

ρ (rho): Densitas material (g/cm^3)

A: Luas permukaan logam yang terpapar korosi (in^2)

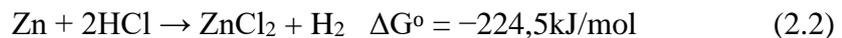
t: Waktu paparan (jam)

Untuk menangani media kimiawi ketika serangan bersifat merata, logam diklasifikasikan ke dalam tiga kelompok berdasarkan laju korosi dan aplikasi yang dimaksud. Klasifikasi ini adalah sebagai berikut [15]:

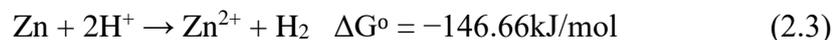
1. Laju korosi $< 0,15$ mm/tahun ($< 0,005$ inci/tahun) — Logam dalam kategori ini memiliki ketahanan korosi yang baik sehingga cocok untuk komponen kritis, misalnya dudukan katup, serta poros pompa dan pegas.
2. Laju korosi $0,15$ hingga $1,5$ mm/tahun ($0,005$ hingga $0,05$ inci/tahun) — Logam dalam kelompok ini memadai jika laju korosi yang lebih tinggi dapat ditoleransi, seperti untuk tangki, pipa, badan katup, dan kepala baut.
3. Laju korosi $> 1,5$ mm/tahun ($> 0,05$ inci/tahun) biasanya tidak memadai.

2.3. Aspek Elektrokimia Korosi

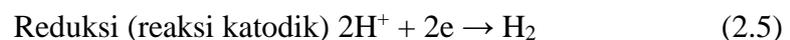
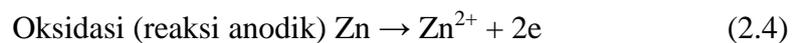
Proses elektrokimia dari korosi dapat diilustrasikan melalui reaksi antara atom seng dan asam klorida. Ketika seng ditempatkan dalam larutan asam klorida yang encer, terjadi reaksi kuat di mana gas hidrogen berevolusi dan seng larut, membentuk larutan seng klorida. Persamaan 2.2 berikut merupakan reaksi yang terjadi.



Kemudian, untuk mencapai bentuk yang lebih sederhana persamaan diatas dapat disederhanakan seperti pada Persamaan (2.3) berikut ini:

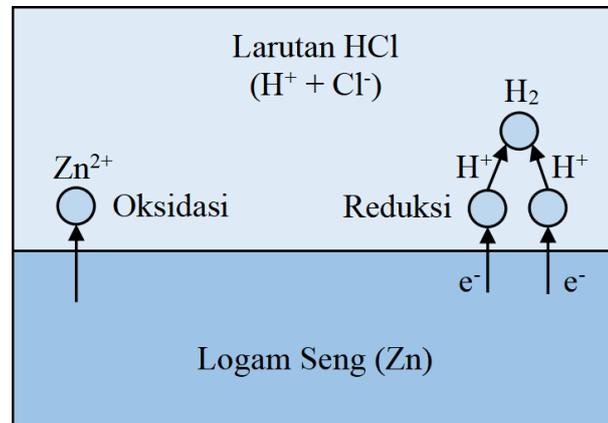


Karenanya, seng bereaksi dengan ion hidrogen dari larutan asam untuk membentuk ion seng dan gas hidrogen. Berdasarkan reaksi tersebut dapat dilihat bahwa selama reaksi berlangsung, seng teroksidasi menjadi ion seng dan ion hidrogen tereduksi menjadi hidrogen. Kemudian pada persamaan tersebut dapat dibagi menjadi dua reaksi, diantaranya oksidasi dari seng dan reduksi ion hidrogen:



Suatu reaksi oksidasi atau anodik ditunjukkan dengan kenaikan valensi atau produksi elektron. Ketika terjadi penurunan valensi atau konsumsi elektron secara signifikan, ini disebut sebagai reaksi reduksi atau katodik. Persamaan (2.4) dan (2.5) merupakan reaksi parsial yang terjadi secara spontan dan memiliki laju yang sama pada permukaan logam. Konsep dasar penting dari korosi adalah bahwa

selama proses korosi, laju reaksi oksidasi sebanding dengan laju reaksi reduksi (dalam konteks produksi dan konsumsi elektron).



Gambar 2.1 Skematik Reaksi Elektrokimia Seng Pada Elektrolit Asam Klorida [17]

Konsep di atas, seperti yang diilustrasikan dalam Gambar 2.1, menunjukkan bahwa atom seng telah mengalami transformasi menjadi ion seng dan dua elektron. Elektron yang tersisa dalam logam kemudian dikonsumsi selama proses reduksi ion hidrogen. Dalam beberapa kasus korosi, reaksi oksidasi terjadi merata di seluruh permukaan, sedangkan dalam kasus lain, dapat terjadi secara terlokalisasi atau pada area tertentu.

Korosi pada seng dalam asam hidroklorik adalah proses elektrokimia di mana setiap reaksi dapat dibagi menjadi dua reaksi parsial, yaitu oksidasi dan reduksi, yang dapat disebut sebagai reaksi elektrokimia. Persamaan setengah reaksi untuk oksidasi dan reduksi memperlihatkan persamaan yang terjadi dapat diklasifikasikan menjadi bentuk yang lebih umum. Persamaan umum untuk reaksi oksidasi atau anodik ditunjukkan dalam Persamaan 2.6.



Persamaan reaksi tersebut, jumlah elektron yang diproduksi sama dengan nilai valensi dari ion logamnya. Pada reaksi katodik atau reduksi terdapat berbagai

macam reaksi yang terjadi pada korosi logam. Beberapa reaksi yang umum terjadi adalah evolusi hidrogen seperti pada Persamaan 2.7, reduksi oksigen pada larutan asam seperti pada Persamaan 2.8, reduksi oksigen pada larutan basa atau netral seperti pada Persamaan 2.9, reduksi ion logam pada Persamaan 2.10, serta reaksi endapan logam pada Persamaan 2.10.



Asam atau media asam sering dijumpai menjadikan evolusi hidrogen merupakan reaksi katodik yang paling umum terjadi. setiap larutan berair yang terpapar udara dapat menjalani reaksi reduksi oksigen sehingga reaksi ini juga sangat umum. proses kimia tertentu menjadikan reaksi reduksi ion logam dan endapan logam lebih jarang ditemukan. Kesamaan pada semua reaksi ini yaitu saling membutuhkan atau menyerap elektron.

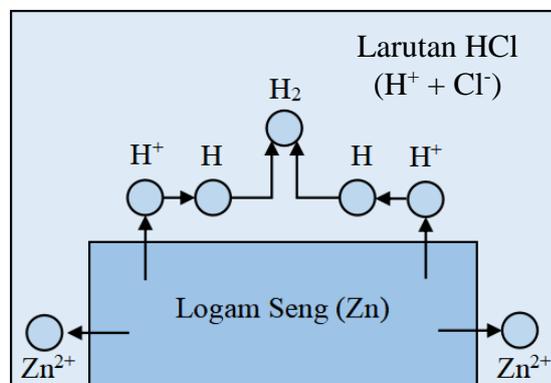
Selama proses terjadinya korosi, dapat terjadi banyak reaksi reduksi dan oksidasi. Ketika suatu paduan terjadi korosi, setiap unsur logam pada paduan akan terkorosi dan terlarut menjadi ion-ionnya masing-masing dalam larutan. Misalnya, pada korosi logam seng pada larutan asam klorida dengan kondisi teraerasi, korosi ini memiliki dua reaksi katodik yang mungkin terjadi, yaitu reduksi oksigen dan evolusi hidrogen. Pada permukaan seng, kedua reaksi yang terjadi menangkap elektron. Sebab laju reduksi sama dengan laju oksidasi, peningkatan laju reduksi akan menyebabkan meningkatnya laju pelarutan seng pada larutan. Hal ini

menunjukkan bahwa larutan asam tanpa oksigen terlarut lebih tidak korosif dibandingkan larutan asam yang mengandung oksigen terlarut.

Reaksi katodik dan anodik pada proses korosi yang saling bergantung satu sama lain dan memiliki laju yang sama menyebabkan laju korosi dapat diperlambat dengan menurunkan laju salah satu reaksi tersebut. Misalnya, untuk mengurangi kandungan oksigen terlarut dalam larutan, dapat dilakukan dengan menghindari kontak larutan dengan udara atau mengurangi jumlah udara yang terlarut. Jika permukaan logam dilapisi dengan cat atau lapisan non-konduktif lainnya, laju reaksi anodik dan katodik akan berkurang, demikian juga laju korosinya. Beberapa faktor yang mempengaruhi aspek elektrokimia meliputi:

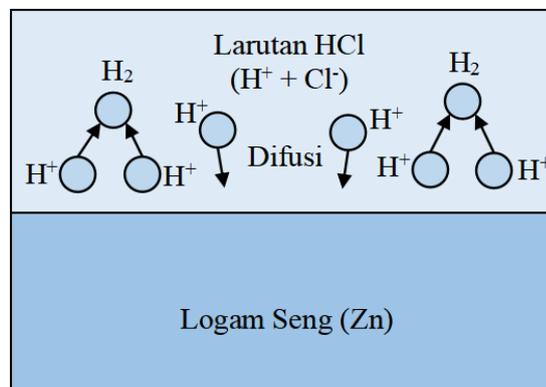
a. Polarisasi

Polarisasi elektrokimia pada korosi merujuk pada perubahan potensial elektrode dari kondisi kesetimbangan karena adanya arus yang mengalir melalui sel elektrokimia. Fontana [17] membagi polarisasi menjadi tiga jenis utama: polarisasi aktivasi, polarisasi konsentrasi, dan polarisasi resistif. Gambar 2.2 menunjukkan urutan terjadinya polarisasi aktivasi, dimulai dengan proses adsorpsi ion hidrogen ke permukaan logam, yang kemudian diikuti oleh transfer elektron.



Gambar 2.2 Reaksi Reduksi Hidrogen pada Proses Polarisasi Aktivasi [17]

Setelah transfer elektron, dua atom hidrogen bergabung membentuk gelembung gas hidrogen (H_2). Fenomena ini menitikberatkan pentingnya pengendalian kondisi lingkungan untuk mengatur laju korosi. Polarisasi konsentrasi mengacu pada reaksi kimia yang dipengaruhi oleh difusi dalam elektrolit. Contoh dari fenomena ini dapat dilihat pada Gambar 2.3, yang menunjukkan kasus evolusi hidrogen. Dalam kasus ini, konsentrasi ion hidrogen dalam larutan relatif rendah, sehingga laju reduksi dikendalikan oleh difusi ion hidrogen menuju permukaan logam.

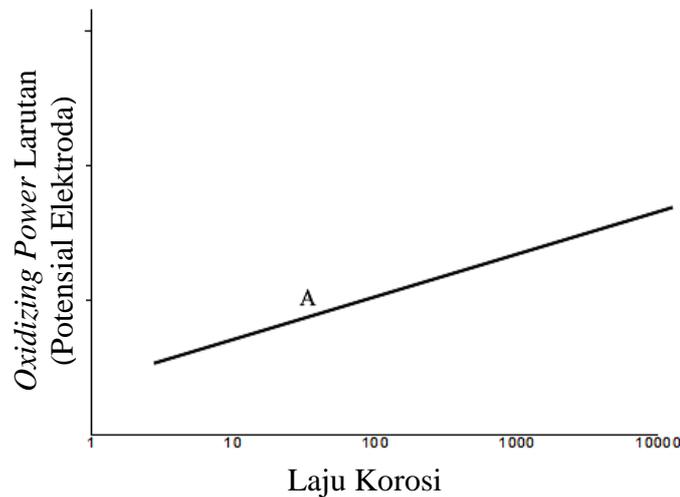


Gambar 2.3 Polarisasi Konsentrasi Pada Evolusi Hidrogen [17]

Polarisasi aktivasi biasanya mengontrol korosi di media dengan konsentrasi tinggi spesies aktif, seperti larutan asam. Di sisi lain, polarisasi konsentrasi dominan pada konsentrasi spesies tereduksi rendah, seperti larutan asam encer dan larutan garam yang teraerasi. Kadang-kadang, polarisasi konsentrasi dalam disolusi logam kecil sehingga diabaikan kecuali dalam reaksi reduksi. Membedakan polarisasi aktivasi dan konsentrasi tidak selalu mudah karena dipengaruhi oleh lingkungan reaksi. Peningkatan difusi mengurangi polarisasi konsentrasi dan meningkatkan laju reaksi, meningkatkan kecepatan agitasi dalam media korosi meningkatkan laju korosi jika dikontrol oleh polarisasi konsentrasi, tidak berpengaruh pada laju korosi dalam reaksi anodik dan katodik [17].

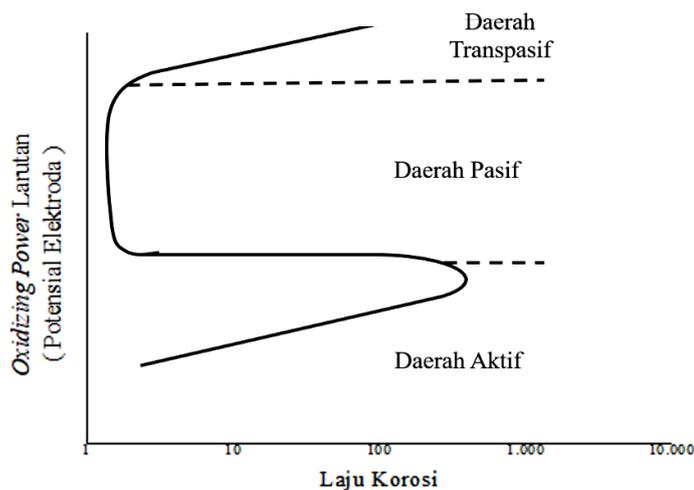
b. Pasivitas

Pasivitas suatu logam adalah fenomena kompleks yang terjadi dalam kondisi spesifik. Secara sederhana, pasivitas mengacu pada hilangnya reaktivitas kimia pada logam atau paduan dalam lingkungan tertentu. Dalam keadaan ini, logam menjadi lebih inert atau mulia, mirip dengan emas dan platina. Logam yang sering menunjukkan fenomena pasivitas meliputi besi, nikel, silikon, krom, dan titanium, serta paduan yang mengandung logam-logam tersebut. Gambar 2.4 menunjukkan fenomena pasivitas pada logam yang tidak memiliki efek pasivitas.



Gambar 2.4 Laju Korosi Suatu Logam Tanpa Efek Pasivitas Terhadap Fungsi Potensial Elektroda [17]

Gambar 2.5 menunjukkan efek pasivitas pada logam atau paduan, yang terbagi menjadi tiga daerah: aktif, pasif, dan transpasif. Di daerah aktif, logam berperilaku seperti logam biasa di mana penambahan sedikit zat pengoksidasi dapat meningkatkan laju korosi dengan cepat. Penambahan lebih banyak zat pengoksidasi menyebabkan penurunan tiba-tiba dalam laju korosi, menandai awal daerah pasif. Namun, pada konsentrasi oksidator yang sangat tinggi atau dengan oksidator yang sangat kuat, laju korosi kembali meningkat sesuai dengan daerah transpasif [17].



Gambar 2.5 Laju Korosi Suatu Logam Dengan Efek Pasivitas Terhadap Fungsi Potensial Elektroda [17]

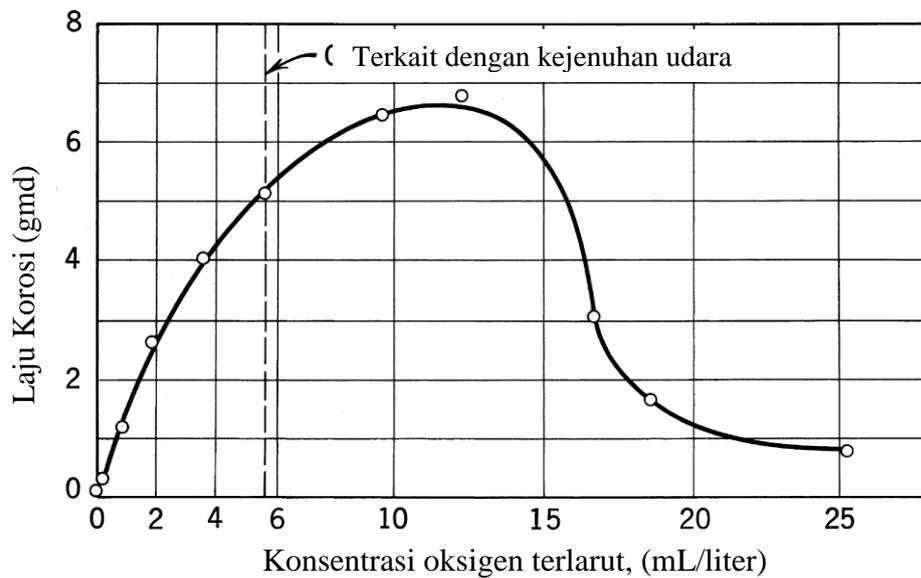
2.4. Aspek Lingkungan Akuatik

Dalam konteks industri, sering kali diinginkan untuk mengontrol beberapa variabel dalam proses. Ada beberapa aspek yang memengaruhi laju korosi. Beberapa faktor lingkungan berikut sering mempengaruhi laju korosi, termasuk:

2.4.1. Pengaruh Oksigen dan Pengoksidasi Terhadap Laju Korosi

Peningkatan konsentrasi oksigen pada awalnya mempercepat korosi besi, namun ditemukan bahwa setelah mencapai konsentrasi kritis, laju korosi kembali menurun ke nilai rendah. Dalam air suling, di atas konsentrasi oksigen kritis laju korosi mulai menurun kembali yaitu sekitar 12 mL O_2 /liter terlihat pada Gambar 2.6. Nilai ini meningkat dengan adanya garam terlarut dan dengan suhu, dan menurun dengan peningkatan kecepatan dan pH. Pada pH sekitar 10, konsentrasi oksigen kritis mencapai nilai untuk air yang jenuh oksigen (6 mL O_2 /liter) dan masih lebih rendah untuk larutan yang lebih alkalis. Penurunan laju korosi disebabkan oleh pasivasi besi oleh oksigen, seperti yang ditunjukkan oleh potensial besi dalam H_2O jenuh udara yaitu -0.4 hingga -0.5 V terhadap S.H.E. dan 0.1 hingga 0.4 V dalam H_2O jenuh oksigen

(28 mL O₂/liter). Tampaknya, pada tekanan parsial yang lebih tinggi, lebih banyak oksigen mencapai permukaan logam daripada yang dapat direduksi oleh reaksi korosi — kelebihan oksigen ini kemudian tersedia untuk membentuk lapisan pasif; peningkatan laju reaksi katodik akibat peningkatan konsentrasi oksigen meningkatkan polarisasi area anod hingga mencapai kepadatan arus kritis untuk pasivasi [15].



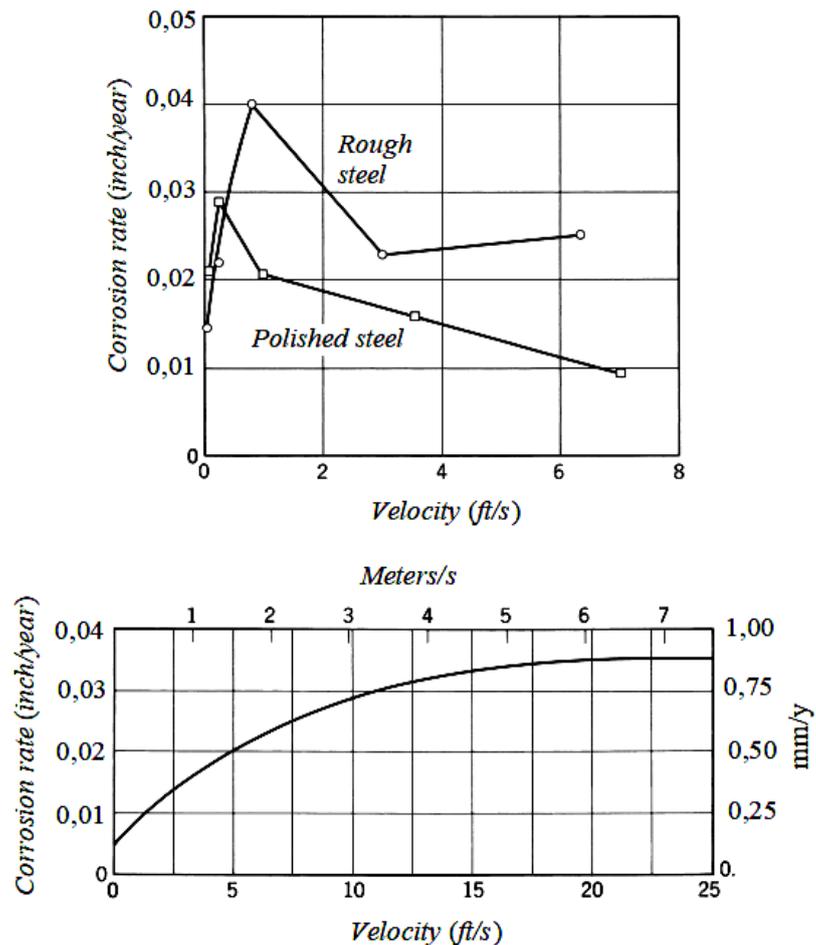
Gambar 2.6 Efek konsentrasi oksigen terhadap laju korosi baja karbon dalam air distiliasi yang bergerak perlahan, 48 jam, 25°C [15]

Pasivasi terjadi pada tekanan oksigen yang lebih tinggi, sel pasif-aktif terbentuk jika pasivasi rusak secara lokal (misalnya, pada celah-celah). Kerusakan semacam itu disertai dengan pitting yang parah, terutama pada suhu yang lebih tinggi, di hadapan ion halida, atau pada tekanan oksigen kritis di mana pasivasi berada pada ambang pembentukan atau kerusakan. Perilaku ini membatasi penggunaan praktis tekanan oksigen parsial yang tinggi sebagai cara untuk mengurangi korosi baja. Dalam konsentrasi klorida yang cukup besar, seperti dalam air laut, pasivasi besi sama sekali tidak terbentuk, dan

dalam media semacam itu, peningkatan tekanan oksigen justru menyebabkan peningkatan laju korosi [15].

2.4.2. Pengaruh Agitasi Terhadap Laju Korosi

Dalam air tawar alami, pH biasanya terlalu tinggi sehingga evolusi hidrogen tidak memainkan peran penting, dan gerakan relatif air pada awalnya meningkatkan laju korosi dengan membawa lebih banyak oksigen ke permukaan. Pada kecepatan yang cukup tinggi, oksigen yang cukup dapat mencapai permukaan untuk menyebabkan passivitas sebagian. Jika ini terjadi, laju korosi akan menurun kembali setelah peningkatan awal seperti yang terlihat pada Gambar 2.7 [15].

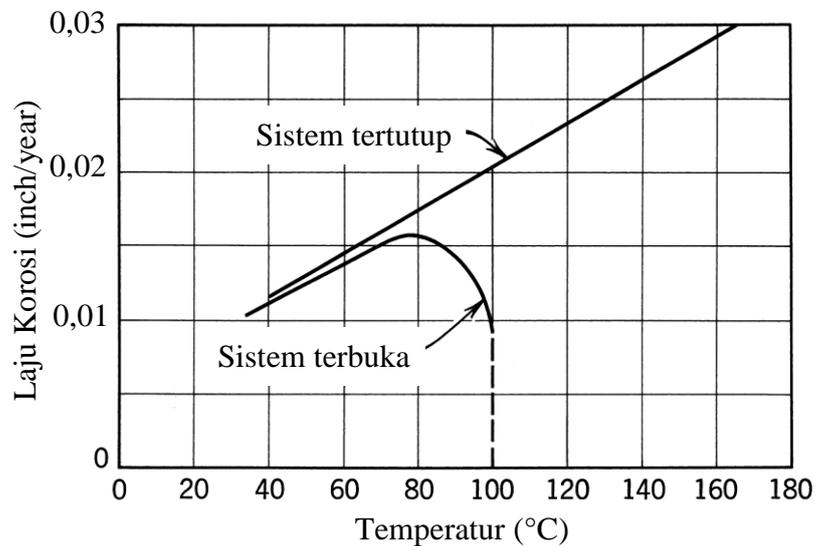


Gambar 2.7 Pengaruh Kecepatan Terhadap Laju Korosi [15]

Jika kecepatan meningkat lebih lanjut, erosi mekanis dari lapisan pasif atau lapisan produk korosi akan kembali meningkatkan laju korosi. Laju korosi maksimum sebelum passivitas terjadi pada kecepatan yang bervariasi tergantung pada kekasaran permukaan logam dan kotoran dalam air. Dalam keberadaan konsentrasi tinggi Cl^- , seperti pada air laut, passivitas tidak terbentuk pada kecepatan manapun, dan laju korosi meningkat tanpa penurunan pada kecepatan menengah apapun. Perilaku yang sama diharapkan terjadi pada suhu tinggi yang menghalangi kemungkinan passivitas oleh oksigen terlarut [15].

2.4.3. Pengaruh Temperatur

Gambar 2.8 menunjukkan pengaruh suhu terhadap korosi besi dalam air yang mengandung oksigen terlarut pada sistem terbuka dan tertutup.



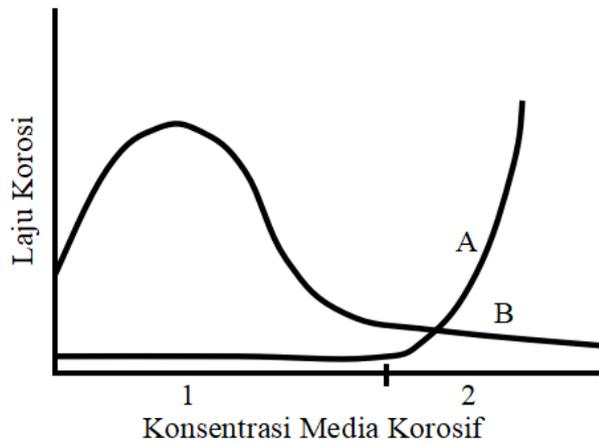
Gambar 2.8 Pengaruh suhu terhadap korosi besi dalam air yang mengandung oksigen terlarut [15]

Ketika korosi dikendalikan oleh difusi oksigen, laju korosi pada konsentrasi oksigen tertentu kira-kira meningkat dua kali lipat untuk setiap

kenaikan suhu 30 °C (55 °F). Gambar 2.8. menunjukkan dalam wadah terbuka, yang memungkinkan oksigen terlarut untuk melarikan diri, laju korosi meningkat dengan suhu hingga sekitar 80 °C (175 °F) dan kemudian turun ke nilai yang sangat rendah pada titik didih. Penurunan laju korosi di atas 80 °C ini berkaitan dengan penurunan yang nyata dari kelarutan oksigen dalam air seiring suhu meningkat, dan efek ini akhirnya mengalahkan efek percepatan suhu itu sendiri. Dalam sistem tertutup, di sisi lain, oksigen tidak dapat melarikan diri, dan laju korosi terus meningkat dengan suhu hingga semua oksigen habis. Ketika korosi disertai dengan evolusi hidrogen, peningkatan laju korosi lebih dari dua kali lipat untuk setiap kenaikan suhu 30 °C. Laju korosi besi dalam asam klorida, misalnya, kira-kira meningkat dua kali lipat untuk setiap kenaikan suhu 10 °C [15].

2.4.4. Pengaruh Konsentrasi

Gambar 2.9 menunjukkan pengaruh konsentrasi media korosif terhadap laju korosi. Kurva A pada daerah 1 menggambarkan bahwa beberapa material, meskipun menunjukkan efek pasivitas, kurang terpengaruh oleh konsentrasi media korosif pada laju korosinya. Namun, pada konsentrasi sangat tinggi (daerah 2), laju korosi meningkat pesat. Contohnya adalah timbal, yang membentuk lapisan protektif timbal sulfat pada asam sulfat berkonsentrasi rendah tetapi terlarut pada asam sulfat berkonsentrasi tinggi. Contoh reaksi pada Gambar 2.9 yaitu (A.1) Ni dalam NaOH, 18Cr-8Ni dalam HNO₃, Hastelloy B dalam HCl, dan To dalam HCl; (A.1-2) Monel dalam HCl, dan Pb dalam H₂SO₄; (B) Al dalam asam asetat dan HNO₃, 18Cr-8Ni dalam H₂SO₄, dan Fe dalam H₂SO₄.



Gambar 2.9 Pengaruh Konsentrasi Terhadap Laju Korosi [17]

Perilaku asam terlarut dalam air pada berbagai konsentrasi sering digambarkan oleh kurva B. Peningkatan konsentrasi media korosif awalnya meningkatkan laju korosi karena peningkatan ion hidrogen yang aktif. Namun, pada konsentrasi asam yang sangat tinggi, laju korosi mencapai puncaknya dan kemudian menurun karena asam berkonsentrasi tinggi mengurangi ionisasi, menjadikan beberapa jenis asam seperti sulfat, asetat, dan hidrofluorat inert pada konsentrasi 100% pada suhu sedang [17].

2.4.5. Pengaruh Efek Galvanik

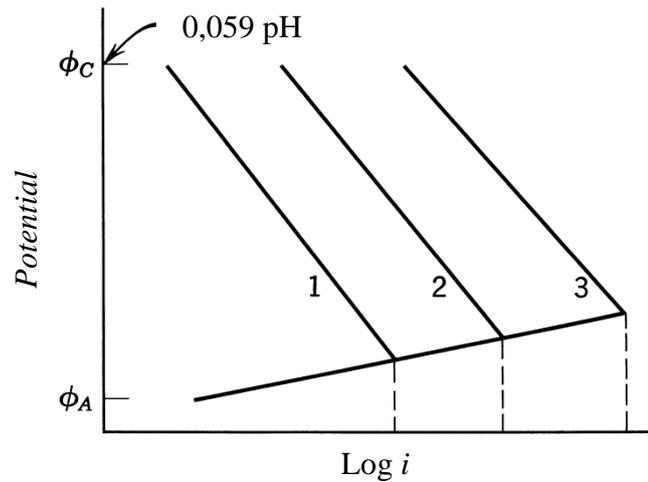
Kehilangan berat besi yang digabungkan dengan tembaga adalah sama seperti jika seluruh permukaan tersebut terdiri dari besi. Eksperimen ini juga menunjukkan bahwa penetrasi besi yang sebenarnya meningkat ketika besi digabungkan dengan logam yang lebih mulia. Hal ini menunjukkan bagaimana penggabungan mempengaruhi laju korosi pada logam yang kurang mulia. Dalam situasi di mana difusi *depolarizer* mengendalikan prosesnya, hubungan umum antara penetrasi (yang sebanding dengan laju korosi) dari logam dengan area A_a , yang digabungkan dengan logam yang lebih mulia dengan area A_c , dijelaskan sebagai berikut [15].

$$P = P_0 \left(1 + \frac{A_c}{A_a} \right) \quad (2.12)$$

di mana P_0 adalah penetrasi normal dari logam yang tidak digabungkan.

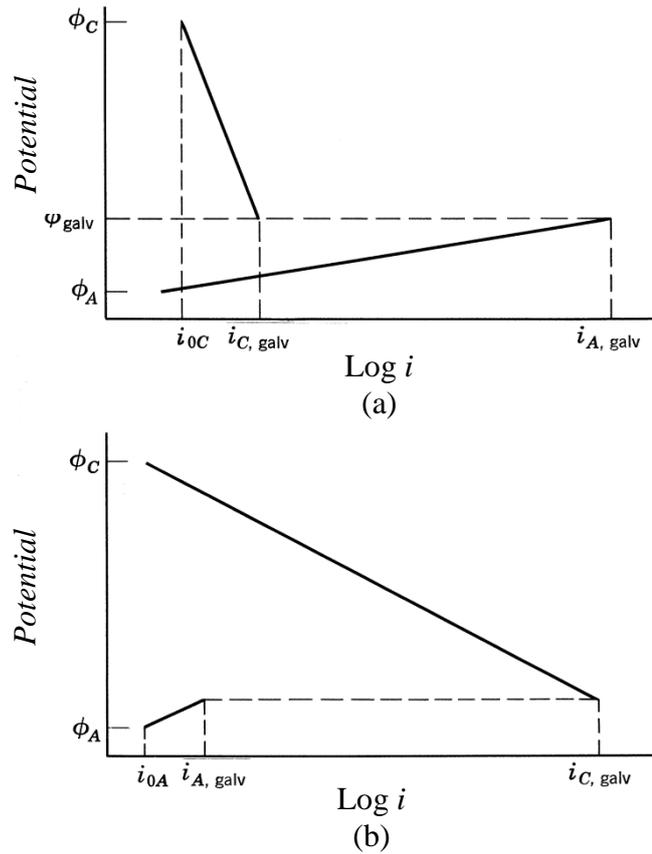
Jika rasio area A_c/A_a besar, peningkatan korosi yang disebabkan oleh penggabungan dapat menjadi sangat signifikan. Konduktivitas elektrolit dan geometri sistem turut memengaruhi masalah ini, karena hanya bagian dari area katoda yang efektif di mana hambatan antara anoda dan katoda bukan merupakan faktor pengendali. Dalam air keran yang lembut, jarak kritis antara tembaga dan besi mungkin sekitar 5 mm; dalam air laut, jarak ini dapat mencapai beberapa desimeter. Jarak kritis menjadi lebih besar jika perbedaan potensial antara anoda dan katoda lebih besar. Semua logam yang lebih mulia mempercepat korosi dengan cara yang sama, kecuali jika ada lapisan permukaan (misalnya, pada timbal) yang bertindak sebagai penghalang difusi oksigen atau jika logam tersebut merupakan katalis yang buruk untuk reduksi oksigen [15].

Dalam kasus logam yang digabungkan dan terpapar larutan yang telah dideaerasi, di mana korosi disertai dengan evolusi hidrogen, peningkatan area logam yang lebih mulia juga meningkatkan korosi pada logam yang kurang mulia. Gambar 2.10 menunjukkan kurva polarisasi untuk anoda yang sedikit terpolarisasi dibandingkan dengan katoda tempat hidrogen berevolusi (kontrol katodik).



Gambar 2.10 Pengaruh Potensial Overhidrogen Katoda terhadap Korosi Galvanik dalam Asam Nonoksidatif yang Dideaerasi [15].

Kemiringan 1 menunjukkan polarisasi area logam mulia dengan potensial overhidrogen tinggi. Kemiringan 2 dan 3 mewakili logam dengan potensial overhidrogen lebih rendah. Arus galvanik yang sesuai diperoleh dengan memproyeksikan titik perpotongan kurva polarisasi anoda-katoda ke sumbu log I. Secara umum, setiap logam tempat hidrogen terlepas bertindak sebagai elektroda hidrogen dengan potensial kesetimbangan pada tekanan hidrogen 1 atm sebesar $-0,059\text{pH}$ volt. Ketika logam yang mengalami korosi digabungkan dengan logam yang lebih mulia dengan area bervariasi, situasinya ditunjukkan dalam Gambar 2.11, di mana kerapatan arus log dipetakan sebagai pengganti arus total log.



Gambar 2.11 Pengaruh Rasio Area Anoda – Katoda pada Korosi Pasangan Galvanik dalam Asam Nonoksidatif yang Dideaerasi. (a) Katoda besar digabungkan dengan anoda kecil. (b) Anoda besar digabungkan dengan katoda kecil [15].

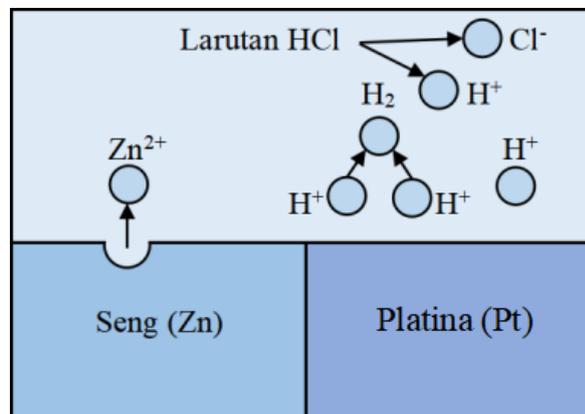
Jika anoda dengan area A_a digabungkan dengan logam yang lebih mulia dengan area A_c , Maka kerapatan arus galvanik pada anoda yang dihasilkan oleh penggabungan dapat ditunjukkan sebagai [15].

$$\log i_{A,galv} = \frac{-\phi_{galv} - 0,059pH}{\beta} + \log \frac{A_c}{A_a} i_0 \quad (2.13)$$

dimana ϕ_{galv} adalah potensial korosi (S.H.E.) dari pasangan galvanik (diukur pada jarak yang jauh dibandingkan dengan dimensi pasangan tersebut), β dan i_0 masing-masing adalah konstanta Tafel dan kerapatan arus pertukaran untuk pelepasan ion hidrogen pada logam mulia, sehingga

$$\frac{I_{\text{galv}}}{A_a} = i_{A,\text{galv}} \quad (2.14)$$

Gambar 2.12 menggambarkan penggunaan seng yang dicelupkan dalam larutan asam klorida dan disambungkan dengan platina yang lebih inert. Platina yang inert dalam media ini menyebabkan evolusi hidrogen lebih cenderung terjadi pada permukaannya dibandingkan dengan seng. Kombinasi ini meningkatkan laju reaksi katodik, yang pada gilirannya meningkatkan laju korosi pada seng.



Gambar 2.12 Skematik Pengaruh Efek Galvanik [17]

2.5. Jenis-Jenis Korosi

Korosi dapat dikelompokkan menjadi beberapa jenis berdasarkan kondisi lingkungan di mana mereka terjadi. Salah satunya adalah korosi basah dan korosi kering. Korosi basah terjadi ketika ada larutan yang bertindak sebagai elektrolit, seperti air dalam korosi baja. Ini adalah jenis korosi paling umum. Sementara itu, korosi kering terjadi ketika logam atau paduannya terpapar pada lingkungan di atas titik embun, di mana tidak ada larutan yang terlibat. Contoh umum korosi kering adalah pada baja yang terpapar pada furnace atau lingkungan dengan suhu tinggi di mana uap air dan gas dapat menyebabkan korosi [17].

Selain itu, ada berbagai bentuk korosi yang dapat diklasifikasikan sebagai berikut [1]:

1. Korosi seragam, yang menyebabkan penipisan merata dari permukaan logam.
2. Korosi galvanik, terjadi ketika dua logam yang berbeda dalam kontak langsung dalam lingkungan elektrolitik.
3. Korosi sumuran, yang menyebabkan pembentukan lubang-lubang kecil atau "*pits*" pada permukaan logam.
4. Korosi celah, terjadi di area tertutup yang membatasi akses ke lingkungan korosif.
5. Korosi retak tegang, terjadi akibat tegangan mekanis dalam lingkungan korosif, yang dapat menyebabkan retakan pada logam.
6. Korosi batas butir, terjadi di sepanjang batas butir atau batas kristal logam.
7. *Selective leaching*, di mana salah satu komponen logam larut lebih cepat daripada yang lain, meninggalkan logam yang melemah.
8. Korosi erosi, yang terjadi karena gesekan atau abrasi mekanis di lingkungan korosif.
9. Kerusakan hidrogen

2.6. Pengendalian Korosi

Dalam upaya mencegah korosi pada material logam, beberapa pendekatan dapat diambil. Salah satunya adalah melalui proses pelapisan permukaan logam menggunakan cat atau bahan pelindung lainnya. Selain itu, pemilihan jenis material dan desain yang tepat juga dapat menjadi langkah efektif dalam pencegahan korosi. Metode lain meliputi proteksi katoda dengan menggunakan anoda korban atau arus paksa, serta modifikasi lingkungan di sekitar material logam tersebut [16].

Beberapa metode yang digunakan untuk mereduksi laju korosi pada logam antara lain sebagai berikut [18].

1. Pelapisan atau *Coating*

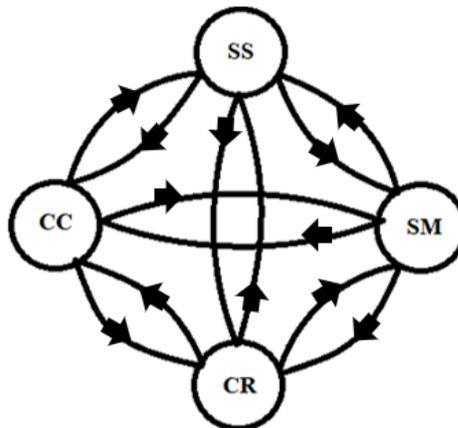
Proses ini dilakukan dengan memberikan lapisan pelindung tambahan pada permukaan logam, lapisan yang digunakan umumnya menggunakan cat sebagai bahan dasarnya. Lapisan tersebut bertujuan untuk mengurangi interaksi antar permukaan logam dengan oksigen atau udara di sekitar permukaan logam yang dapat mempercepat laju korosi. Oleh karena itu, bahan yang digunakan sebagai pelapis harus memiliki beberapa kriteria, diantaranya daya adhesi yang baik, mudah dilapiskan, tahan korosi, tahan air, tahan perubahan temperatur, dan lain sebagainya. Menurut Bardal [19], *coating* merupakan salah satu metode untuk mencegah korosi melalui tiga mekanisme utama atau kombinasi dari dua di antaranya. Pertama, *coating* berfungsi sebagai penghalang yang mencegah kontak antara media korosif dengan material logam. Kedua, *coating* dapat memberikan proteksi katodik, di mana material *coating* bekerja seperti anoda korban. Ketiga, *coating* bertindak sebagai inhibitor yang memperlambat atau menghentikan reaksi korosi.

2. Desain dan Seleksi Material

Fenomena korosi pada material logam dapat dihambat lajunya dengan melakukan pemilihan desain dan material yang sesuai dengan kebutuhan serta kondisi lingkungan di sekitar material logam tersebut berada. Pemilihan desain dapat dilakukan dengan memperhatikan bentuk, serta kemiringan dan sudut dari material logam yang digunakan. Sedangkan seleksi material umumnya dilakukan dengan memperhatikan kandungan atau komposisi paduan material

logam yang terkandung di dalamnya seperti kandungan unsur C, Cr, Ni, dan sebagainya.

Gambar 2.13 menampilkan skema seleksi material. Dalam konteks pemilihan material, ada beberapa faktor yang harus dipertimbangkan. Ini termasuk kekuatan spesifik, yang berkaitan dengan kebutuhan kekuatan material dalam aplikasi (MPa); kekuatan modulus, yang berkaitan dengan kekakuan material dalam aplikasi (GPa); ketahanan terhadap korosi, yang mencerminkan kemampuan material untuk melawan serangan korosi; dan kategori harga, yang mempertimbangkan biaya untuk memperoleh material dengan karakteristik yang dibutuhkan, sehingga pengeluaran menjadi lebih efektif dan efisien [20].



Gambar 2.13 Skema Alur untuk Pemilihan Material, Ss : *Specific Strength*, Sm : *Specific Modulus*, Cr : *Corrosion Rate*, Cc : *Cost Category* [20]

3. Alterasi Lingkungan

Korosi umumnya terjadi karena adanya interaksi antara logam dengan lingkungan di sekitarnya. Salah satu cara yang dapat dilakukan untuk mengendalikan laju korosinya adalah dengan mengubah media atau kondisi

lingkungan di sekitar material logam berada. Hal tersebut dapat dilakukan dengan menambahkan inhibitor korosi ke lingkungan di sekitar material logam. Secara umum, inhibitor adalah suatu zat kimia yang dapat menghambat atau memperlambat suatu reaksi kimia. Sedangkan inhibitor korosi adalah suatu zat kimia yang apabila ditambahkan ke dalam suatu lingkungan, dapat menurunkan laju korosi terhadap suatu logam.

4. Inhibitor Korosi

Inhibitor merupakan suatu zat yang apabila ditambahkan dalam jumlah yang sesuai ke dalam lingkungan korosif dapat menurunkan serangan korosi lingkungan terhadap logam [21]. Inhibitor hingga saat ini masih menjadi solusi terbaik untuk melindungi korosi internal pada logam. Inhibitor dapat dijadikan sebagai pertahanan utama pada industri proses dan ekstraksi minyak. Inhibitor menjadi metoda perlindungan yang cukup fleksibel karena mampu memberikan perlindungan dari lingkungan yang tidak terlalu korosif sampai pada lingkungan yang tingkat korosifitasnya sangat tinggi. Selain itu, inhibitor mudah diaplikasikan dan tingkat keefektifan biayanya paling tinggi karena lapisan yang terbentuk sangat tipis sehingga dalam jumlah kecil mampu memberikan perlindungan yang luas [22].

5. Proteksi Anodik

Proteksi anodik bertujuan untuk mencapai pasivasi permukaan yang terpapar lingkungan korosif. Tujuan ini sama dengan aplikasi pelapis pelindung, penambahan inhibitor, atau pemberian tegangan tekan melalui metode mekanis. Pasivasi logam dalam larutan elektrolit terjadi karena pembentukan antarmuka pelindung yang mencegah kontak langsung antara logam dan elektrolit.

Proses ini memungkinkan logam tetap stabil dalam lingkungan agresif dengan menciptakan lapisan pasif yang melindungi permukaan dari serangan korosi. Pendekatan ini sering digunakan dalam industri berat, seperti penyimpanan kimia, pembuatan kapal, dan aplikasi industri lainnya yang melibatkan lingkungan yang sangat korosif [23].

6. Proteksi Katodik

Proteksi katodik merupakan salah satu perlindungan korosi dengan cara menghubungkan logam yang memiliki nilai potensial lebih tinggi dengan logam yang memiliki nilai potensial lebih rendah sehingga terbentuk suatu sel elektrokimia. Proteksi katodik dapat dilakukan dengan beberapa metode, seperti anoda korban dan arus paksa (*impressed current*) [18].

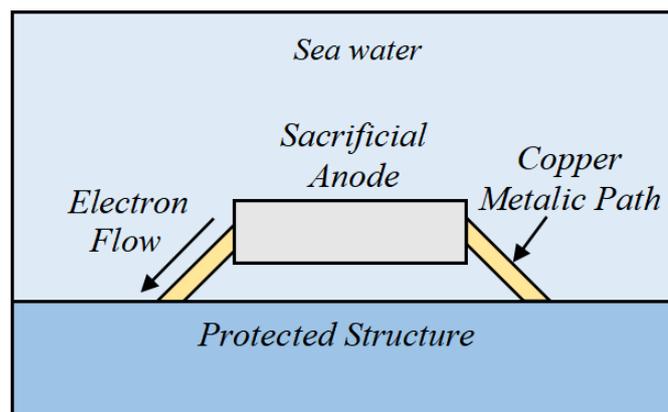
2.7. Prinsip dan Jenis-Jenis Proteksi Katodik

Proteksi katodik bekerja berdasarkan prinsip elektrokimia yang memanfaatkan perbedaan potensial antara dua logam dalam sel elektrokimia untuk mencegah korosi. Dalam sistem ini, logam yang akan dilindungi dibuat menjadi katoda, sementara logam lain yang lebih mudah terkorosi (anoda korban) digunakan sebagai anoda. Ketika dua logam ini dihubungkan dalam lingkungan yang mengandung elektrolit, seperti air laut atau tanah lembab, arus listrik akan mengalir dari anoda ke katoda. Proses ini menyebabkan anoda mengalami korosi dan terkonsumsi, sementara katoda, yaitu logam yang dilindungi, tetap utuh dan bebas dari korosi. Dalam aplikasi lain, seperti Proteksi Katodik dengan Arus Paksa (ICCP), sumber arus eksternal digunakan untuk mengalirkan arus ke struktur yang dilindungi, membuat seluruh permukaan logam menjadi katoda. Arus eksternal ini diatur sedemikian rupa untuk memastikan seluruh area logam

terlindungi dari korosi. Prinsip dasar proteksi katodik adalah untuk mengubah kondisi korosi yang secara alami akan terjadi pada logam yang dilindungi menjadi kondisi yang lebih aman dengan memanfaatkan arus listrik dan perbedaan potensial antar logam [24]. Secara umum, proteksi katodik dapat dibagi menjadi dua tipe, antara lain *Sacrificial Anode Cathodic Protection* (SACP) dan *Impressed Current Protection* (ICCP).

2.3.1. *Sacrificial Anode Cathodic Protection* (SACP)

Proteksi katodik dengan sistem anoda korban menciptakan sel elektrokimia di mana dua logam terhubung dalam elektrolit. Logam dengan potensial lebih positif bertindak sebagai katoda yang dilindungi, sementara logam dengan potensial lebih negatif bertindak sebagai anoda yang terkorosi. Sistem ini berguna dalam kondisi tanpa sumber listrik, untuk perlindungan struktur yang tidak luas atau tanpa lapisan pelindung, serta sebagai tambahan pada sistem proteksi arus tanding [24]. Gambar 2.14 menunjukkan penerapan proteksi katodik dengan sistem anoda korban dalam lingkungan air laut.



Gambar 2.14 Skema Sistem Proteksi Katodik Anoda Korban [24]

Anoda yang mengalami konsumsi atau terkorosi dalam sistem proteksi katodik direpresentasikan oleh laju korosi, yang dihitung dengan

mengalikan konstanta laju korosi dengan kehilangan berat anoda dalam milligram, kemudian dibagi dengan luas permukaan anoda yang tercelup dalam elektrolit (dalam cm²), durasi tercelupan elektrolit (dalam jam), dan densitas anoda (dalam gr/cm³). Persamaan ini dapat ditulis sebagai Persamaan 2.15. [25].

$$\text{Laju korosi} = \frac{K \times W}{D \times A \times T} \quad (2.15)$$

Proteksi katodik menggunakan sistem anoda korban memiliki beberapa kelebihan dan kekurangan. Kelebihannya termasuk tidak memerlukan sumber arus eksternal, instalasi yang sederhana, perawatan yang mudah, dan biaya instalasi yang lebih rendah dibandingkan dengan sistem arus paksa. Namun, kekurangannya adalah voltase penggerak yang lebih rendah dibandingkan dengan sistem arus paksa, sehingga mungkin tidak cukup efektif untuk melindungi struktur yang relatif besar [26].

Dalam sistem proteksi katodik, penggunaan anoda korban sering kali melibatkan pemasangan lebih dari satu anoda, dengan jenis yang disesuaikan dengan kondisi lingkungan untuk memastikan perlindungan yang menyeluruh pada katoda. Berikut adalah kelebihan dan kekurangan penggunaan anoda korban [27]:

1. Kelebihan:

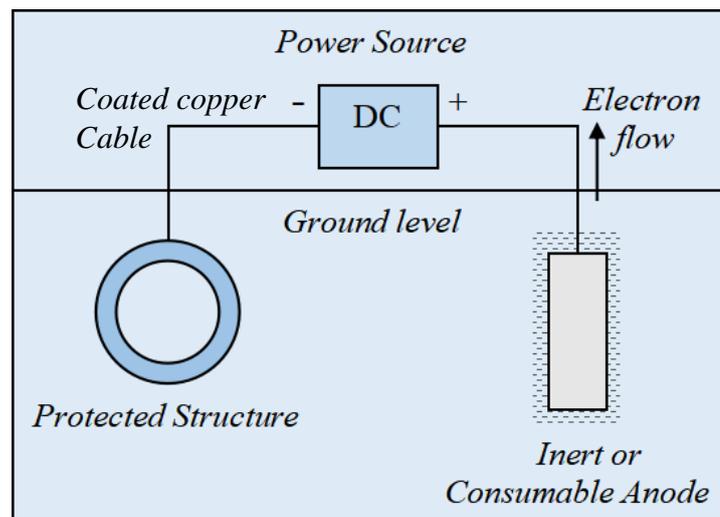
- a. Tidak Memerlukan Sumber Arus Eksternal: Anoda korban tidak membutuhkan sumber arus dari luar, sehingga menghemat energi.
- b. Instalasi Sederhana: Proses pemasangan anoda korban relatif mudah dan cepat.

- c. Perawatan Mudah: Anoda korban memerlukan sedikit perawatan dibandingkan sistem arus paksa.
 - d. Biaya Instalasi Rendah: Anoda korban memiliki biaya instalasi yang lebih rendah dibandingkan dengan sistem arus paksa.
 - e. Distribusi Perlindungan Merata: Penggunaan multiple anoda korban memungkinkan perlindungan yang merata terhadap seluruh permukaan katoda.
 - f. Adaptabilitas Lingkungan: Jenis anoda dapat dipilih sesuai dengan kondisi lingkungan korosif yang spesifik, seperti anoda aluminium untuk air laut dan anoda magnesium untuk air tawar.
 - g. Keandalan Tinggi: Sistem tetap beroperasi efektif meskipun ada anoda yang mengalami kerusakan atau gangguan.
2. Kekurangan:
- a. Voltase Penggerak Rendah: Voltase penggerak anoda korban lebih rendah dibandingkan dengan sistem arus paksa, sehingga kurang efektif untuk melindungi struktur yang sangat besar.
 - b. Variasi Laju Konsumsi Anoda: Laju konsumsi anoda korban dapat bervariasi tergantung pada kondisi lingkungan, yang mempengaruhi efisiensi proteksi dalam jangka panjang.
 - c. Tidak Efektif untuk Struktur Besar: Karena voltase penggerak yang rendah, anoda korban mungkin tidak cukup untuk melindungi struktur yang luas atau kompleks.

Meskipun terdapat beberapa keterbatasan, anoda korban tetap menjadi pilihan yang ekonomis dan praktis untuk proteksi korosi pada banyak aplikasi industri.

2.3.2. *Impressed Current Cathodic Protection (ICCP)*

Sistem proteksi katodik arus terpasang (*Impressed Current Cathodic Protection* atau *ICCP*) adalah metode untuk mengendalikan korosi pada logam dengan menggunakan sumber arus eksternal. Dalam *ICCP*, arus listrik searah dikirimkan ke struktur logam yang dilindungi, menjadikannya sebagai katoda dalam sel elektrokimia. Anoda yang digunakan dalam sistem ini tidak harus memiliki potensial yang lebih rendah daripada logam yang dilindungi, karena arus dikendalikan oleh sumber eksternal seperti *rectifier*. *ICCP* memungkinkan pengaturan arus dan potensial dengan presisi, sehingga memberikan perlindungan korosi yang efektif dan efisien untuk berbagai jenis lingkungan dan struktur, seperti pipa bawah tanah dan kapal laut [1]. Rangkaian sistem proteksi katodik arus paksa dapat dilihat pada Gambar 2.15.



Gambar 2.15 Rangkaian sistem proteksi katodik arus paksa (*ICCP*) dalam media tanah [24]

Anoda yang digunakan tidak perlu memiliki potensial lebih rendah daripada struktur yang dilindungi. Tujuan utamanya adalah untuk mengurangi laju konsumsi anoda, sehingga efisiensi penggunaannya meningkat. Laju konsumsi anoda dalam sistem ini ditentukan oleh jumlah arus yang digunakan dan kondisi lingkungan (jenis elektrolit) tempat sistem ini diterapkan. Sebagai contoh, anoda *platinized titanium* akan mengalami laju konsumsi yang lebih rendah saat digunakan untuk melindungi struktur di bawah tanah dibandingkan di lingkungan laut. Hal ini karena air laut mengandung kontaminan yang dapat memicu reaksi korosi pada anoda, meningkatkan laju konsumsinya. Dengan demikian, penting untuk mempertimbangkan lingkungan operasi saat memilih anoda untuk memastikan perlindungan yang efisien dan efektif [27].

2.8. Potensial Standar Berbagai Logam

Salah satu syarat korosi adalah perbedaan potensial antara dua logam yang berinteraksi. Potensial elektrokimia digunakan untuk memprediksi kemungkinan korosi pada suatu logam. Untuk menentukan potensial elektrokimia dari berbagai logam, digunakan sel elektrokimia di mana reaksi anodik (oksidasi) terjadi di anoda dan reaksi katodik (reduksi) terjadi di katoda. Reaksi ini secara langsung mempengaruhi potensial sel (Esel). Pada Tabel 2.1 ini merupakan beberapa nilai potensial standar dari beberapa logam:

Tabel 2.1 Potensial Standar Dari Beberapa Logam [17]

Reaksi	Potensial (V)
$\text{Au}^{3+} + 3\text{e}^{-} = \text{Au}$	+1,498
$\text{O}_2 + 4\text{H}^{+} + 4\text{e}^{-} = 2\text{H}_2\text{O}$	+1,229
$\text{Pt}^{2+} + 2\text{e}^{-} = \text{Pt}$	+1,20
$\text{Pd}^{2+} + 2\text{e}^{-} = \text{Pd}$	+0,987
$\text{Ag}^{+} + \text{e}^{-} = \text{Ag}$	+0,800

Tabel 2.1 (lanjutan)

Reaksi	Potensial (V)
$\text{Hg}^{2+} + 2\text{e}^{-} = \text{Hg}$	+0,854
$\text{Hg}^{2+} + 2\text{e}^{-} = 2\text{Hg}$	+0,789
$\text{Fe}^{3+} + \text{e}^{-} = \text{Fe}^{2+}$	+0,771
$\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^{-} = 4\text{OH}$	+0,401
$\text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^{-} = \text{Cu}$	+0,337
$2\text{H}^{+} + 2\text{e}^{-} = \text{H}_2$	0,000 (Referensi)
$\text{Pb}^{2+} + 2\text{e}^{-} = \text{Pb}$	-0,126
$\text{Sn}^{2+} + 2\text{e}^{-} = \text{Sn}$	-0,136
$\text{Ni}^{2+} + 2\text{e}^{-} = \text{Ni}$	-0,250
$\text{Co}^{2+} + 2\text{e}^{-} = \text{Co}$	-0,277
$\text{Tl}^{+} + \text{e}^{-} = \text{Tl}$	-0,336
$\text{In}^{3+} + 3\text{e}^{-} = \text{In}$	-0,342
$\text{Cd}^{2+} + 2\text{e}^{-} = \text{Cd}$	-0,403
$\text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^{-} = \text{Fe}$	-0,440
$\text{Cr}^{3+} + 3\text{e}^{-} = \text{Cr}$	-0,744
$\text{Zn}^{2+} + 2\text{e}^{-} = \text{Zn}$	-0,763
$\text{Al}^{3+} + 3\text{e}^{-} = \text{Al}$	-1,662
$\text{Mg}^{2+} + 2\text{e}^{-} = \text{Mg}$	-2,363
$\text{Na}^{+} + \text{e}^{-} = \text{Na}$	-2,714

Pada sel elektrokimia, setidaknya dibutuhkan dua logam berbeda, di mana satu logam berperan sebagai anoda dan yang lain sebagai katoda. Saat elektroda-elektroda ini dihubungkan, reaksi oksidasi dan reduksi akan mengubah potensial sel menjadi lebih positif. Persamaan potensial sel dijelaskan dalam Persamaan 2.15 dimana E_c adalah potensial katoda dan E_a adalah potensial anoda [17].

$$E_{\text{sel}} = E_c - E_a \quad (2.15)$$

2.9. Potensial Proteksi Pada Proteksi Katodik

Potensial proteksi merupakan nilai potensial elektrokimia yang harus dicapai dan dipertahankan pada permukaan logam agar korosi dapat dicegah atau diminimalkan secara efektif. Potensial proteksi ini biasanya ditentukan berdasarkan eksperimen dan pengalaman, di mana logam dilindungi dengan menjadikannya sebagai katoda dalam suatu sel elektrokimia. Ketika potensial logam mencapai nilai proteksi, laju korosi akan berkurang secara signifikan,

bahkan bisa mendekati nol. Konsep ini sangat penting dalam aplikasi proteksi katodik, di mana sumber arus eksternal atau anoda korban digunakan untuk mencapai dan mempertahankan potensial ini [14].

Menurut standar DNV GL RP B401 [7], potensial proteksi untuk berbagai logam dan lingkungan spesifik telah ditentukan untuk memastikan perlindungan yang efektif terhadap korosi. Standar ini memberikan panduan terperinci mengenai nilai potensial proteksi yang dibutuhkan untuk berbagai jenis logam dan kondisi operasi. *Open Circuit Potential* (OCP) adalah potensi yang ada dalam suatu rangkaian terbuka, yaitu ketika terminal-terminal dari rangkaian tersebut tidak terhubung dan tidak ada beban eksternal. Dalam konteks elektroda yang terendam dalam elektrolit, OCP menggambarkan kemampuan elektroda untuk teroksidasi atau tereduksi. Ini sangat penting dalam industri korosi karena membantu memprediksi bagaimana material logam akan berpartisipasi dalam reaksi korosi elektrokimia di lingkungan tertentu. Sebagai contoh, untuk perlindungan struktur baja di air laut, potensial proteksi yang direkomendasikan biasanya sekitar -0,80 V hingga -1,10 V relatif terhadap elektroda referensi Ag/AgCl. Nilai ini memastikan bahwa logam berada dalam kondisi katodik, sehingga korosi bisa dikendalikan dengan efektif. Standar ini juga mempertimbangkan faktor-faktor seperti suhu, salinitas, dan adanya *biofouling* dalam menentukan potensial proteksi yang optimal untuk berbagai aplikasi industri [7].

Tabel 2.2 menunjukkan potensial proteksi dan kapasitas elektrokimia pada material anoda dalam lingkungan yang berbeda.

Tabel 2.2 Kapasitas Elektrokimia dan Potensial Sirkuit Tertutup untuk Anoda di Suhu Air Laut [7]

Anode material	Anode surface temperature (°C)	Seawater exposure		Sediment exposure	
		Closed circuit potential (V)	Electrochemical Capacity (Ah/kg)	Closed Circuit Potential (V)	Electrochemical capacity (Ah/kg)
Al-Zn-In	<30	-1,050	2000	-1,000	1,500
	60	-1,050	1500	-1,000	680
	80	-1,000	720	-1,000	320
Zn	<30	-1,030	780	-0,980	750
	> 30 to 50			-0,980	580

Overproteksi pada sistem perlindungan katodik dengan anoda korban berbasis aluminium-zink (Al-Zn) terjadi ketika potensial struktur yang dilindungi menjadi terlalu negatif, sehingga menyebabkan efek merugikan, seperti pelepasan gas hidrogen (*hydrogen embrittlement*) pada logam tertentu atau peningkatan korosi lokal pada lapisan pelindung. Potensial perlindungan efektif: -0.80 V hingga -1.05 V (vs Ag/AgCl). Sehingga overproteksi lebih negatif dari -1.10 V (vs Ag/AgCl). Pada potensial ini, reaksi evolusi gas hidrogen meningkat, yang dapat menyebabkan *hydrogen embrittlement* pada baja berkekuatan tinggi. Terlalu negatifnya potensial dapat merusak lapisan pelindung oksida aluminium, mempercepat serangan korosi lokal [7].

2.10. Efisiensi Anoda Korban

Efisiensi anoda korban menurut standar Det Norske Veritas DNV-RP-B401 adalah ukuran seberapa baik anoda tersebut dapat melindungi struktur logam dari korosi melalui proteksi katodik. Standar ini memberikan pedoman untuk merancang dan menguji anoda korban, termasuk bahan seperti aluminium dan *zinc*. Efisiensi anoda korban Al-Zn di lingkungan air laut umumnya berkisar antara 67%

hingga 90%, tergantung pada komposisi paduan, kondisi lingkungan, dan desain sistem. Untuk mencapai efisiensi optimal, penting untuk mempertimbangkan faktor-faktor tersebut dalam pemilihan dan penerapan anoda korban.

Potensial elektrokimia keadaan $\leq -1,07$ V dan efisiensi elektrokimia minimum sebesar 2.250 Ah/kg dianggap memadai untuk memverifikasi kinerja material berbasis aluminium (Al) yang telah diuji serta untuk membenarkan penggunaan nilai default dalam Tabel 2.2. Sangat disarankan untuk memanfaatkan konservatisme yang ada dalam penggunaan nilai default pada Tabel 2.2 dalam desain anoda korban, meskipun produsen anoda mengklaim bahwa produk mereka dapat mencapai kinerja yang lebih tinggi. Data mengenai efisiensi elektrokimia anoda yang diperoleh dari uji laboratorium jangka pendek pada material anoda galvanik biasanya menghasilkan nilai yang mendekati batas teoretis (misalnya ≥ 2.500 Ah/kg untuk material Al-Zn-In). Hal ini disebabkan oleh penggunaan kerapatan arus anodik yang cukup tinggi selama pengujian. Data tersebut sebaiknya tidak digunakan untuk menggantikan nilai desain yang direkomendasikan untuk kapasitas elektrokimia [7].

2.11.Laju Korosi Anoda Korban

Laju korosi anoda korban berbahan aluminium-*zinc* (Al-Zn) merupakan parameter penting dalam evaluasi efektivitas proteksi katodik terhadap struktur logam yang terendam dalam lingkungan korosif. Anoda korban ini dirancang untuk melindungi logam lain dengan cara mengorbankan dirinya sendiri melalui reaksi elektrokimia. Laju korosi adalah kecepatan di mana material kehilangan massa akibat reaksi korosi, biasanya dinyatakan dalam satuan mm/tahun. Untuk

anoda korban Al-Zn, laju korosi dipengaruhi oleh komposisi material, kondisi lingkungan, dan desain anoda itu sendiri.

Nilai batas bawah laju korosi yang baik untuk anoda korban Al-Zn biasanya diharapkan tidak lebih dari 0,1 mm/tahun. Nilai ini menunjukkan bahwa anoda masih efektif dalam memberikan perlindungan katodik tanpa cepat habis. Batas atas laju korosi yang dapat diterima untuk anoda korban Al-Zn umumnya tidak boleh melebihi 0,3 mm/tahun. Jika laju korosi melebihi nilai ini, maka efektivitas perlindungan akan menurun dan risiko kerusakan pada struktur yang dilindungi meningkat [12].

2.12. Komposisi Anoda Korban

Sacrificial Anode (juga dikenal sebagai Anoda Korban) adalah metode perlindungan terhadap korosi pada logam. Prinsipnya melibatkan penggunaan dua jenis logam yang terhubung dalam elektrolit, seperti magnesium, *zinc*, dan aluminium. Logam ini dicampur agar lebih efektif. *Sacrificial Anode* berfungsi dengan menghasilkan arus proteksi berdasarkan prinsip korosi galvanis. Arus ini diproduksi berdasarkan perbedaan potensial antara kedua jenis logam yang terhubung dalam elektrolit. Nilai potensial *sacrificial anode* harus lebih negatif daripada struktur yang dilindungi. Perbedaan potensial ini disebut *driving voltage* atau *driving potential*. Arus yang dihasilkan oleh *sacrificial anode* adalah fungsi dari *driving voltage* dan tahanan sirkuit berdasarkan hukum Ohm. Saat pertama kali diinstalasi, nilai arus *sacrificial anode* akan mengatur sendiri dan cenderung menurun seiring dengan penurunan nilai potensial struktur. *Zinc* dan aluminium, misalnya, menunjukkan nilai arus yang lebih besar daripada nilai desain awal saat masa polarisasi. *Sacrificial Anode* umumnya digunakan pada struktur pipa dengan

lingkungan air tawar, rawa, atau lingkungan dengan resistivitas tanah rendah. Juga, *Sacrificial Anode* cocok untuk proteksi katodik sementara pada pipa baru atau pipa yang belum memiliki isolasi. Tabel 2.3 menampilkan komposisi anoda korban berbasis Al dan anoda korban berbasis Zn pada standar DNV-GL-RP-B401.

Tabel 2.3 Limit Komposisi Rekomendasi untuk Material Anoda Berbasis Al dan Zn [7]

<i>Alloying/impurity element</i>	<i>Zn-base</i>	<i>Al-base</i>
Zn	<i>rem.</i>	2,5-5,75
Al	0,10-0,50	<i>rem.</i>
In	na	0,015-0,040
Cd	0,025-0,07	≤ 0,002
Si	na	≤ 0,12
Fe	≤ 0,005	≤ 0,09
Cu	≤ 0,005	≤ 0,003
Pb	≤ 0,006	na

2.12.1. Anoda Korban Berbasis Aluminium

Aluminium adalah salah satu logam yang sering digunakan sebagai anoda korban karena memiliki potensial elektrokimia yang lebih negatif dibandingkan banyak logam struktural seperti baja. Aluminium mengalami oksidasi dan melepaskan elektron, yang kemudian diambil oleh logam yang dilindungi (katoda). Reaksi yang terjadi pada anoda korban berbasis aluminium terlihat pada Persamaan 2.16 berikut.



Elektron yang dilepaskan oleh aluminium akan bergerak melalui elektrolit menuju katoda, di mana mereka mengurangi ion oksigen atau ion hidrogen, menghambat proses korosi pada katoda. Anoda korban berbasis aluminium banyak digunakan dalam berbagai aplikasi maritim seperti kapal, platform minyak lepas pantai, pipa bawah laut, dan struktur pelabuhan [28].

2.12.2. Anoda Korban Berbasis Seng

Anoda seng merupakan salah satu metode yang umum digunakan dalam proteksi katodik untuk melindungi logam dari korosi. Metode ini didasarkan pada prinsip penggunaan seng yang lebih reaktif sebagai anoda, sehingga seng secara selektif terkorosi sebagai pengganti logam yang dilindungi. Ketika anoda seng terkorosi, ia melepaskan elektron ke dalam elektrolit (seperti air laut atau tanah), yang kemudian ditangkap oleh logam yang dilindungi (katoda), mencegahnya dari terkena korosi. Keuntungan penggunaan anoda seng adalah sifatnya yang efektif sebagai anoda korban dan ketersediaannya yang relatif mudah, membuatnya menjadi pilihan yang populer untuk berbagai aplikasi, termasuk kapal, tangki penyimpanan bawah tanah, pipa bawah tanah, dan struktur laut. Selain itu, anoda seng juga memiliki umur pakai yang cukup lama dan biaya perawatan yang rendah, menjadikannya solusi yang ekonomis dalam upaya melindungi logam dari kerusakan akibat korosi [28].

2.13. Pengaruh Unsur Paduan Terhadap Anoda Korban

Penambahan unsur paduan ke dalam anoda korban tidak hanya dimaksudkan untuk meningkatkan sifat mekanik dan kekuatan material, tetapi juga untuk mempengaruhi laju korosi dan kestabilan elektrokimia dari anoda tersebut. Unsur-unsur paduan seperti seng, tembaga, besi, dan silikon dapat mengubah cara anoda berinteraksi dengan lingkungan korosif, baik itu di air laut, tanah lembab, atau lingkungan industri yang korosif. Penyesuaian komposisi anoda korban memungkinkan pengendalian yang lebih tepat terhadap proses korosi, memastikan bahwa anoda dapat memberikan perlindungan yang maksimal terhadap struktur

yang dilindungi, sambil meminimalkan konsumsi anoda itu sendiri. Berikut pengaruh unsur-unsur paduan yang terdapat dalam anoda korban.

2.13.1. Pengaruh Unsur Zn

Penambahan unsur seng (Zn) sebagai paduan pada anoda korban aluminium memberikan beberapa keuntungan. Zn memiliki sifat yang lebih reaktif secara elektrokimia daripada aluminium (Al), sehingga ketika anoda terkorosi, unsur Zn akan dilepaskan ke dalam lingkungan korosif. Hal ini mengakibatkan logam aluminium yang dilindungi tidak mengalami korosi karena proses korosi terjadi pada anoda seng. Penggunaan paduan Zn-Al dalam anoda korban dapat meningkatkan efisiensi proteksi katodik dan memperpanjang umur anoda, karena sifat reaktif Zn yang mempercepat proses korosi dan meningkatkan daya proteksi pada logam aluminium. Efisiensi elektrokimia yang dihitung untuk sampel anoda Al hasil pengecoran adalah 68%, yang sekitar setara dengan 2026 Ah/kg yaitu efisiensi terendah yang dicapai dalam paduan yang diteliti [12].

2.13.2. Pengaruh Unsur In

Meningkatkan kandungan indium dari 0,02% menjadi 0,05% mengakibatkan penurunan potensial sirkuit terbuka sekitar 50 mV, mencapai sekitar -1100 mV terhadap elektroda Ag/AgCl. Pergeseran ke potensial yang lebih negatif ini bermanfaat untuk anoda korban, karena meningkatkan gaya pendorong mereka untuk perlindungan korosi. Kapasitas arus dari paduan Al-Zn-In menurun dengan meningkatnya kandungan indium. Misalnya, paduan dengan 0,02% In menunjukkan kapasitas sekitar 2500 Ah/kg, sedangkan paduan dengan 0,2% In menunjukkan penurunan sekitar 30%, menjadi sekitar

1750 Ah/kg. Ini menunjukkan bahwa konsentrasi indium yang lebih tinggi menyebabkan peningkatan konsumsi bahan anoda dan umur yang lebih pendek [13].

2.13.3. Pengaruh Unsur Si

Penambahan unsur silicon (Si) sebagai paduan pada anoda korban aluminium juga memberikan beberapa keuntungan. Ketika Si ditambahkan ke dalam paduan aluminium, ini dapat meningkatkan kekuatan dan ketahanan terhadap korosi dari aluminium itu sendiri. Namun, pengaruh Si terhadap sifat anoda korban mungkin lebih terbatas dibandingkan dengan unsur lain seperti zinc (Zn). Namun demikian, Si dapat mempengaruhi beberapa sifat fisik dan kimia paduan aluminium, termasuk resistensi terhadap korosi [29].

2.13.4. Pengaruh Unsur Mg

Penambahan unsur magnesium (Mg) sebagai paduan pada anoda korban aluminium dapat memberikan beberapa keuntungan. Mg merupakan logam yang lebih reaktif secara elektrokimia daripada aluminium (Al), sehingga ketika terjadi korosi, Mg akan terkorosi terlebih dahulu sebagai anoda korban. Proses ini mengarah pada perlindungan katodik untuk logam aluminium yang dilindungi, mengurangi kemungkinan korosi pada logam yang lebih berharga. Selain itu, penambahan Mg dapat meningkatkan kekuatan dan ketahanan terhadap korosi dari paduan aluminium itu sendiri [30].

2.13.5. Pengaruh Unsur Cu

Pengaruh tembaga (Cu) pada anoda korban aluminium dijelaskan secara mendalam. Penambahan Cu pada anoda korban aluminium memiliki dampak signifikan terhadap kinerjanya. Tembaga cenderung memperbaiki sifat mekanik anoda korban, meningkatkan kekerasan dan kekuatan. Namun, penambahan Cu juga memiliki dampak negatif pada ketahanan korosi anoda korban.

Cu dapat meningkatkan laju korosi lokal (pitting corrosion) karena perbedaan potensial antara tembaga dan aluminium, yang menyebabkan area kecil dengan konsentrasi tembaga bertindak sebagai situs katodik dan meningkatkan laju korosi anodik di sekitarnya. Selain itu, tembaga juga dapat mengurangi efisiensi elektrokimia anoda korban, karena fasa intermetalik yang terbentuk dapat mengganggu distribusi seragam dari korosi dan mengurangi jumlah aluminium aktif yang terkorosi.

Secara keseluruhan, meskipun penambahan Cu dapat meningkatkan sifat mekanik anoda korban aluminium, hal ini juga dapat mengurangi ketahanan korosinya dan efisiensi proteksi katodik, membuatnya kurang ideal untuk aplikasi di lingkungan yang sangat korosif. Oleh karena itu, komposisi anoda korban harus dioptimalkan untuk mencapai keseimbangan antara sifat mekanik dan ketahanan korosi yang diinginkan [31].

2.13.6. Pengaruh Unsur Fe

Penambahan besi (Fe) dalam anoda korban aluminium dapat mempengaruhi karakteristik anoda tersebut. Penelitian ini menemukan bahwa kehadiran Fe dalam anoda korban aluminium dapat mempengaruhi struktur

mikro dan sifat elektrokimia anoda. Fe cenderung membentuk fasa intermetalik yang dapat meningkatkan kekerasan dan kekuatan mekanik anoda, namun pada saat yang sama dapat mengurangi efisiensi elektrokimia anoda tersebut. Fasa intermetalik yang terbentuk dapat bertindak sebagai situs katodik lokal, yang meningkatkan laju korosi galvanik dan mengurangi umur pakai anoda. Selain itu, distribusi dan ukuran partikel intermetalik yang terbentuk oleh Fe juga berperan penting dalam menentukan performa anoda korban. Penelitian ini memberikan wawasan penting mengenai optimasi komposisi anoda korban aluminium untuk meningkatkan performa dan umur pakainya dalam aplikasi perlindungan katodik [32].

2.13.7. Pengaruh Unsur Cr

Penambahan unsur kromium (Cr) sebagai paduan pada anoda korban aluminium memiliki dampak signifikan terhadap sifat korosif dan mekanis anoda tersebut. Kromium dikenal karena kemampuannya membentuk lapisan oksida kromium (Cr_2O_3) yang stabil dan tahan terhadap korosi. Ketika Cr ditambahkan ke dalam paduan aluminium, lapisan oksida ini memberikan perlindungan tambahan terhadap lingkungan korosif, meningkatkan ketahanan anoda korban terhadap korosi. Selain itu, penambahan Cr juga dapat meningkatkan kekuatan dan kekerasan paduan aluminium, membantu menjaga stabilitas dimensi anoda korban dan mengurangi risiko deformasi atau kerusakan struktural [30].

2.14. Korosi pada Air Laut

Korosi pada air laut adalah masalah serius yang mempengaruhi berbagai struktur dan perangkat yang beroperasi dalam lingkungan laut, seperti kapal,

platform minyak, dan pipa bawah laut. Air laut adalah lingkungan yang sangat korosif karena mengandung berbagai garam, terutama natrium klorida (NaCl), yang mempercepat proses korosi [17].

Faktor-faktor yang Mempengaruhi Korosi pada Air Laut [27]:

1. Kandungan Garam: Air laut mengandung sekitar 3,5% garam (terutama NaCl). Ion klorida (Cl^-) dalam garam sangat agresif terhadap logam, terutama besi dan baja, karena ion ini dapat menembus lapisan oksida pelindung pada logam dan mempercepat korosi.
2. Oksigen Terlarut: Oksigen yang terlarut dalam air laut juga mempengaruhi laju korosi. Oksigen terlibat dalam reaksi katodik, yang mempercepat proses korosi. Oksigen terlarut dapat bervariasi tergantung pada suhu dan agitasi air.
3. Suhu: Peningkatan suhu air laut umumnya meningkatkan laju korosi karena reaksi kimia terjadi lebih cepat pada suhu yang lebih tinggi. Namun, pada suhu sangat tinggi, kelarutan oksigen menurun, yang dapat mengurangi laju korosi.
4. Agitasi dan Aliran Air: Agitasi dan aliran air laut dapat meningkatkan laju korosi dengan mempercepat transportasi ion-ion pengoksidasi ke permukaan logam dan menghilangkan produk korosi dari permukaan logam.
5. Mikroorganisme: Kehadiran mikroorganisme seperti bakteri yang menghasilkan sulfat (sulfate-reducing bacteria) dapat menyebabkan korosi mikrobiologis yang dapat mempercepat kerusakan logam.

2.15. Komposisi Kimia dan Salinitas Air Laut

Komposisi kimia air laut sangat bervariasi, tetapi secara umum mengandung sekitar 3,5% garam terlarut. Garam utama dalam air laut adalah natrium klorida

(NaCl), yang menyumbang sebagian besar salinitas. Selain itu, air laut juga mengandung berbagai senyawa mineral lainnya seperti magnesium sulfat (MgSO_4), kalsium sulfat (CaSO_4), kalium sulfat (K_2SO_4), dan trace elements seperti magnesium, kalsium, dan kalium. Komposisi kimia air laut dapat dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti kedalaman, lokasi geografis, dan aktivitas manusia seperti polusi [33].

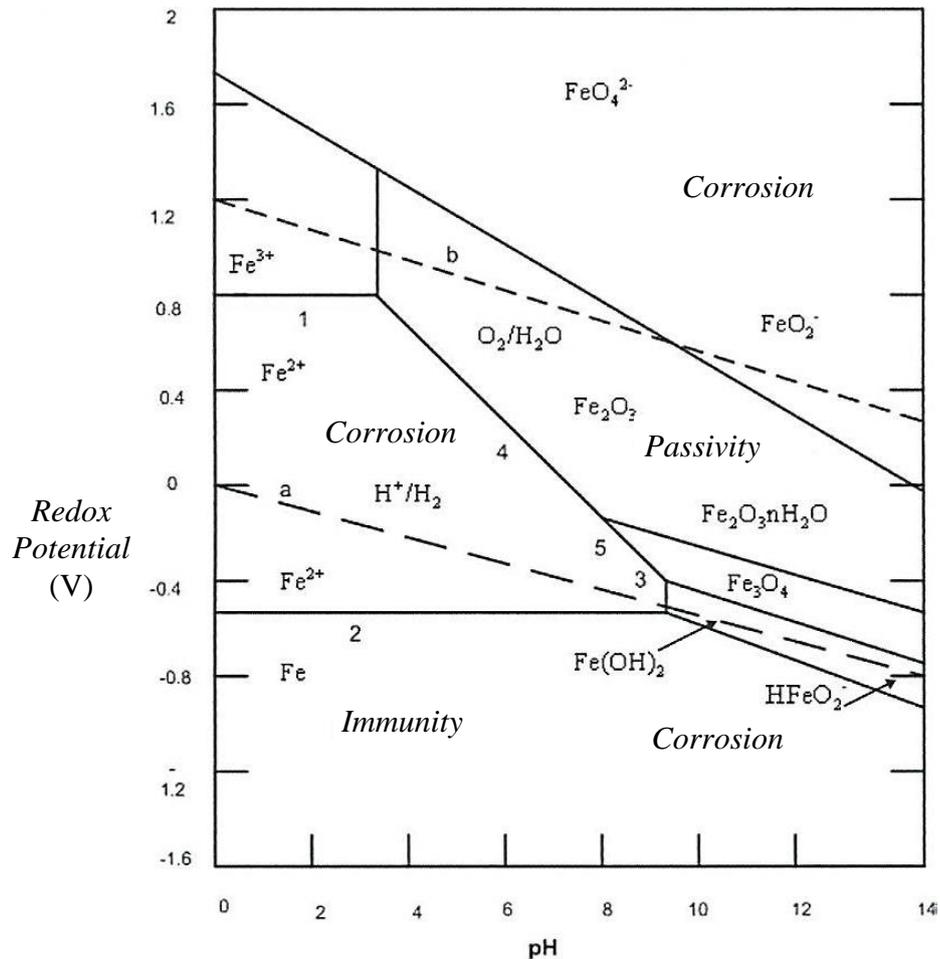
Salinitas air laut, yang merupakan pengukuran konsentrasi garam dalam air, biasanya dinyatakan dalam unit per mil atau ppt (parts per thousand). Rata-rata salinitas air laut global adalah sekitar 35 ppt, tetapi ini dapat bervariasi di berbagai lokasi dan kedalaman. Faktor-faktor seperti penguapan, presipitasi, aliran sungai, dan pembekuan es dapat mempengaruhi salinitas air laut secara lokal [34].

Komposisi kimia dan salinitas air laut memiliki dampak signifikan terhadap proses korosi logam dalam lingkungan laut. Kandungan garam, terutama natrium klorida (NaCl), dalam air laut mempercepat laju korosi dengan memperburuk kondisi elektrolitik. Ion-ion klorida dapat menembus lapisan oksida pelindung pada logam dan meningkatkan laju reaksi korosi. Selain itu, salinitas yang tinggi juga dapat meningkatkan keasaman air laut, yang dapat meningkatkan reaksi korosif. Komposisi kimia air laut yang bervariasi, termasuk konsentrasi ion-ion mineral dan trace elements, juga dapat memengaruhi sifat korosif air laut.

2.16. Diagram Pourbaix Fe

Diagram Pourbaix adalah representasi grafis yang menunjukkan stabilitas logam yang dipengaruhi oleh hubungan antara potensial dan pH. Diagram ini berguna untuk mengetahui kestabilan logam terhadap perubahan nilai potensial dan pH. Dalam diagram Pourbaix, nilai potensial logam direpresentasikan dalam sumbu

vertikal sementara sumbu horizontal menunjukkan perubahan pH. Diagram ini dibuat berdasarkan persamaan Nernst dan data kelarutan logam dan spesiesnya, seperti Fe, Fe₂O₃, Fe(OH)₂, dan Fe₃O₄, dalam kondisi kesetimbangan pada suhu 25°C. Konsentrasi ion logam diasumsikan sama, yaitu 10⁻⁶ mol per liter larutan, yang merupakan batas di mana korosi dapat terjadi; pada konsentrasi lebih rendah, korosi tidak terjadi. Diagram Pourbaix menunjukkan bahwa terdapat daerah immunitas pada Fe. Daerah imunitas tersebut perlu dicapai pada proteksi katodik menggunakan anoda korban. Diagram Pourbaix logam Fe dalam air dapat dilihat pada Gambar 2.16.

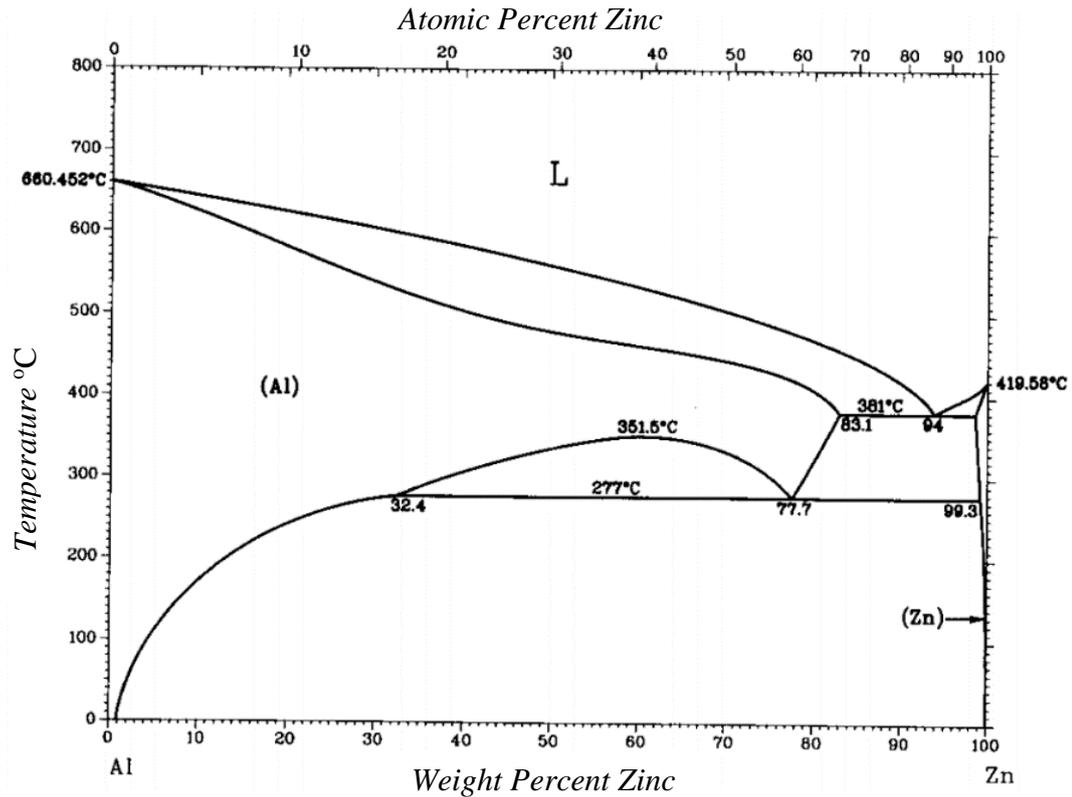


Gambar 2.16 Diagram Pourbaix Fe Dalam Air [31]

Diagram tersebut menunjukkan tiga daerah yang memiliki implikasi yang berbeda: daerah imun, korosi, dan pasifasi. Daerah imun menandakan bahwa kondisi di sana tidak memungkinkan terjadinya korosi, sehingga logam aman dari ancaman kerusakan. Namun, di daerah korosi, logam berpotensi mengalami proses korosi yang merusak, karena lingkungan di sekitarnya mendukung reaksi yang menghasilkan kerusakan. Di daerah pasifasi, terbentuknya lapisan oksida pada permukaan logam menciptakan perlindungan tambahan. Lapisan oksida ini, terutama Fe_2O_3 dan Fe_3O_4 , dapat bertindak sebagai perisai yang efektif melawan korosi jika memenuhi syarat-syarat tertentu, seperti adhesi yang baik dengan logam dasar dan ketahanan terhadap lingkungan korosif. Dengan demikian, pemahaman tentang berbagai daerah dalam diagram Pourbaix memainkan peran penting dalam menentukan kecenderungan korosi logam dan strategi perlindungannya [31].

2.17. Diagram Fasa Al-Zn

Gambar 2.17 merupakan diagram fasa dari paduan aluminium dengan seng (Al-Zn).

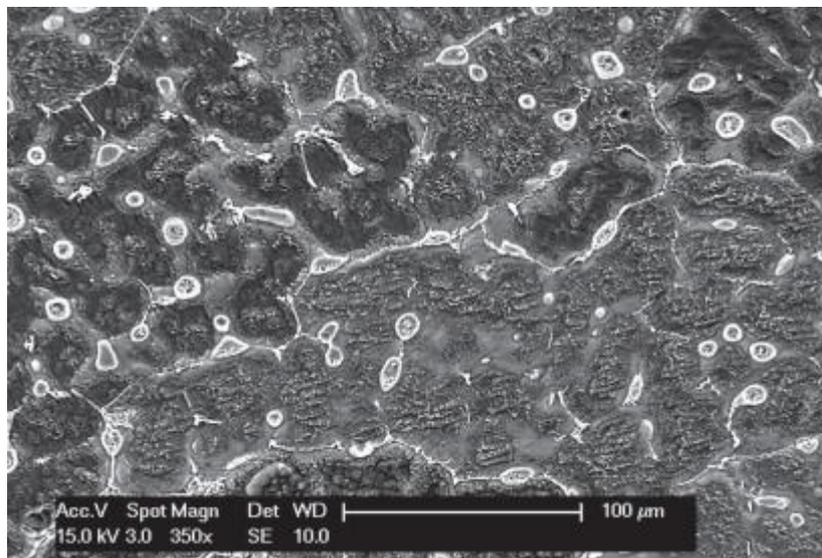


Gambar 2.17 Diagram fasa paduan Al-Zn [35]

Berdasarkan informasi yang terdapat dalam diagram fasa Al-Zn menunjukkan bahwa seng (Zn) memiliki batas kelarutan yang cukup tinggi dalam aluminium pada temperatur tinggi. Bahkan pada temperatur ruang, Zn masih memiliki kelarutan yang signifikan, sekitar 5%. Hal ini menunjukkan bahwa kandungan seng (Zn) di bawah batas kelarutan tersebut masih dapat terlarut dalam aluminium menurut diagram fasa biner Al-Zn. Namun, ketika kandungan Zn melebihi batas kelarutan tersebut, ada kemungkinan terjadinya presipitasi Zn dalam batas butir aluminium. Hal ini mengindikasikan bahwa pemahaman akan batas kelarutan antara aluminium dan seng sangat penting dalam merancang dan memahami sifat-sifat paduan Al-Zn [35].

2.18. Struktur Mikro Al-Zn

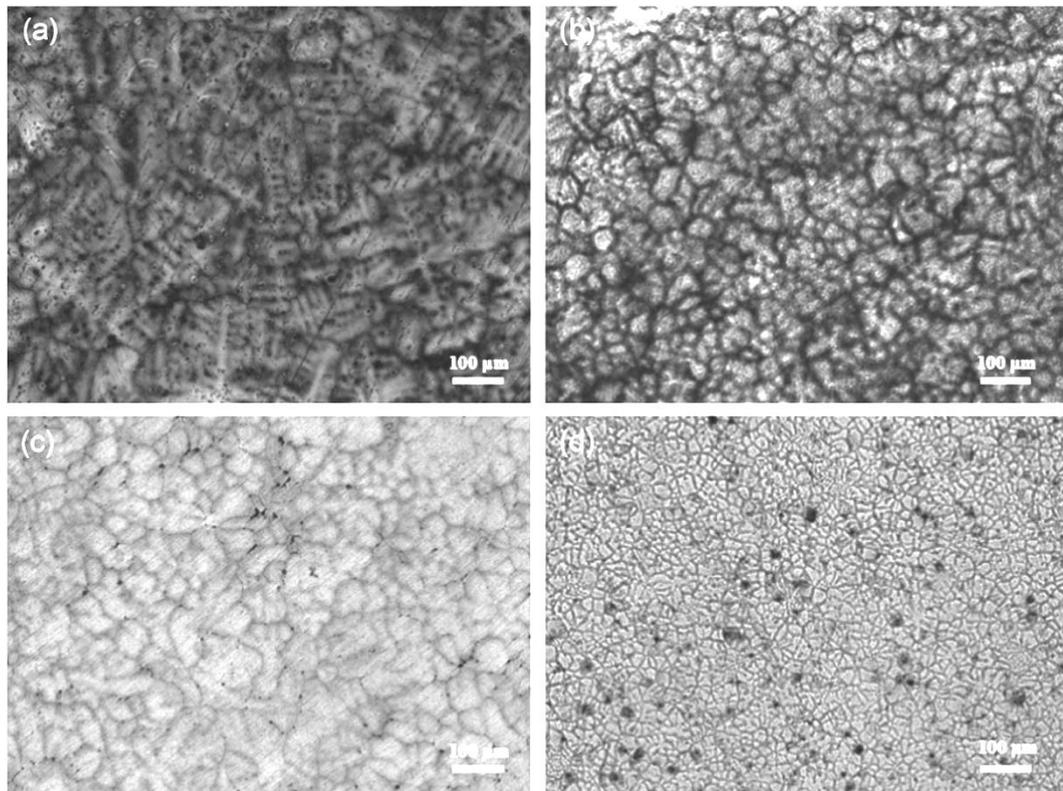
Paduan Al-10 wt.% Zn terletak dalam zona konsentrasi di mana, dalam kondisi keseimbangan, larutan padat stabil FCC pada suhu tinggi terurai menjadi larutan padat FCC yang miskin Zn dan larutan padat HCP yang terdiri hampir sepenuhnya dari Zn murni. Namun, paduan tersebut terletak tepat sebelum celah kelarutan dalam keadaan padat dari sistem Al-Zn. Gambar 1 menunjukkan variasi ukuran butir terhadap kandungan Zn untuk serangkaian paduan Al-Zn yang telah kami buat melalui peleburan induksi frekuensi tinggi dan diamati pada tingkat mikrostruktural. Khususnya, untuk 10 wt.% Zn, ukuran butir rata-ratanya sekitar 45 μm . Mikrograf SEM yang ditunjukkan oleh Gambar 2.16 mengungkapkan morfologi dendritik butir yang diamati pada paduan dengan 10 wt.% Zn. Partikel yang muncul dalam paduan Al-10 wt.% Zn (Gambar 2.18) memiliki bentuk hampir bulat [36].



Gambar 2.18 Mikrostruktur Hasil SEM Paduan Al-10 wt.% Zn [36]

Gambar 2.19 menunjukkan struktur mikro dari empat anoda paduan aluminium yang berbeda. Paduan Al-Zn-In menunjukkan struktur kristal dendritik

yang tidak teratur (Gambar 2.19a). Unsur paduan dan kotoran yang memiliki titik leleh rendah terletak di wilayah dendrit dan batas butiran yang lebar disebabkan oleh segregasi Zn dan In dalam bentuk unsur atau senyawa selama proses pendinginan paduan aluminium. Ketika Sn, Cd, dan Si ditambahkan secara berurutan ke dalam matriks Al-Zn-In, struktur paduan aluminium tersebut memiliki ukuran butir yang lebih kecil didominasi oleh butir-butir equiaxed dan jumlah dendrit yang sedikit. Secara khusus, ukuran butir paduan Al-Zn-In-Sn lebih seragam, dan paduan Al-Zn-In-Si dengan batas butir yang dihaluskan memiliki ukuran butir yang paling kecil. Menurut teori solidifikasi logam, difusi dan kristalisasi unsur paduan sering tidak sejalan dalam proses solidifikasi di bawah kondisi ketidakseimbangan, dan yang pertama relatif lambat. Aluminium, dengan titik leleh yang lebih tinggi, mengkristal menjadi kerangka dendritik terlebih dahulu dan unsur dengan titik leleh yang lebih rendah diperkaya dalam cairan di depan antarmuka padat-cair selama proses solidifikasi, membentuk segregasi di batas butir. Ketika Sn, Cd, dan Si ditambahkan secara berturut-turut ke dalam Al-Zn-In, kristalisasi pendinginan Al-Zn-In akan terpengaruh, menghasilkan struktur mikro dan morfologi yang berbeda [5].



Gambar 2.19 Struktur mikro dari serangkaian paduan anoda Al-Zn-In: (a) Al-Zn-In, (b) Al-Zn-In-Sn, (c) Al-Zn-In-Cd, (d) Al-Zn-In-Si [5]

2.19. Pengecoran

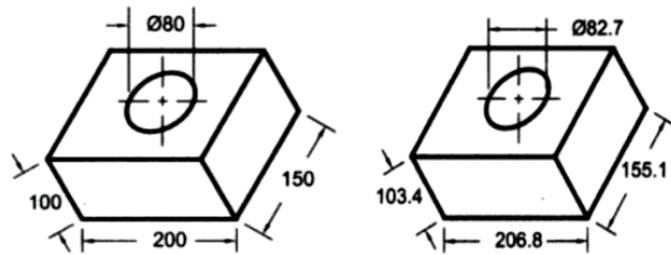
Pengecoran logam adalah salah satu metode pembentukan logam yang unik yang melibatkan pembuatan cetakan dan pencairan logam untuk membentuk komponen dengan berbagai geometri, mulai dari yang kecil hingga sangat besar. Diperkirakan bahwa sekitar 90% dari proses manufaktur produk logam di dunia industri menggunakan metode pengecoran. Metode ini mencakup berbagai teknik, termasuk pengecoran pasir, pengecoran dengan cetakan permanen, pengecoran vakum, investment casting, pengecoran dengan cetakan yang menguap, dan pengecoran sentrifugal.

Proses manufaktur menggunakan metode pengecoran memiliki beberapa kelebihan. Pertama, metodenya relatif mudah diterapkan. Kedua, bentuk akhir produk dapat mencerminkan dengan baik bentuk produk utama karena tidak

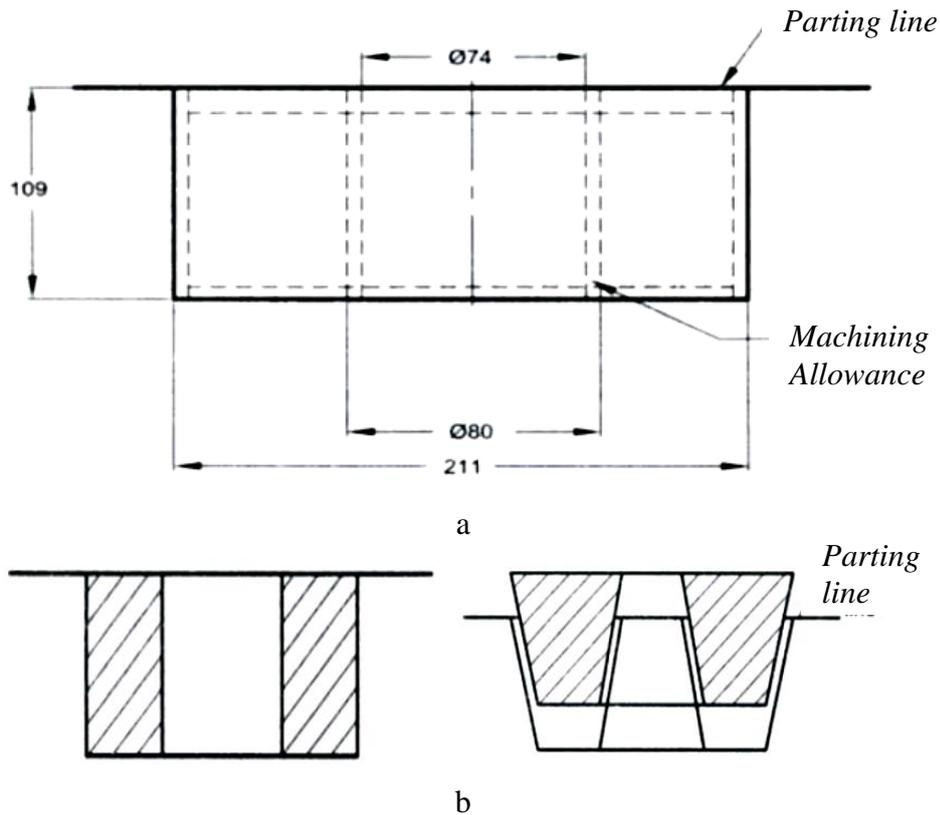
memerlukan banyak sambungan. Ketiga, penampilannya optimal karena tidak ada sambungan yang terlihat. Keempat, mudah untuk menyesuaikan bentuk dengan fungsi produk. Dan kelima, metode ini mampu membentuk produk dengan geometri yang rumit [37].

2.19.1. Pola

Pola (*pattern*) dalam pengecoran logam dijelaskan sebagai alat penting yang digunakan untuk membentuk rongga dalam cetakan pasir. Pola adalah replika dari objek yang akan dicetak dan dibuat dengan mempertimbangkan faktor-faktor seperti penyusutan logam selama pendinginan, penyelesaian permukaan, dan kemudahan pembuatan cetakan. Material yang digunakan untuk pola dapat berupa kayu, logam, atau plastik, tergantung pada skala produksi dan kompleksitas bentuknya. Jenis pola meliputi pola satu bagian untuk bentuk sederhana, pola terpisah untuk bentuk kompleks, dan pola busa yang hilang yang menguap saat logam cair dituangkan. Pola harus dirancang lebih besar dari ukuran akhir benda cor untuk mengimbangi penyusutan logam, dan permukaannya harus halus untuk menghasilkan cetakan berkualitas tinggi. Selain itu, pola sering kali dilengkapi dengan rongga inti untuk membentuk bagian dalam benda cor. Pola yang dirancang dengan baik adalah langkah awal yang krusial dalam proses pengecoran, memastikan efisiensi dan kualitas produk akhir. Pada material logam dan plastik untuk dimensi hingga 20 mm, sudut eksternal yang digunakan adalah $1,5^\circ$ dan internalnya 3° [38]. Gambar 2.20 menunjukkan penambahan *shrinkage allowance*, dan Gambar 2.21 menunjukkan *machining* dan *draft allowance*



Gambar 2.20 Skematik Efek Penambahan *Shrinkage Allowance* Terhadap Dimensi Pattern Untuk Pengecoran Aluminium [38]



Gambar 2.21 Skematik Efek Penambahan *Machining Allowance* (a) dan *Draft Allowance* (b) Terhadap Dimensi Pattern Untuk Pengecoran Aluminium [38]

2.19.2. Cetakan

Cetakan adalah suatu alat atau wadah yang digunakan dalam proses pengecoran untuk membentuk logam cair menjadi bentuk yang diinginkan. Cetakan ini memiliki bentuk yang sesuai dengan produk akhir yang akan dihasilkan. Ada berbagai jenis cetakan yang digunakan dalam industri

pengecoran, termasuk cetakan pasir, cetakan logam, cetakan cetak injeksi, cetakan keramik, dan lainnya.

Cetakan pasir adalah jenis cetakan yang paling umum digunakan dalam proses pengecoran logam. Cetakan pasir terbuat dari campuran pasir silika yang dicampur dengan agen pengikat (biasanya bentonit) dan air. Campuran ini dicetak sesuai dengan bentuk yang diinginkan, kemudian logam cair dituangkan ke dalam cetakan pasir. Setelah logam mendingin dan mengeras, cetakan pasir dibongkar untuk mengeluarkan produk pengecoran.

Proses pengecoran dengan cetakan pasir sering dipilih karena relatif murah, fleksibel, dan cocok untuk produksi dalam jumlah sedang hingga besar. Selain itu, cetakan pasir juga dapat dengan mudah diubah untuk membuat produk dengan bentuk yang berbeda. Meskipun demikian, cetakan pasir memiliki kekurangan, termasuk ketidakakuratan dimensi akhir produk dan kebutuhan akan pemeliharaan yang intensif pada cetakan itu sendiri [37].