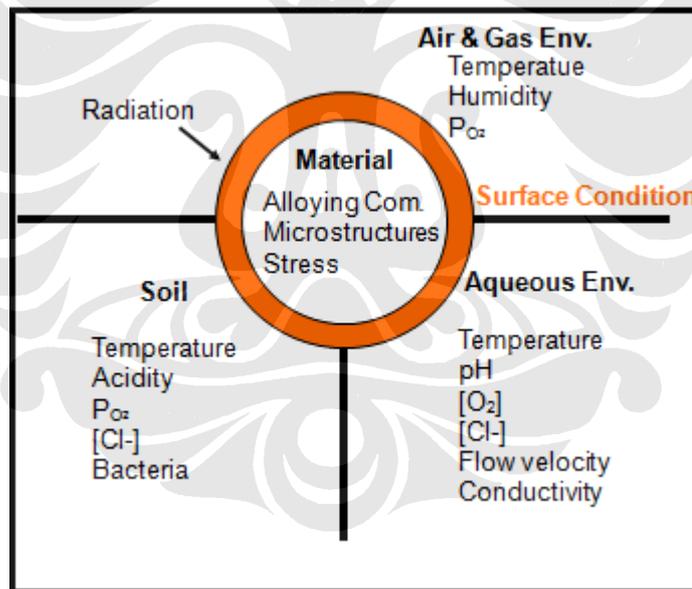


BAB II

TEORI PENUNJANG

2.1 KOROSI PADA BAJA

Korosi merupakan proses degradasi kualitas/mutu logam akibat adanya reaksi dengan lingkungan ketika dipakai atau dioperasikan. Korosi sebagai suatu reaksi elektrokimia yang memberikan kontribusi kerusakan fisik suatu material secara signifikan sehingga perlu perhatian untuk mencegah dan meminimalisasi kerugian yang timbul akibat efek korosi. Peristiwa ini seringkali terjadi di berbagai sektor kehidupan, utamanya di lingkungan industri yang cukup banyak menggunakan logam seperti industri kimia, petrokimia serta sejumlah industri infrastruktur.⁽¹⁾

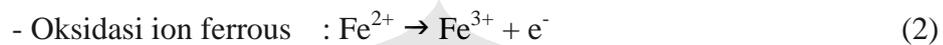
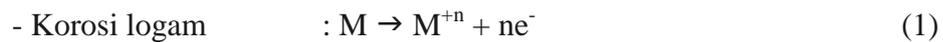


Gambar 2.1 Pengaruh Lingkungan terhadap Material⁽³⁾

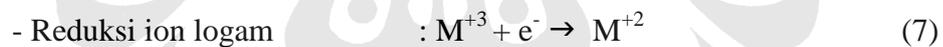
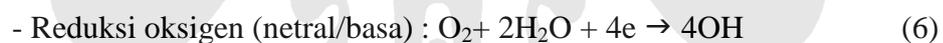
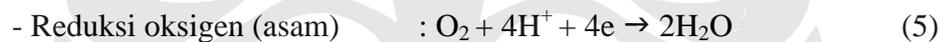
Mekanisme korosi tidak terlepas dari reaksi elektrokimia. Reaksi elektrokimia melibatkan perpindahan elektron-elektron. Perpindahan elektron merupakan hasil reaksi redoks (reduksi-oksidasi). Mekanisme korosi melalui reaksi elektrokimia melibatkan reaksi anodik di daerah anodik. Reaksi anodik

(oksidasi) diindikasikan melalui peningkatan valensi atau produk elektron-elektron. Proses korosi dari logam M adalah proses oksidasi logam menjadi satu ion (n^+) dalam pelepasan n elektron. Reaksi katodik juga berlangsung di proses korosi. Reaksi katodik diindikasikan melalui penurunan nilai valensi atau konsumsi elektron-elektron yang dihasilkan dari reaksi anodik.⁽⁴⁾

- Reaksi anodik pada proses korosi :⁽⁵⁾



- Reaksi Katodik pada proses korosi :



2.1.1 Korosi pada Baja Karbon (*Bare Steel*)

Baja karbon, paling banyak digunakan untuk material keteknikan, diperkirakan 85% dari produksi baja dunia. Walaupun terdapat keterbatasan terhadap ketahanan korosi, baja karbon banyak digunakan untuk aplikasi kelautan (maritim), nuklir, transportasi, proses kimia, industri perminyakan, *refining*, pipa saluran, konstruksi pertambangan dan peralatan proses logam.⁽⁶⁾

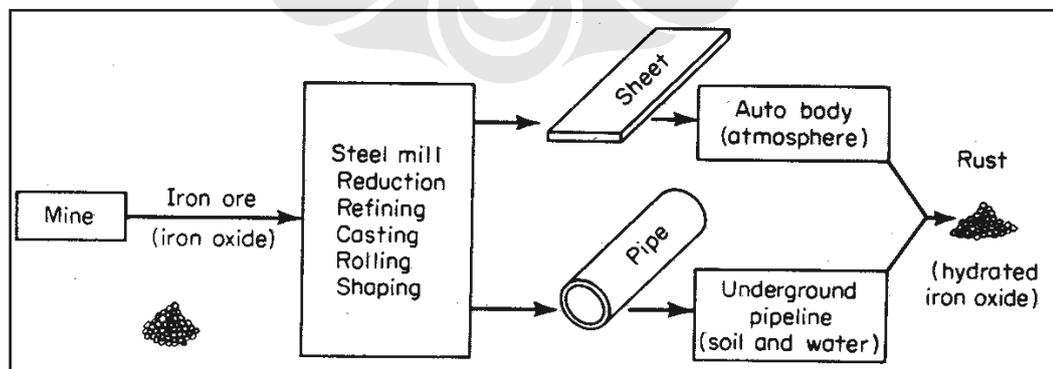
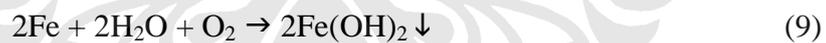
Baja karbon secara alami memiliki keterbatasan terhadap kandungan paduannya, biasanya di bawah 2% dari total penambahan. Namun penambahan tersebut secara umum tidak menghasilkan perubahan terhadap ketahanan korosi.

Terkecuali weathering steel, dengan penambahan sedikit tembaga, krom, nikel, dan phosphorus dapat mereduksi laju korosi pada lingkungan tertentu.⁽⁶⁾

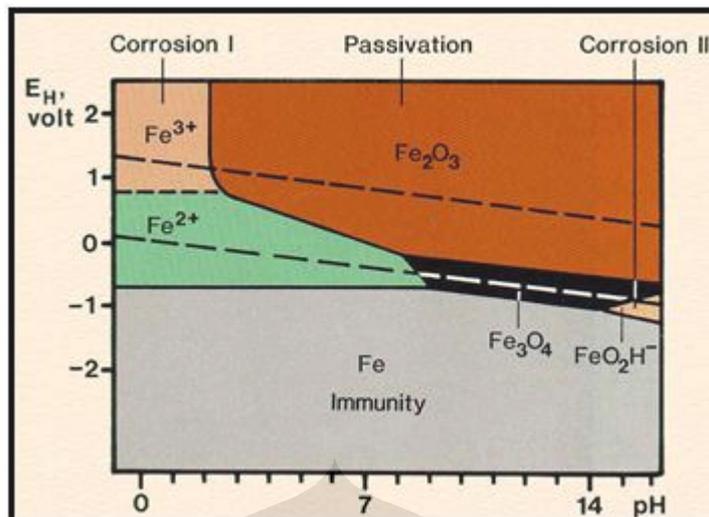
Baja merupakan material yang banyak digunakan untuk aplikasi pipa saluran air, khususnya *low carbon steel*. Dengan peningkatan karbon, kekerasan dan kekuatan akan meningkat sehingga *low carbon steel* digunakan karena memiliki sifat mekanis yang baik, mudah dibentuk atau difabrikasi dan harga yang relatif murah. Namun baja terdiri dari beberapa fasa dan terdapat ketidakhomogenan pada permukaan sehingga dapat menyebabkan lokal sel elektrokimia. Hal tersebut menyebabkan rendahnya ketahanan korosi dari baja karena reduksi katodik mudah terjadi sehingga menyebabkan *porous* sebagai produk korosi dan tidak terbentuk produk sampingan seperti lapisan pasif.⁽⁶⁾

Reaksi dari baja karbon terhadap korosi tanah tergantung pada sifat utama tanah dan faktor lingkungan, seperti kelembaban dan oksigen. Faktor tersebut dapat mempengaruhi laju korosi. Tanah dengan kadar air tinggi, konduktivitas elektrik tinggi, tingkat keasaman tinggi, larutan garam tinggi akan menjadi lingkungan yang sangat korosif.

Pengkaratan pada baja :⁽³⁾



Gambar 2.2 Proses Korosi Menunjukkan Kebalikan Proses Metalurgi⁽³⁾



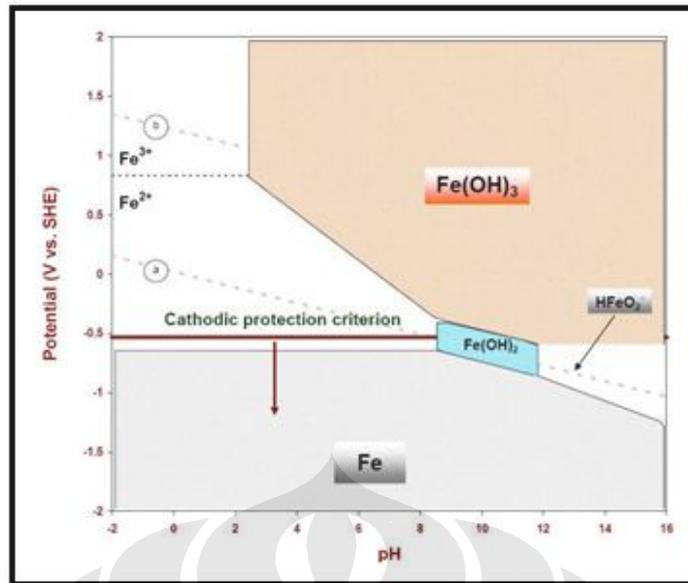
Gambar 2.3 Diagram Pourbaix Fe pada 25° C⁽²⁾

Proses korosi baja (Fe) secara termodinamika dapat diprediksi dengan menggunakan diagram pourbaix (potensial/V-pH). Pada potensial lebih positif dari **-0.6 dan pada** pH dibawah 9, ion ferrous (Fe^{2+} atau Fe II) merupakan zat yang stabil. Hal ini mengindikasikan bahwa Fe akan terkorosi pada kondisi tersebut. Pada daerah lain, dapat dilihat bahwa korosi Fe akan menghasilkan ion ferric (Fe^{3+} or Fe III), ferric hydroxide [$\text{Fe}(\text{OH})_3$], ferrous hydroxide [$\text{Fe}(\text{OH})_2$] dan pada kondisi yang sangat basa terbentuk ion kompleks HFeO_2^- . Produk korosi yang padat akan berbeda dari produk korosi sebelumnya, yaitu ferric oxide (Fe_2O_3) dan magnetite (Fe_3O_4).

Tabel 2.1 Produk Korosi pada Baja⁽¹⁹⁾

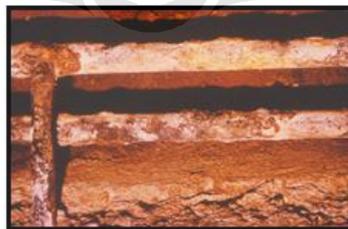
Senyawa	Warna	Oksidasi	Struktur
$\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ $\text{Fe}(\text{OH})_3$	Merah Kecoklatan	Fe^{3+}	Hematite
Fe_3O_4	Hitam	$\text{Fe}^{2+/3+}$	magnetite/lodestone
$\text{Fe}(\text{OH})_2$	Biru/Hijau	Fe^{2+}	Dapat larut, warna dapat berubah sesuai tingkat keasaman (pH)
FeO	Hitam	Fe^{2+}	pyrophoric

Sistem proteksi katodik berdasarkan NACE internasional (NACE RP-01-69"Section 6-Criteria for Cathodic Protection") memiliki kriteria potensial proteksi **-0,850 V vs Cu/CuSO₄** atau **-053 V vs. SHE**.



Gambar 2.4 Potensial Proteksi Katodik (-053 V vs. SHE)⁽²⁰⁾

Penggunaan baja di dalam tanah selalu menggunakan proteksi, karena tanpa proteksi, baja dapat mengalami *localized corrosion* atau *pitting*. Serangan korosi biasanya dihasilkan dari perbedaan sel-sel aerasi, seperti terhubung dengan jenis tanah yang berbeda, atau menghasilkan sel-sel galvanis yang terhubung dengan baja di dalam tanah, dan juga adanya *stray current flow* atau arus yang tersesat, yang dapat menjadi jalan bagi serangan *pitting*. Salah satu bentuk utama dari proteksi korosi adalah aplikasi dari *coating*. Tetapi *coating* biasanya jarang digunakan pada tanah karena bentuk fisiknya yang mudah cacat, sehingga diperlukan aplikasi lain seperti penggunaan proteksi katodik yaitu *impressed current*.⁽⁷⁾



Gambar 2.5 Korosi Tanah pada Pipa Saluran⁽⁷⁾

Pipa saluran air maupun gas yang terpendam dalam tanah dapat mengalami korosi dimana tidak terdeteksi hingga mengalami kebocoran seiring berjalannya waktu. Respon baja karbon terhadap korosi tanah tergantung dari sifat

tanah dan beberapa faktor lain seperti kelembaban dan oksigen. Tanah dengan kandungan air tinggi, konduktivitas listrik tinggi, keasaman tinggi, dan terdapat banyak garam terlarut oleh air karena aerasi yang buruk pada air akan memicu bakteri anaerob pereduksi sulfat.

2.1.3 Korosi pada Baja Galvanis

Ada dua alasan utama mengapa *zinc* digunakan sebagai protektif *coating* pada besi dan baja. Pertama, *zinc* sendiri secara alami memiliki ketahanan terhadap korosi pada kondisi atmosferik. Kedua, *zinc* cenderung bersifat elektronegatif terhadap besi sehingga akan berkorban untuk memproteksi. Galvanizing membentuk ikatan antara *zinc* dan material iron/steel yang merupakan barrier untuk material itu sendiri. Proteksi dengan galvanizing ini menggunakan prinsip proteksi katodik jika *coating* tersebut rusak. Ketika perbedaan potensial antara logam memacu *driving force* laju korosi, akan terjadi mekanisme korosi galvanik dengan kontak elektrolit.

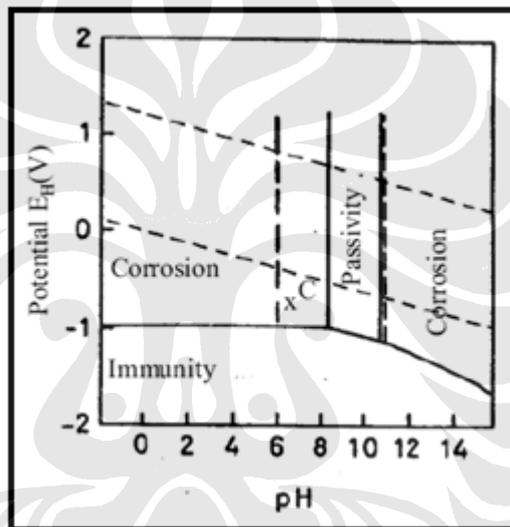
Selain itu metode *coating* atau lapisan galvanisasi secara umum memiliki keuntungan antara lain :⁽⁸⁾

- Bebas pemeliharaan hingga 50 – 100 tahun pada lingkungan atmosferik
- Performa yang cukup lama pada tanah, air dan lingkungan kimia
- Tidak perlu dilakukan ‘*touch-up*’
- Performa baik pada temperatur rendah dan tinggi
- Dapat di daur ulang

Ketahanan korosi logam *zinc* secara alami merupakan hal yang penting terhadap *coating zinc*. Sifat elektrokimia merupakan hal penting ketika lapisan *zinc* mengalami kerusakan dan terekspos dengan baja sehingga *zinc* akan

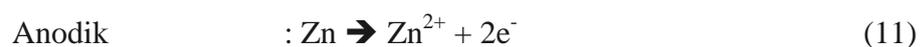
berkorban melindungi baja. Produk korosi dari *zinc* secara alami menutupi rusaknya coating dan mencegah korosi baja lebih lanjut.

Keefektifan dari proses *hot dip galvanizing* berasal dari perlindungan elektrokimia yang disediakan oleh *zinc*. *Zinc* sendiri termasuk logam yang relatif tahan terhadap korosi karena adanya lapisan tipis campuran dari oksida, karbonat, hidroksida *zinc* yang melindungi logam di bawahnya. Tingkat keparahan dari korosi galvanik tergantung pada rasio luas permukaan logam yang bersentuhan, lamanya pembasahan oleh larutan konduktif, dan konduktivitas dari elektrolit. Pada situasi dimana *zinc* terkorosi untuk melindungi baja, massa dari *zinc* yang tersedia akan menentukan performa dari perlindungan.



Gambar 2.6 Diagram Pourbaix untuk Zn

Zinc (Zn) memiliki daerah pasif untuk air tanpa adanya CO_2 seperti yang ditunjukkan pada diagram pourbaix Zn. Untuk pH antara 8,5 – 11, Zn akan bersifat pasif membentuk $\text{Zn}(\text{OH})_2$. Ketika CO_2 dibebaskan pada media korosif maka daerah pasif menjadi lebih besar dimana dapat dicapai pada pH antara 6 – 11 karena terbentuknya lapisan *film protective zinc carbonate* dimana lapisan ini kuat pada atmosfer pedesaan, agak agresif pada atmosfer perkotaan. Untuk pH <8-9, maka akan terjadi reaksi berikut :



Untuk *coating* Fe dengan Zn, tingkat korosi akan semakin besar pada daerah dekat lapisan penghalang Fe karena potensial pada daerah ini akan semakin besar. Untuk daerah yang besar/luas perlu diperhatikan bahwa peningkatan jarak dari Zn akan meningkatkan potensial dari permukaan baja dan pada jarak tersebut maka korosi akan terjadi karena peningkatan konduktivitas. Untuk mengatasinya, *coating* Zn harus langsung terkontak dengan elektrolit untuk memproteksi daerah lapisan penghalang Fe.

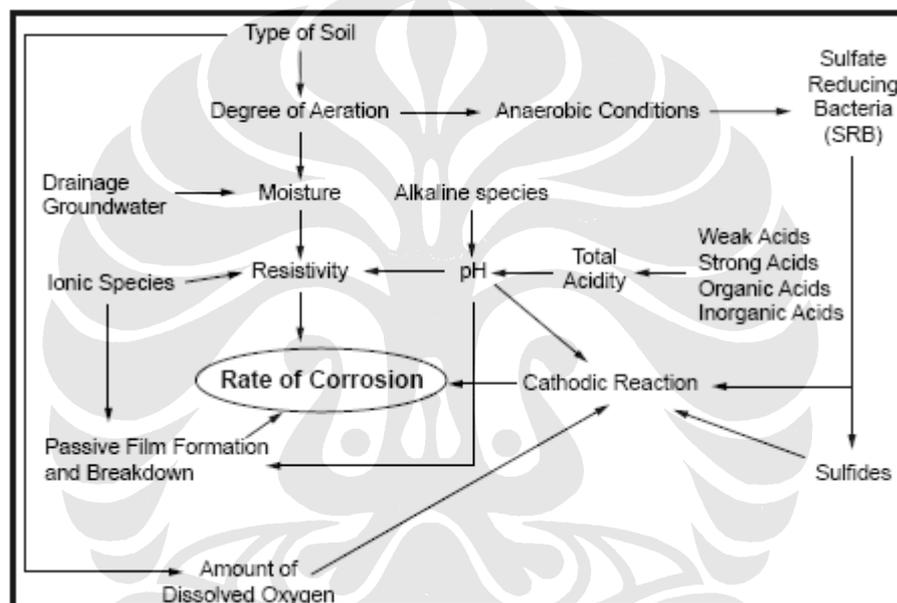
Galvanisasi berhasil digunakan untuk memproteksi baja pada lingkungan air (*fresh water*). *Fresh water* merupakan semua bentuk air kecuali air laut. *Fresh water* dapat diklasifikasikan sesuai asalnya seperti sungai, danau, industri maupun air kanal. Korosi zinc pada *fresh water* merupakan proses yang kompleks akibat banyaknya impurities pada air. Contohnya air hujan mengandung oksigen, nitrogen, karbon dioksida dan gas larut lainnya, juga penambahan partikel debu dan asap.

Air bawah tanah membawa mikroorganisme, erosi tanah, pembusukan tanaman, larutan garam seperti *calcium*, magnesium, *iron*, *manganese* dan suspensi bahan koloid. Semua substansi tersebut juga dipengaruhi faktor lain, seperti pH, temperatur dan pergerakan yang mempengaruhi struktur dan komposisi dari produk korosi yang terbentuk pada permukaan zinc. Perbedaan kecil pada kandungan atau kondisi *fresh water* dapat memproduksi perubahan substansi produk dan laju korosi.

2.2 KOROSI PIPA BAJA DALAM TANAH (*SOIL CORROSION*)

Tanah merupakan salah satu faktor lingkungan yang menyebabkan terjadinya korosi. Korosi pada tanah merupakan hal yang penting, terutama untuk struktur yang dipendam dalam waktu lama. Dengan demikian digunakan metode proteksi terhadap lingkungan akibat korosi tersebut. Contoh dari korosi pada tanah berhubungan dengan minyak, gas, pipa saluran air, *buried storage tank* (umumnya pada pangkalan gas), kabel listrik untuk komunikasi, sistem jangkar maupun casing sumur. Sistem-sistem tersebut diharapkan dapat beroperasi secara kontinu dalam waktu yang lama sehingga harus dilindungi dari korosi tanah.⁽⁹⁾

Korosi pada tanah merupakan fenomena yang kompleks, dengan berbagai *variable* yang saling terkait. Reaksi kimia yang terjadi melibatkan hampir setiap elemen yang berada pada tanah tersebut, dan banyak diantaranya yang belum diketahui secara tuntas. Variasi sifat dan karakteristik tanah merupakan faktor utama penyebab korosi pada struktur yang terpendam.⁽⁹⁾ Beberapa faktor yang dapat mempengaruhi laju korosi pada tanah antara lain tekstur dan struktur tanah, resistivitas, keasaman (pH), kelembaban (*moisture content*), kelarutan garam, aerasi (kandungan oksigen), kadar sulfat, kadar klorida, maupun aktivitas mikrobiologi.



Gambar 2.7 Hubungan antar faktor yang mempengaruhi korosi pada tanah⁽⁹⁾

2.2.10 Tekstur dan Struktur Tanah

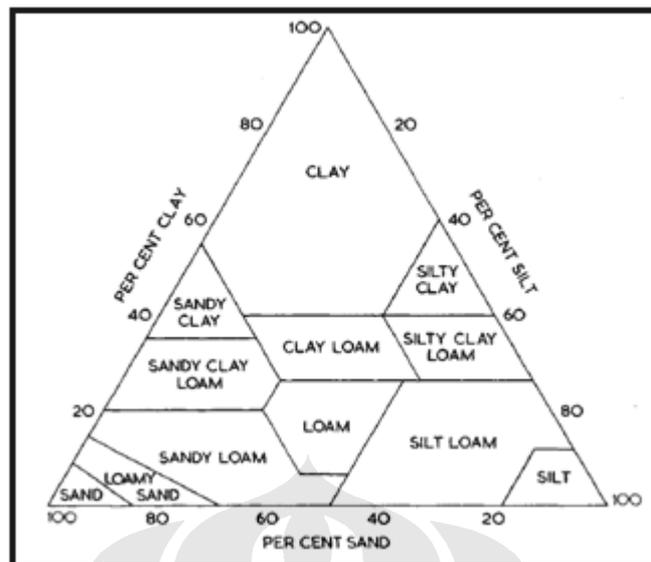
Tanah merupakan kumpulan mineral, bahan organik, air, dan gas (udara). Tanah terbentuk dengan kombinasi proses terjadinya cuaca (angin, air) maupun pembusukan organik. Contohnya, humus memiliki kandungan bahan organik yang sangat tinggi. Sedangkan pasir pantai tidak mengandung bahan organik. Variasi sifat dan karakteristik tanah dapat mempengaruhi terjadinya korosi pada sebuah struktur.⁽⁹⁾

Tanah dibedakan berdasarkan komposisi dan interaksi terhadap beberapa faktor terhadap lingkungan. Tanah pada umumnya diklasifikasikan tergantung dari *range* ukuran partikelnya, yaitu jenis pasir (*sand*), lumpur (*silt*), dan tanah liat (*clay*). Partikel berukuran antara 0.07 hingga 2 mm merupakan jenis pasir, lumpur mempunyai *range* 0.005 mm hingga 0.07, sedangkan tanah liat mempunyai *range* diameter 0.005 mm hingga berukuran koloid. Perbandingan ukuran antara ketiga jenis partikel tersebut akan menentukan perbedaan sifat tanah.⁽⁴⁾

Tabel 2.2 Ukuran Partikel pada Tekstur Tanah⁽⁹⁾

Category	Diameter (mm)
<i>Sand (very coarse)</i>	1.00-2.00
<i>Sand (coarse)</i>	0.50-1.00
<i>Sand (medium)</i>	0.25-0.50
<i>Sand (fine)</i>	0.10-0.25
<i>Sand (very fine)</i>	0.05-0.10
<i>Silt</i>	0.002-0.05
<i>Clay</i>	<0.002

Tekstur tanah merupakan distribusi partikel mineral dalam tanah tersebut. Tanah dengan kadar pasir yang tinggi memiliki kandungan air yang sedikit, sedangkan tanah liat mengandung banyak air. Saat ini tanah diklasifikasikan secara global, dapat digunakan pada banyak lokasi. Pada klasifikasi ini, tanah dipertimbangkan sebagai suatu individu tiga dimensi yang dapat disamakan terhadap sifat fisik, kimia, dan mineralogi.⁽⁹⁾



Gambar 2.8 Perbandingan ukuran pasir, lumpur, dan tanah liat membentuk klasifikasi tanah berdasarkan ukuran partikel⁽⁴⁾

Kondisi tanah ditentukan oleh tahapan evolusi tanah tersebut karena tanah dapat berkembang dan berubah sesuai berjalannya waktu. Faktor iklim seperti curah hujan, pergerakan udara, serta cahaya matahari dapat menyebabkan perubahan sifat tanah seiring waktu. Curah hujan sangat berhubungan dengan reaksi asam atau basa yang berkembang seiring perubahan struktur tanah. Ketika curah hujan tinggi, air tersaring ke dalam tanah dan melarutkan komponen terlarut. Keasaman yang terbentuk tergantung dari banyak faktor seperti mineral awal tanah tersebut, aktivitas biologi, dan temperatur, berhubungan dengan kondisi kelembaban. Curah hujan tinggi hingga sedang dengan temperatur hangat akan menurunkan aktivitas organik, kecuali jika kandungan air cukup banyak untuk mencegah maksimum aerasi untuk aktivitas mikrobiologi.⁽⁴⁾

2.2.11 Resistivitas

Resistivitas telah digunakan sebagai indikator utama terhadap korosi pada tanah. Saat transfer ion bereaksi dengan korosi pada tanah, resistivitas tanah yang tinggi akan memperlambat reaksi korosi. Resistivitas tanah berkurang dengan meningkatnya kandungan air dan konsentrasi ion. Resistivitas tanah memiliki pengaruh yang kuat terhadap laju korosi.⁽⁴⁾

Universitas Indonesia

Tingkat kekerasan korosi pada tanah berdasarkan resistivitas tanah dapat dilihat pada tabel berikut :

Tabel 2.3 Pengaruh Resistivitas Tanah terhadap Laju Korosifitas⁽⁹⁾

<i>Soil Resistivity (ohm cm)</i>	<i>Corrosivity Rating</i>
>20,000	<i>Essentially non-corrosive</i>
10,000 to 20,000	<i>Mildly corrosive</i>
5,000 to 10,000	<i>Moderately corrosive</i>
3,000 to 5,000	<i>Corrosive</i>
1,000 to 3,000	<i>Highly corrosive</i>
<1,000	<i>Extremely corrosive</i>

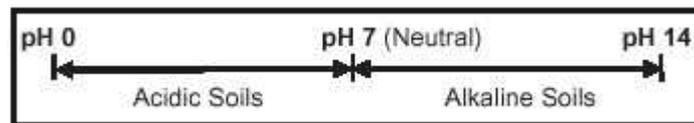
Pada umumnya, resistivitas tinggi (diukur dalam ohm-cm) akan menunjukkan laju korosi yang rendah. Resistivitas tanah meningkat dari beberapa faktor, contohnya tanah dengan partikel halus memiliki resistivitas rendah sehingga memudahkan terjadinya reaksi korosi.¹ Namun resistivitas tanah bukan satu-satunya parameter yang menyebabkan kerusakan korosi. Resistivitas tanah yang tinggi tidak menjamin keberadaan korosi.⁽⁹⁾

Konduktivitas tanah merupakan hal yang penting sebagai bukti mekanisme elektrokimia yang dapat digunakan untuk kontrol laju korosi. Konduktivitas yang tinggi akan mengakibatkan laju korosi yang tinggi. Konduktivitas tanah merupakan hal penting untuk *stray-current corrosion*.⁽⁴⁾

2.2.12 Keasaman (pH)

pH adalah sebuah ukuran dari derajat konsentrasi ion hidrogen.⁴ Tanah biasanya mempunyai pH antara 5-8 sehingga tidak terlalu berpengaruh terhadap laju korosi. Pada range tersebut, pH umumnya bukan *variable* dominan yang menyebabkan kecepatan korosi. Semakin asam sifat tanah menunjukkan resiko korosi yang serius terhadap baja, besi tuang, dan *zinc coating*. Tingkat keasaman tanah disebabkan oleh *leaching* mineral, dekomposisi tumbuhan (seperti pohon jarum), limbah industri, hujan asam, dan beberapa bentuk aktivitas mikrobiologi.

Tanah yang bersifat basa cenderung memiliki *sodium*, *potassium*, magnesium dan *calcium*. Kedua zat terakhir cenderung membentuk endapan kalsium pada struktur sehingga bersifat protektif terhadap korosi. Besar pH dapat mempengaruhi larutnya produk korosi dan aktifitas mikrobiologi.⁽⁹⁾



Gambar 2.9 Korosi Logam pada Tanah dipengaruhi pH⁽¹¹⁾

pH pada tanah juga merupakan hal penting karena mengandung nutrisi seperti Nitrogen (N), *Potassium (K)*, dan *Phosphorus (P)* yang dibutuhkan tumbuhan untuk berkembang. Jika pH tanah di bawah 5,5 maka tumbuhan dapat membentuk Nitrogen dalam bentuk nitrat. Sedangkan Phosphorus terbentuk pada pH tanah antara 6 dan 7.⁽¹¹⁾

Keasaman tanah menjadi bagian dari terbentuknya asam karbonat dari karbon dioksida akibat aktivitas biologi dan air. Selain itu, keasaman tanah juga disebabkan oleh perubahan cuaca, jenis mineral tanah, hilangnya kebasaaan atau elemen asli akibat leaching, terbentuknya keasaman organik dan inorganik akibat aktivitas mikrobiologi, pengeluaran akar, polusi terhadap tanah khususnya limbah industri.⁽⁴⁾

2.2.13 Kelembaban (*Moisture Content*)

Air merupakan elektrolit yang memicu reaksi elektrokimia sehingga menyebabkan korosi. Perbedaan tersebut disebabkan oleh aliran air jenuh dan tidak jenuh pada tanah yang berhubungan dengan pergerakan air dari daerah yang basah menuju daerah yang kering. Kejenuhan air tergantung dari ukuran dan distribusi pori, tekstur, struktur, dan bahan organik.⁽⁹⁾

Korosi pada tanah atau *soil corrosion* adalah jenis korosi *aqueous* dengan mekanisme elektrokimia. Namun kondisi pada tanah dapat menggeser atmosferik menjadi keadaan *immersed* tergantung dari kepadatan tanah dan kadar kristal air (*moisture content*). Walaupun mekanismenya merupakan elektrokimia, banyak karakteristik tanah yang akan meningkatkan korosifitas seperti hujan, iklim maupun reaksi pada tanah tersebut.⁽⁴⁾

Pada tanah, air dibutuhkan untuk ionisasi untuk oksidasi pada permukaan logam. Air juga dibutuhkan untuk ionisasi elektrolit tanah, untuk melengkapi sirkulasi aliran arus pada aktivitas korosi. Dengan demikian, air mempunyai pengaruh dalam terjadinya korosi pada tanah.⁽⁴⁾

Kelembaban tanah sangat penting terhadap mekanisme korosi, contohnya tanah yang mengandung pasir kering akan lebih tahan korosi dibandingkan tanah yang mengandung tanah liat basah. Tipe Kelembaban tanah antara lain :⁽⁴⁾

1. *Free ground water*

Air berada pada kedalaman tertentu, bervariasi dari beberapa meter hingga ratusan meter tergantung pembentukan geologi. Hanya sebagian kecil logam yang digunakan pada kondisi bawah tanah (*underground*) digunakan pada kondisi lingkungan air. Korosi pada kondisi ini adalah korosi lingkungan *aqueous*.

2. *Gravitational water*

Air masuk ke dalam tanah melalui permukaan dari hujan atau sumber lain bergerak ke bawah. Air gravitasi ini akan mengalir dengan kecepatan tertentu dipengaruhi struktur fisik meliputi pori-pori tanah pada berbagai daerah. Pada umumnya, air gravitasi ini tersaring dengan cepat hingga ke tingkat air tanah permanen.

3. *Capillary water*

Kebanyakan tanah terdiri dari beberapa jumlah air pada ruang kapiler pada partikel lumpur dan tanah liat. Jumlah aktual air tersebut dipengaruhi jenis tanah dan kondisi cuaca. Kelembaban kapiler tersebut merupakan penyimpanan air pada tanah yang akan di kirim kepada binatang maupun tumbuhan yang hidup di alamnya.

Pergerakan air dalam tanah dapat di ukur dengan mekanisme gravitasi, aksi kapilaritas, tekanan osmosis, dan interaksi elektrostatik dengan partikel tanah. Kapasitas pengikatan kelembaban dari tanah (*Moisture-holding capacity*) adalah kemampuan tanah untuk mengikat air yang ada dalam bentuk air kapiler. Kapasitas pengikatan air pada tanah sangat dipengaruhi oleh tekstur tanah. Tanah jenis pasir yang kasar akan mengandung sedikit air, sedangkan tanah jenis tanah liat yang halus akan mengandung banyak air. Contohnya tanah liat memiliki *moisture-holding capacity* yang lebih besar dari tanah jenis pasir. Derajat korosi yang di ukur pada tanah berhubungan dengan *moisture-holding capacity*. Namun hal ini merupakan hubungan yang kompleks sehingga digunakan untuk aplikasi prediksi.⁽⁴⁾

2.2.14 Kelarutan garam⁽⁴⁾

Air pada tanah dianggap sebagai larutan untuk garam pada tanah menghasilkan larutan tanah. Pada daerah dengan curah hujan besar, konsentrasi garam yang terlarut semakin kecil akibat mekanisme pelarutan (*leaching*). Sebaliknya, tanah pada daerah gersang akan mengandung banyak garam yang dibawa ke lapisan permukaan tanah oleh pergerakan air.

Pada umumnya, kation yang biasa terdapat pada tanah adalah *potassium*, *sodium*, magnesium dan *calcium*. Tanah yang bersifat basa memiliki kandungan *sodium* dan *potassium* yang tinggi, sedangkan tanah kapur terutama mengandung magnesium dan *calcium*. Garam dari empat elemen tersebut cenderung meningkatkan korosi logam. Elemen basa yang terkandung seperti *calcium*, magnesium, dan sebagainya akan membentuk oksida yang tidak larut dan karbonat pada kondisi bukan asam. Endapan tak larut tersebut akan menghasilkan lapisan protektif pada permukaan logam sehingga mengurangi aktivitas korosi.

Anion pada tanah memiliki peran yang sama pentingnya dengan kation. Kegunaan anion dalam proses adalah menguraikan kation dalam konduktivitas dan sel konsentrasi juga memiliki aksi tambahan jika bereaksi dengan kation dari logam dan membentuk garam yang tidak larut. Contohnya jika logam yang dipendam adalah timbal dan terdapat anion sulfat pada tanah, maka akan terbentuk

lapisan timbal sulfat yang tidak dapat larut, mengendap pada permukaan logam membentuk penghalang kehilangannya logam.

Hubungan penting lain antara garam pada tanah dan korosi adalah aktivitas biologi. Ketika tanaman tumbuh dan mikroorganisme tergantung dari kebutuhan nutrisi mineral inorganik yang akan membentuk variasi kandungan mineral pada tanah seperti sulfur dan sulfat yang berhubungan dengan aktivitas bakteri. Kandungan garam pada tanah juga dapat disebabkan oleh aktivitas manusia. Penyuburan tanaman akan memasukan banyak bahan kimia ke dalam tanah. Limbah industri seperti limbah garam akibat produksi industri minyak dan kondisi lain dapat merubah larutan tanah sehingga bereaksi dengan struktur logam.

2.2.15 Aerasi (Kandungan oksigen)

Selain kelembaban tanah, oksigen bebas akan mempengaruhi proses korosi. Oksigen berkombinasi dengan ion logam membentuk oksida, hidroksida dan garam logam. Volum air yang ada pada tanah berhubungan dengan konsentrasi oksigen yang ada di dalamnya. Pada tanah yang kering, kondisi menjadi aerob dan kecepatan difusi oksigen menjadi lebih cepat. Perubahan kering ke basah atau anaerob-aerob, akan meningkatkan laju korosi daripada pada lingkungan tanah yang konstan. Konsentrasi oksigen meningkat dengan fluktuasi air dan udara juga memacu variasi aktivitas biologi pada tanah.⁽⁴⁾

Konsentrasi oksigen berkurang seiring meningkatnya kedalaman tanah. Pada tanah yang bersifat netral atau basa, konsentrasi oksigen merupakan pengaruh penting terhadap laju korosi yang dapat membantu reaksi katodik. Selain itu, keberadaan mikroba, seperti bakteri penghilang Sulfatin (*Sulfate Reducing Bacteria*), dapat menyebabkan tingginya laju korosi walaupun dalam keadaan anaerob. Penggalian dapat meningkatkan derajat aerasi pada tanah. Potensial redoks merupakan dasar untuk mengukur derajat aerasi pada tanah. Potensial redoks yang tinggi menunjukkan semakin banyaknya kandungan oksigen. Jumlah redoks yang rendah menunjukkan kondisi konduktif terhadap aktifitas

mikrobiologi. Pengambilan sampel tanah mempengaruhi oksigen dan kestabilan redoks.⁽⁹⁾

Ruang pori pada tanah dapat mengandung air maupun gas. Aerasi pada tanah secara langsung berhubungan dengan ruang pori dan kandungan air. Tanah bertekstur halus dengan kandungan tanah liat yang tinggi memiliki partikel yang lebih padat dan memiliki kapasitas pori untuk difusi gas yang lebih sedikit dibandingkan tanah jenis pasir.⁽⁴⁾

Kandungan oksigen pada tanah merupakan hal menarik pada korosi. Secara umum diasumsikan bahwa gas di atas lapisan tanah adalah sama komposisinya dengan di dalam tanah, kecuali kandungan karbon dioksida yang tinggi. Pada kenyataannya, akar tanaman akan menyebabkan oksigen berpenetrasi ke dalam tanah dan dapat diasumsikan gas tanah tersebut berada pada kedalaman 6 m atau lebih mengandung jumlah oksigen yang signifikan.⁽⁴⁾

Difusi gas ke dalam tanah dapat dipengaruhi oleh iklim. Temperatur berubah dari pagi hingga malam menyebabkan ekspansi dan kontraksi gas ke permukaan tanah. Selain itu aktivitas biologi akan menurunkan kadar oksigen menggantikan oksigen dengan gas dari aktivitas metabolisme seperti karbon dioksida. Kebanyakan aktivitas biologi terdapat pada di atas 150 mm dalam tanah dan pada daerah tersebut difusi akan berjalan dengan cepat.⁽⁴⁾

2.2.16 Kadar Sulfat

Dibandingkan dengan efek korosi oleh ion klorida, sulfat umumnya lebih tidak berbahaya terhadap reaksi korosi material logam. Namun, beton dapat terserang oleh kadar sulfat yang tinggi. Keberadaan sulfat merupakan resiko utama terjadinya korosi jika dalam bentuk sulfida dengan adanya bakteri pengurang sulfat.⁽⁹⁾

2.2.17 Kadar Cl⁻

Ion klorida umumnya bersifat merusak ketika bereaksi dengan larutan anodik logam dan dapat menurunkan resistivitas tanah. Ion klorida dapat

ditemukan secara alami pada tanah akibat air tanah payau dan sejarah geologi dasar laut. Konsentrasi ion klorida pada elektrolit tanah dapat bervariasi sesuai dalam kondisi basah atau kering.⁽⁹⁾

2.2.18 Microbiologically Influenced Corrosion

Microbiologically influenced corrosion (MIC) adalah korosi yang diakibatkan adanya aktifitas dan metabolisme mikroorganisme. Bakteri, jamur dan mikroorganisme lain merupakan hal utama pada korosi tanah. Kasus korosi oleh mikroorganisme ini banyak terjadi pada paduan logam.⁽⁴⁾

Tabel 2.4 Karakteristik Bakteri pada Umumnya Berhubungan dengan Korosi Tanah (*Iron-based alloys*)⁽⁹⁾

Jenis	Kondisi Tanah	Aksi Metabolisme	Jenis Produksi	Keterangan
<i>Sulfate-reducing bacteria</i> (SRB)	Anaerobic, mendekati nilai pH netral, adanya ion sulfat. Biasanya bergabung dengan tanah liat	Mengkonversi sulfat menjadi sulfida	Iron sulfide, Hydrogen sulfide	Banyak terjadi pada korosi besi dan baja. Genus <i>desulfovibrio</i> tersebar luas
<i>Iron-oxidizing bacteria</i> (IOB)	Asam, aerobic	Oksidasi ion ferrous menjadi ion ferric	Sulfuric acid, Iron sulfate	Contohnya genus <i>Thiobacillus</i>
<i>Sulfur-oxidizing Bacteria</i> (SOB)	Asam, aerobic	Oksidasi sulfur dan sulfida membentuk sulfuric acid	Sulfuric acid	Umumnya genus <i>Thiobacillus</i>
<i>Iron bacteria</i> (IB)	Aerobic, mendekati nilai pH netral	Oksidasi ion ferrous menjadi ion ferric	magnetite	Contohnya genus <i>Gallionella</i> . Biasanya bergabung dengan deposit dan gejala pembentukan

Beberapa mikroorganisme berkembang dengan pesat pada kondisi aerob dan yang lain berkembang pada kondisi anaerob. Kondisi pH dan keberadaan

nutrisi memegang peranan untuk menentukan jenis mikroorganisme yang berkembang pada lingkungan tanah tersebut. Mikroorganisme berhubungan dengan korosi meliputi ⁽⁴⁾

- Bakteri anaerob, meningkatkan korosifitas akibat proses metabolisme
- Bakteri aerob, mengakibatkan korosi mineral asam
- Jamur, mengakibatkan korosi akibat metabolisme, seperti asam organik dapat mendegradasi *coating organic* dan kayu

2.3 GALVANISASI

Diperkirakan 40% produksi *zinc* di dunia digunakan untuk *hot-dip galvanizing* besi dan baja, dan hal ini cukup membuat *zinc* sebagai *coating* protektif terbanyak di dunia. *Zinc* tersebut digunakan karena pertimbangan mudah diaplikasikan, biaya rendah, dan ketahanan korosi tinggi. *Hot dip galvanizing* merupakan salah satu metode proteksi logam, yaitu *coating* atau pelapisan, yang berfungsi memisahkan struktur dari lingkungan yang korosif. Setiap pelapisan memiliki tujuan yang berbeda-beda, tergantung aplikasi dan jenis pelapisan itu sendiri. Dalam dunia industri, *coating* umumnya diberikan sebagai bagian dari proses *finishing*.⁽¹¹⁾



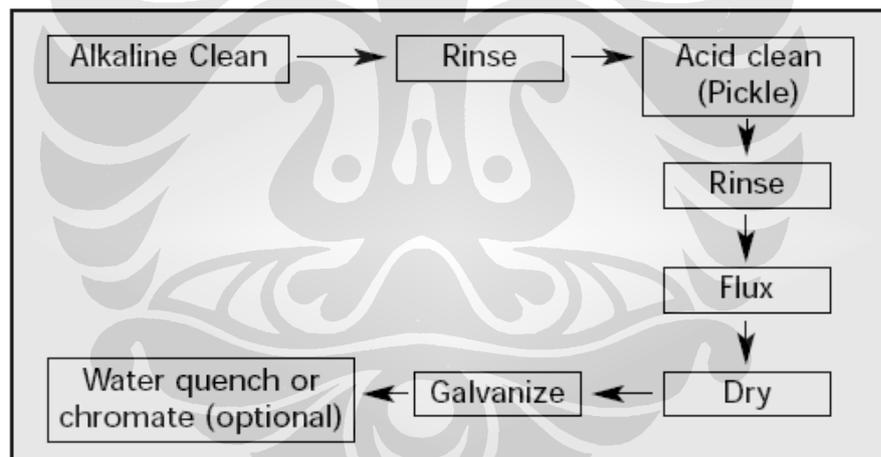
Gambar 2.10 Berbagai Proses Galvanizing⁽⁸⁾

Selain *hot-dip galvanizing*, proses galvanizing juga dapat dilakukan dengan cara *zinc-metallizing* dan *zinc-rich paints*. *Zinc-metallizing (plating)* adalah proses pemberian *zinc* melalui heated gun yaitu dengan pelelehan dan spray di atas

struktur menggunakan udara bertekanan (pembakaran gas). *Zinc-rich paints* merupakan pemberian partikel zinc menggunakan kuas maupun spray. Sedangkan *hot-dip galvanizing* merupakan proses pencelupan baja ke dalam lelehan zinc.⁽⁸⁾

2.4.5 Proses Hot Dip Galvanizing

Hot dip galvanizing adalah proses pelapisan dengan menggunakan zinc untuk material besi atau baja dengan mencelupkan material pada wadah (*bath*) yang di dalamnya terdapat lelehan *zinc*. Proses ini banyak dijumpai pada hampir semua industri besar yang melibatkan penggunaan besi atau *mild steel*, seperti proses kimia, kertas, otomotif dan industri transportasi. Proses *hot-dip galvanizing* terdiri dari tiga tahapan umum yaitu preparasi permukaan, galvanizing dan inspeksi.⁽¹²⁾

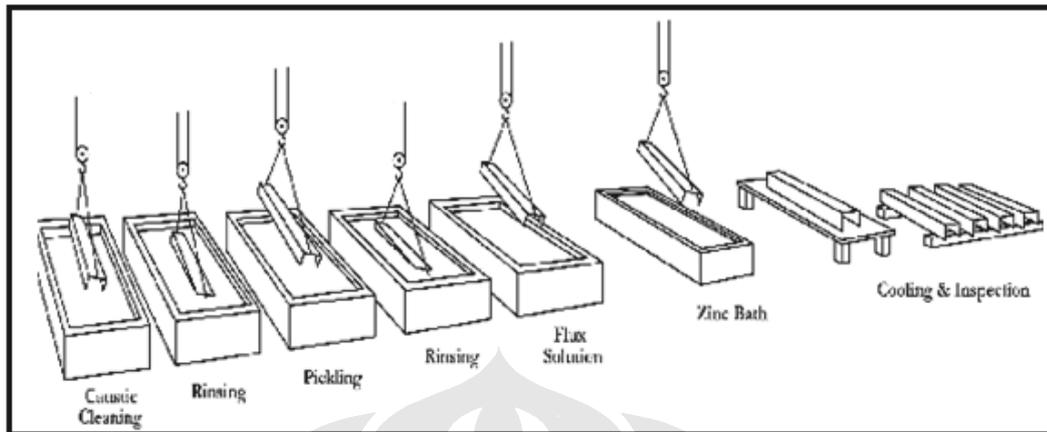


Gambar 2.11 Tahapan Proses Hot-Dip Galvanizing⁽¹²⁾

2.4.5.1 Preparasi Permukaan

Preparasi permukaan merupakan hal yang paling penting dalam pemberian coating. Jika preparasi permukaan salah atau tidak tepat maka akan menyebabkan coating tersebut mengalami kegagalan sebelum waktu umur pakainya. Kegagalan juga terjadi saat baja dicelupkan ke lelehan *zinc*, maka bagian baja yang belum

bersih akan tidak tercoating. Proses preparasi permukaan terdiri dari tiga tahapan yaitu *caustic cleaning*, *acid pickling* dan *fluxing*.⁽¹²⁾



Gambar 2.12 Tahapan Preparasi Permukaan *Hot-Dip Galvanizing*⁽¹³⁾

- *Caustic Cleaning (Degreasing)*

Larutan basa yang panas biasanya digunakan untuk memindahkan kontaminasi organik seperti kotoran, bekas cat, lemak dan minyak dari permukaan logam. *Epoxies*, *vinyls*, *asphalt* maupun *welding slag* harus dihilangkan sebelum tahap galvanizing dengan grit-blasting, sand-blasting atau cara mekanik lainnya.



Gambar 2.13 Proses Caustic Cleaning⁽⁸⁾

- *Pickling*

Kerak (*scale*) dan karat dihilangkan dari permukaan logam dengan pickling dalam larutan hot sulfuric acid atau ambient temperature *hydrochloric acid*. Preparasi permukaan juga bisa melalui *abrasive cleaning* sebagai alternatif dari *chemical cleaning*. *Abrasive cleaning*

Universitas Indonesia

merupakan proses dimana pasir, penembakan logam atau grit terhadap baja dengan *air blasts* atau *rotating wheels*.

- *Fluxing*

Fluxing merupakan tahapan preparasi terakhir untuk menghilangkan oksida dan mencegah oksida lebih lanjut terbentuk pada permukaan logam. Metode pemberian flux tergantung dari penggunaan proses *galvanizing* basah atau kering. Pada proses *galvanizing* kering, baja dicelupkan (*pre-fluxed*) ke dalam lautan *zinc ammonium chloride* kemudian dikeringkan sebelum dicelup ke lelehan *zinc*. Sedangkan pada proses *galvanizing* basah, cairan *zinc ammonium chloride* diapungkan di atas lelehan *zinc*. Kemudian baja akan melewati flux menuju lelehan *zinc*.

2.4.5.2 Galvanizing

Pada tahapan ini, material seluruhnya dicelupkan kedalam wadah yang berisi minimum 98% lelehan *zinc* murni. Menurut *American Society for Testing and Materials* (ASTM) spesifikasi B 6. Temperatur wadah dijaga sekitar 840 F (449° C). Produk yang difabrikasi dicelupkan hingga mencapai temperatur wadah. Logam *zinc* bereaksi dengan permukaan besi atau baja membentuk *zinc/iron intermetallic alloy*. Kemudian produk diangkat perlahan dari wadah, kelebihan *zinc* dihilangkan *draining, vibrating/centrifuging*.



Gambar 2.14 Pengangkatan Produk dari Lelehan *Zinc*⁽⁸⁾

Reaksi metalurgi yang dihasilkan dari pembentukan dan struktur lapisan *zinc/iron alloy* berlanjut hingga produk di angkat dari wadah, selama temperatur produk mendekati temperatur wadah. Produk didinginkan pada air maupun udara sesegera mungkin setelah di angkat dari wadah. Akibat proses *galvanizing*

mencelupkan semua bagian material, maka semua permukaan akan tercoating. *Galvanizing* memberikan proteksi baik pada bagian luar maupun bagian dalam struktur (pipa).

2.4.5.3 Inspeksi

Dua karakteristik *coating hot-dip galvanizing* yang dipertimbangkan setelah proses adalah ketebalan coating dan penampakan coating. Sejumlah variasi fisik dan pengujian laboratorium dapat digunakan untuk menentukan ketebalan, keseragaman, dan penampakan. Proses inspeksi untuk produk galvanis ini termasuk mudah dan cepat, juga hanya membutuhkan sedikit buruh. Hal ini termasuk penting karena menentukan kualitas produk.

Produk galvanis dikeluarkan, diterima dan disetujui dengan standar seperti ASTM, *Canadian Standards Association* (CSA), dan *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO). Standar tersebut meliputi semua persyaratan untuk minimum ketebalan coating untuk berbagai kategori maupun komposisi *zinc* yang digunakan pada proses

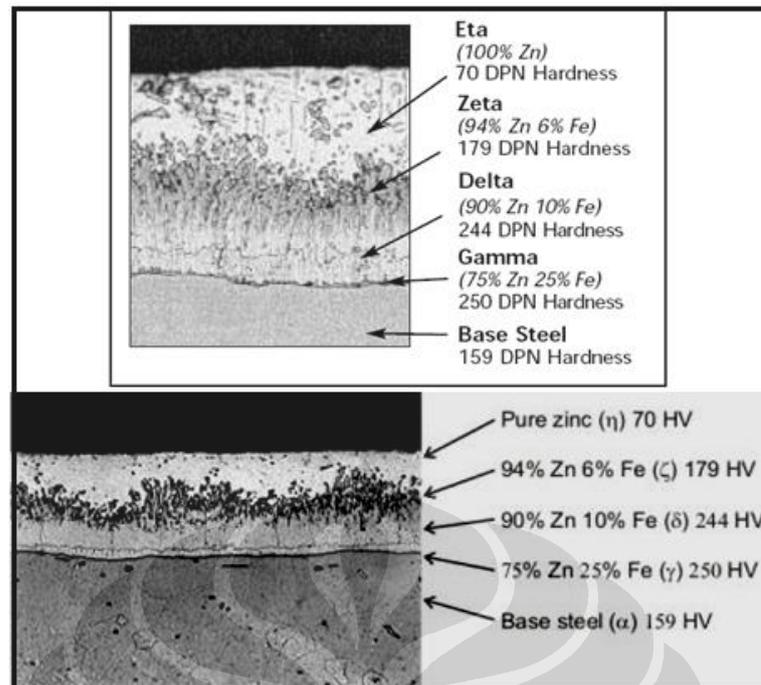


Gambar 2.15 Inspeksi Proses *Hot Dip Galvanizing*⁽⁸⁾

2.4.6 Sifat Fisik Coating Galvanis

2.4.6.1 Ikatan Metalurgi

Galvanizing membentuk ikatan metalurgi antara *zinc* dan besi/baja yang merupakan penghalang (*barrier*) bagi logamnya sendiri. Selama *galvanizing*, lelehan *zinc* bereaksi dengan besi/baja membentuk rangkaian lapisan *zinc/iron alloy*. Dari foto mikro ditunjukkan bahwa coating galvanis terdiri dari tiga lapisan paduan dan lapisan *zinc* murni



Gambar 2.16 Foto Mikro *Coating Galvanis*⁽¹²⁾

2.4.6.2 Ketahanan Impak dan Abrasi

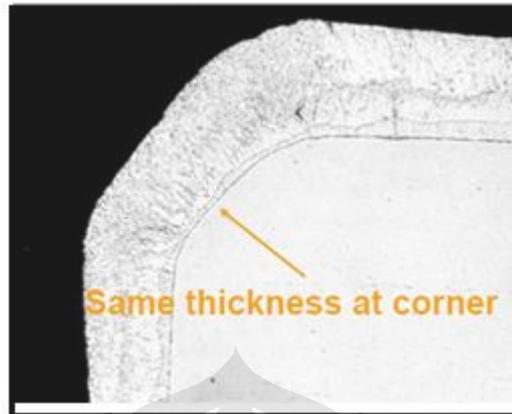
Dari gambar diatas, terdapat nilai kekerasan *Diamond Pyramid Number* (DPN). DPN merupakan sebuah pengukuran kekerasan yang semakin maju. Semakin besar nilai DPN, maka kekerasan semakin tinggi. Khususnya Gamma, Delta, lapisan Zeta *layers* lebih keras dibandingkan baja dasarnya. Kekerasan dari lapisan tersebut memiliki pengecualian rusaknya proteksi coating terhadap abrasi. Lapisan Eta dari coating galvanis bersifat sedikit *ductile* sehingga menyediakan ketahanan impact.

Kekerasan, keuletan dan keseragaman akan menghasilkan proteksi yang tidak sama sehingga dapat rusak selama penggunaan. Jika coating galvanis rusak, maka akan terjadi prinsip proteksi katodik terhadap baja. Zinc akan menyediakan proteksi katodik selama coating tersisa.

2.4.6.3 Proteksi *Coner & Edge*

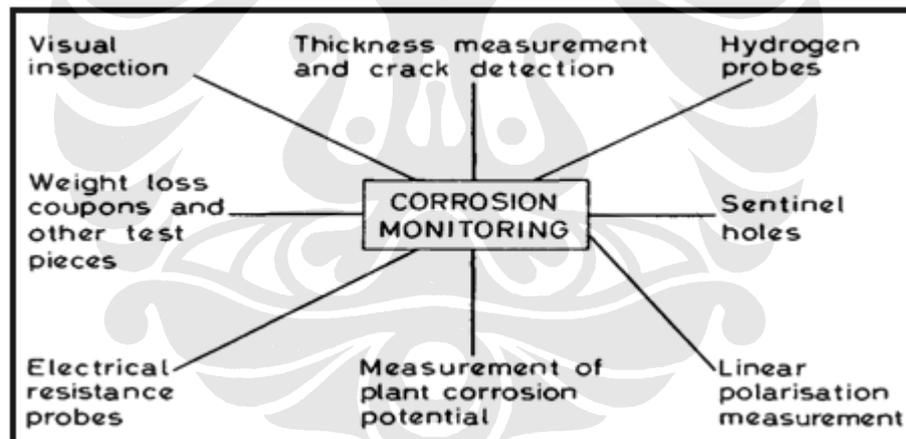
Proses galvanizing secara alami menghasilkan coating atau lapisan yang paling tidak ketebalannya sama pada bagian pojok (*corner*) dan pinggir (*edge*)

maupun seluruh bagian produk. Kebanyakan coating mengalami kerusakan pada bagian pinggir, sehingga membutuhkan proteksi tambahan.



Gambar 2.17 Foto Mikro *Galvanized Edge*⁽⁸⁾

2.5 MONITORING KOROSI



Gambar 2.18 Teknik Monitoring Korosi pada *Plant Proses*⁽⁹⁾

Pengujian korosi dapat diklasifikasikan menjadi tiga jenis utama yaitu :⁽¹¹⁾

1. Pengujian laboratorium, dimana kondisi dapat ditentukan dan dikontrol secara tepat.
2. Pengujian lapangan (pengujian pada lingkungan aslinya), dimana replika sampel pengujian logam atau paduan yang disebut *coupon test* atau *specimen* terekspos ke kondisi lingkungan aktual dalam kondisi servis, misalnya atmosfer, tanah (*ground*), laut dan sebagainya.

Universitas Indonesia

3. Pengujian saat aplikasi, dimana *specimen* pengujian yang biasanya mengambil bentuk komponen manufaktur terekspos ke sebagian kondisi yang digunakan, misalnya pada proses pengaliran di *plant* kimia.

2.5.1 Uji Kehilangan Berat (*Weight Loss Test*)

Weight-loss coupons adalah metode monitoring korosi yang paling banyak digunakan dan paling banyak disalahgunakan. Teknik tersebut disalahgunakan dengan kebiasaan mengulangi kesalahan bahwa *coupon* ditempatkan pada posisi terdapatnya aliran fluida di sekitarnya sehingga tidak representatif dengan peralatan yang disimulasikan seharusnya. Pada kasus *sacrificial alloy coatings* dimana terdapat komponen korosi yang berat jenisnya berbeda dari paduannya, maka lebih baik menggunakan berat jenis dari komponen yang terkorosi (daripada berat jenis paduannya) untuk menghitung kehilangan tebal rata-rata.

Corrosion coupons kemungkinan paling banyak digunakan untuk material konstruksi untuk mendeteksi serangan permanen dari perubahan korosifitas. *Coupons* menggambarkan kerusakan korosi selama periode waktu dan hanya digunakan pada kondisi dimana peningkatan laju korosi dapat diukur. Bentuk dan dimensi *coupon* dapat bervariasi sesuai persyaratan pengujian. Sebelum *coupon test* diletakkan pada lingkungan pengujian selama periode tertentu, maka produk korosi yang terbentuk sebelumnya harus dihilangkan. Metode penghilangan produk korosi dapat dilakukan tanpa menyebabkan korosi lebih lanjut atau kerusakan pada *specimen*. Ada banyak metode untuk pembersihan *specimen* yang terkorosi, dapat diklasifikasikan sebagai berikut :⁽¹¹⁾

1. *Mechanical treatment.*

- *Scrubbing with bristle brush.*
- *Scraping.*
- *Wire brushing.*
- *Grit, shot sand blasting.*

2. *Chemical treatments.*

- *Organic solvents.*

- *Chemical reagents.*

3. *Electrolytic treatments.*

- *Sulphuric acid.*
- *Citric acid.*
- *Potassium cyanide.*
- *Caustic soda.*

Untuk menentukan berat yang hilang dari logam dasarnya, pembersihan produk korosi sebaiknya dilakukan dengan prosedur yang sama seperti pembersihan awal. Dengan menimbang sebelum dan sesudah pembersihan, hasil berat logam yang hilang dari pembersihan dapat digunakan untuk membenarkan berat korosi yang hilang. Pengikisan produk korosi sampel juga diperlukan sebelum menggunakan teknik kimia untuk menghilangkannya. Pengikisan ini kemudian dapat dianalisa, misalnya *X-ray diffraction* untuk menentukan bentuk kristal sebaik analisa kimia untuk melihat *specific corrodants* seperti klorida.

Penilaian kerusakan korosi dapat dilakukan dengan menjumlahkan daerah permukaan specimen dan berat yang hilang selama pengujian ditentukan. Laju korosi rata-rata kemudian dapat diperoleh dengan :⁽¹⁷⁾

$$\text{Corrosion Rate} = (K \times W) / (A \times T \times D) \quad (3.1)$$

Keterangan :

K = konstanta, lihat pada Tabel 2.5

T = *time of exposure* (jam)

A = luas daerah (cm²)

W = kehilangan berat (gram)

D = density (g/cm³), misalnya baja karbon = 7,86 g/cm³ ; Zinc = 7,13 g/cm³

Tabel 2.5 Konstanta Perhitungan Laju Korosi Berdasarkan Satuannya

Satuan Laju Korosi/ <i>Corrosion Rate</i>	Konstanta
Mils per year (mpy)	$3,45 \times 10^6$
Inches per year (ipy)	$3,45 \times 10^3$
Milimeters per year (mm/y)	$8,76 \times 10^4$
Micrometers per year ($\mu\text{m}/\text{y}$)	$8,76 \times 10^7$

Jika konstanta pada tabel tersebut tidak digunakan, laju korosi juga dapat dihitung dengan konversi manual. Contohnya, jika logam yang digunakan adalah baja dengan jumlah elektron = 2, massa atom = 55.85 g dan berat jenis = 7.88 g cm^{-3} , maka konversinya adalah sebagai berikut :

Tabel 2.6 Konversi Perhitungan Laju Korosi

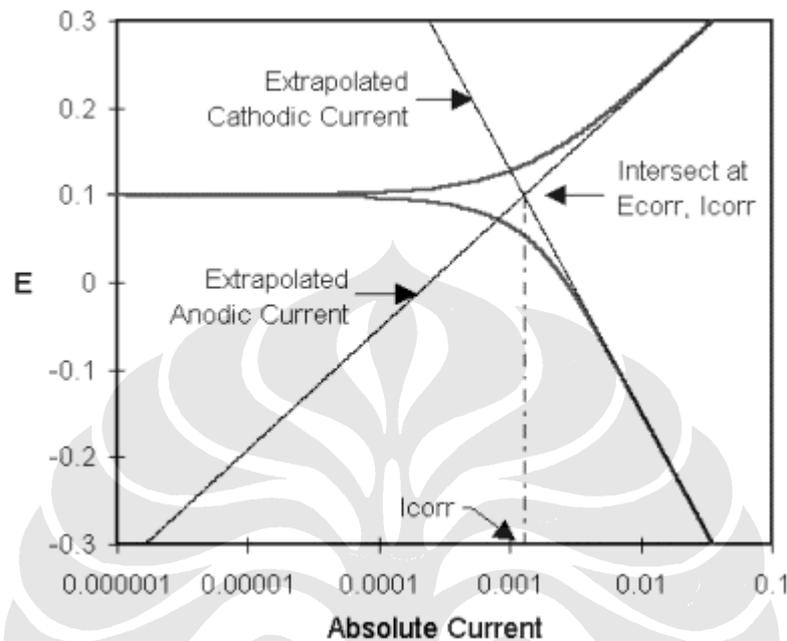
	mA cm^{-2}	mm year^{-1}	mpy	$\text{g m}^{-2} \text{day}^{-1}$
mA cm^{-2}	1	11.6	456	249
mm year^{-1}	0.0863	1	39.4	21.6
mpy	0.00219	0.0254	1	0.547
$\text{g m}^{-2} \text{day}^{-1}$	0.00401	0.0463	1.83	1

2.5.2 Uji Polarisasi

Tafel plots atau bagian linear dari polarisasi *logcurrent* anodik atau katodik dan *plot* potensial di ekstrapolasi memotong garis potensial korosi. Laju korosi yang rendah secara umum dapat diukur dengan cepat. Laju korosi biasanya ditentukan dengan kesetimbangan antara reaksi elektrokimia yang berlawanan. Reaksi anodik merupakan peristiwa logam teoksidasi dan melepaskan elektron dan reaksi katodik merupakan peristiwa dimana larutan (umumnya O_2 atau H^+) mengalami reduksi, memindahkan elektron dari logam. Ketika kedua reaksi ini berada dalam kesetimbangan, aliran elektron dari setiap reaksi akan seimbang dan tidak ada aliran elektron (arus listrik) terukur.

Dari gambar, sumbu vertikal adalah potensial dan sumbu horizontal adalah

logaritma dari arus yang terbentuk. Teori mengenai arus anodik-katodik dijelaskan dengan garis lurus. Kurva garis merupakan total arus yaitu penjumlahan dari arus anodik dan katodik.



Gambar 2.19 Proses Korosi menunjukkan Arus Anodik & Katodik

Potensial logam didapatkan dimana reaksi anodik dan katodik seimbang. Kesetimbangan potensial didapatkan akibat hubungan listrik terhadap logam (pengukuran E_{corr}). Penjumlahan dari arus anodik dan katodik pada E_{corr} merupakan arus korosi (I_{corr}). Namun, I_{corr} tidak dapat diukur secara langsung sehingga diperlukan teknik elektrokimia. Hal tersebut juga berlaku pada penentuan laju korosi (*corrosion rate*). Berikut merupakan persamaan tafel yang digunakan pada percobaan polarization resistance :

$$I_{corr} = (1/R_p) \beta_a \beta_c / (2.303 (\beta_a + \beta_c)) \quad (2.3)$$

Keterangan : I_{corr} = arus korosi (A)

R_p = polarization resistance

β_a = anodic Beta Tafel Constant in volts/decade

β_c = cathodic Beta Tafel Constant in volts/decade

$$\boxed{CR = I_{corr} K EW / D A} \quad (2.4)$$

Keterangan :

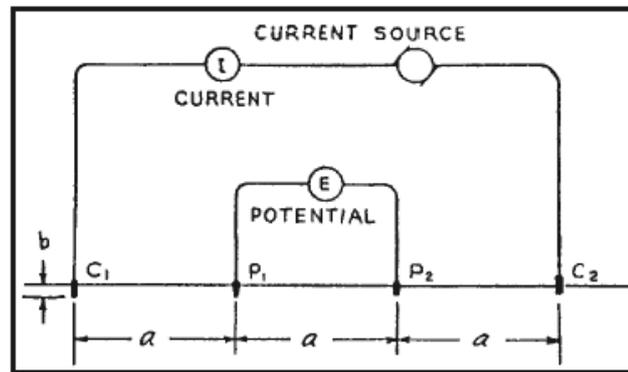
- CR = laju korosi (corrosion rate)
- K = konstanta, menjelaskan unit laju korosi
- EW = berat ekivalen (gram/equivalent)
- D = berat jenis (gram/cm³)
- A = luas permukaan (cm²)

2.5.3 Uji Resistivitas Tanah

Tingkat korosifitas dapat ditentukan dengan mengetahui nilai resistivitas dari tanah tersebut. Satuan yang dipakai untuk nilai resistivitas tanah adalah ohm-cm. Resistivitas dari suatu tanah secara numerik adalah nilai tahanan dari tanah berbentuk kubus dengan dimensi 1 cm. Resistivitas tanah dapat diukur dengan teknik Wenner *four-pin technique* atau dengan pengukuran elektromagnetik. Selain itu pengukuran resistivitas tanah juga dapat dilakukan dengan metode *soil box* dimana sampel diambil selama penggalian.

Detil operasi dari metode 4 terminal ini sangat beragam tergantung peralatan pengukur yang digunakan tetapi prinsip pengukurannya sama. Nilai tahanan tanah diukur antara 2 elektroda terdalam, sedangkan 2 elektroda terluar berfungsi sebagai penghantar arus kedalam tanah. Nilai tahanan yang didapat merupakan nilai rata-rata terhadap kedalaman tanah dimana sama dengan jarak antar elektroda. Pada umumnya dengan semakin dalamnya tanah, harga tahanan tanah akan mengalami penurunan.

Untuk mengukur resistivitas dari sampel tanah yang banyak/luas serta pada kedalaman tertentu, yang umum digunakan adalah metode Wenner dengan menggunakan 4 terminal. Dimana nilai resistivitas dari kedalaman tanah kurang lebih sama dengan jarak antar elektroda.



Gambar 2.20 Sirkuit dasar metode Wenner, jarak (b), kedalaman elektroda harus lebih kecil dibandingkan (a).

Persamaan Wenner :

$$\rho = 2\pi AR$$

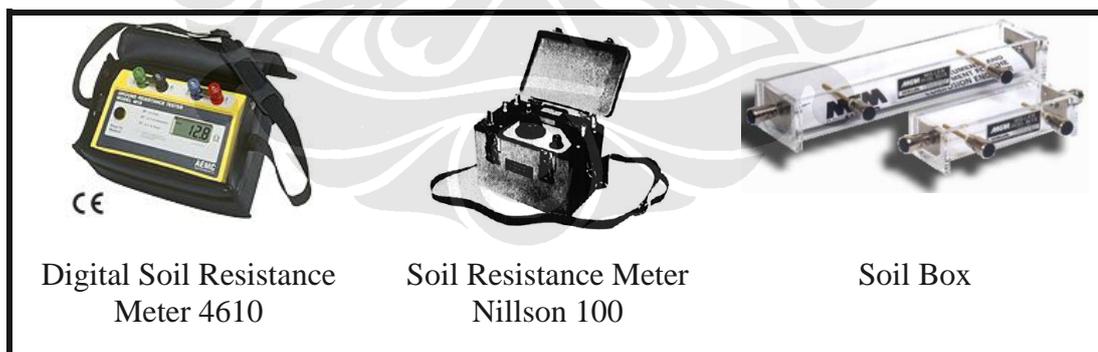
(2.4)

Keterangan :

R = tahanan tanah yang terbaca pada layar pengukuran

A = jarak antar pin (cm)

ρ = resistivitas tanah (Ωcm)



Gambar 2.21 Beberapa Jenis Pengukur Resistivitas

2.5.4 Penilaian Umur Struktur (*Life Assessment*)

Pada struktur baja yang terpendam, terdapat dua hal utama yaitu umur *coating* protektif dan laju korosi dari baja tersebut. Pada coating logam, khususnya *galvanizing*, biasanya terjadi kerusakan akibat oksidasi atau degradasi

Universitas Indonesia

kimia. Kecepatan degradasi tersebut berhubungan dengan ketebalan coating yang diaplikasikan sehingga merupakan fungsi dari laju korosi.

Contohnya, struktur baja memiliki ketebalan 2 mm dengan ketebalan *hot dip galvanized coating* minimal 85 mikron, bagian dalam dan luar. *Coating* galvanis memiliki laju korosi 6 *micron per year* dan struktur baja memiliki laju korosi 30 *micron per year* sehingga dapat di perkirakan umur stuktur maupun coating seperti berikut :

Tabel 2.7 Contoh Perhitungan Umur Struktur/*Coating*

Umur Coating Galvanis	$(85 \text{ micron coating}) / (6 \text{ micron/year})$	12 tahun
Umur Baja Terkorosi	$(2 \text{ mm}) / (30 \text{ micron/year})$	67 tahun
	Total	79 tahun