

## **BAB III**

### **LANDASAN TEORI**

#### **3.1 Material Logam**

Logam merupakan bahan yang dapat ditempa dan dipadu dengan unsur logam lain dengan kadar tertentu untuk mendapatkan sifat fisik dan mekanik yang diinginkan. Berdasarkan komposisinya logam dibagi menjadi dua, yaitu logam murni yang hanya terdiri dari satu unsur dan paduan logam (*metal alloy*) yang terdiri dari dua atau lebih unsur logam.

Pada industri minyak dan gas, logam dapat dimanfaatkan untuk pipa transportasi. Pemilihan paduan logam pada pipa transportasi disesuaikan dengan fluida yang dialirkan, contohnya untuk transportasi minyak menggunakan pipa baja (*carbon steel*) dan untuk fluida bersuhu tinggi menggunakan pipa *stainless steel*.

##### **3.1.1 Baja Karbon (*Carbon Steel*)**

Baja karbon merupakan salah satu jenis baja paduan yang terdiri atas unsur besi (Fe) dan karbon (C). Besi ini merupakan komposisi utama sedangkan karbon sebagai unsur paduannya. Dalam proses pembuatan baja akan ditemukan pula penambahan kandungan unsur kimia lain seperti sulfur (S), fosfor (P), silikon (Si), mangan (Mn) dan unsur kimia lainnya sesuai dengan sifat baja yang diinginkan. Baja karbon memiliki kandungan unsur karbon dalam besi sebesar 0,2% hingga 2,14% dan kandungan karbon tersebut berfungsi sebagai unsur pengeras dalam struktur baja.

Dalam pengaplikasiannya baja karbon sering digunakan sebagai bahan baku untuk pembuatan alat – alat perkakas, komponen mesin, struktur bangunan

dan lain sebagainya. Baja karbon dapat diklasifikasikan menjadi 3 (tiga) berdasarkan kandungan karbonnya. Klasifikasi baja karbon adalah sebagai berikut:

1. *Low Carbon Steel*

*Low carbon steel* mempunyai kadar karbon di bawah 0,3%, memiliki keuletan dan ketangguhan yang baik, tetapi memiliki sifat kekerasan dan ketahanan aus yang rendah. Baja karbon rendah ini mempunyai kekuatan luluh 275 Mpa ( 40.000 Psi ) dan memiliki kekuatan tarik 415 dan 550 Mpa. *Low carbon steel* digunakan sebagai bahan baku pembuatan komponen struktur bangunan, pipa, jembatan, *body* mobil dan lain – lainnya.

2. *Medium Carbon Steel*

*Medium carbon steel* mempunyai kadar karbon 0,3% - 0,59%. Baja karbon sedang memiliki sifat mekanis yang lebih kuat dengan tingkat kekerasan yang lebih tinggi daripada baja karbon rendah. Baja karbon sedang dapat digunakan dalam pembuatan rel kereta api, roda gigi, baut, pipa minyak, pegas dan komponen mesin lainnya.

3. *High Carbon Steel*

*High carbon steel* mempunyai kadar karbon lebih dari 0,6 %. Baja karbon tinggi memiliki ketahanan panas, kekerasan, serta kekuatan tarik yang sangat tinggi, tetapi memiliki keuletan yang lebih rendah. Baja karbon tinggi dapat digunakan dalam pembuatan alat – alat perkakas seperti palu, gergaji, pembuatan kikir, pisau cukur dan lain – lain.

### 3.1.2 *Stainless Steel*

*Stainless steel* merupakan baja paduan yang terdiri atas unsur besi (Fe), kromium (Cr), karbon (C), *molybdenum* (Mo), nikel (Ni). *Stainless steel* dapat bertahan dari pengaruh oksidasi karena adanya kandungan kromium yang menjadi pelindung permukaan baja.

*Stainless steel* diklasifikasikan menjadi beberapa jenis, di antaranya adalah sebagai berikut :

1. Baja Tahan Karat Martensit

Baja tahan karat martensit memiliki komposisi 12 – 13% Cr dan 0.1 – 0.3% C. Kadar Cr 12 – 13% adalah batas terendah untuk ketahanan asam karena itu baja ini sukar berkarat di udara. Baja tahan karat martensit dapat dipakai sampai dengan suhu 500<sup>0</sup>C. Baja ini dapat dipakai untuk alat pemotong, perkakas dan lain – lain.

2. Baja Tahan Karat Ferit

Baja tahan karat ferit memiliki komposisi kromium (Cr) sekitar 16 – 18% atau lebih. Komponen baja ini pada umumnya dibuat dari pelat tipis sebagai bahan untuk bagian dalam dari suatu konstruksi, peralatan dapur, komponen trim mobil bagian dalam dan lain – lain.

3. Baja Tahan Karat Austenit

Baja tahan karat austenit memiliki kandungan 18 % kromium (Cr) – 8% Ni. Baja tahan karat austenit memiliki ketahanan korosi yang lebih baik, kemampuan untuk dibentuk dan kemampuan untuk dilakukan pengelasan. Baja ini dapat dimanfaatkan sebagai bahan konstruksi, turbin, mesin jet, bangunan kapal, reaktor atom dan lain – lain.

### 3.1.3 Paduan Nikel

Nikel (Ni) adalah logam yang berwarna perak keabu – abuan yang mempunyai sel satuan kubus berpusat muka dengan massa jenis 8,7. Nikel (Ni) memiliki kekuatan tarik sebesar 45 – 55 Kgf/mm<sup>2</sup>, perpanjangan sebesar 40- 50%, dan kekerasannya 80-90 brinell. Nikel memiliki ketahanan panas dan korosi yang baik. Nikel memiliki ketahanan yang baik dengan air sungai, air laut dan alkali tetapi, dapat rusak oleh asam nitrat.

Adapun contoh dari paduan nikel adalah sebagai berikut :

1. Paduan Ni – Cu

Paduan Ni – Cu memiliki ketahanan korosi yang baik dan dapat digunakan sebagai komponen khusus dari kondensor, komponen pompa, komponen motor, dan lain – lain. Adapun Contoh paduan Ni - Cu adalah tembaga putih (Cu-10-30% Ni).

2. Paduan Ni – Cr

Salah satu paduan Ni – Cr yang dimanfaatkan sebagai kawat pemanas listrik adalah nikhrom. Nikhrom memiliki komposisi kimia utama 20% Cr dan 80% Ni.

### 3.1.4 Paduan Alumunium

Paduan alumunium merupakan bahan campuran yang mempunyai sifat-sifat logam, terdiri dari dua atau lebih unsur-unsur dengan unsur utama campuran adalah Alumunium. Paduan aluminium dapat dipadukan dengan Cu, Mg, Si, Mn, Zn, Ni, dan sebagainya untuk menambah kekuatan mekaniknya.

Alumunium memiliki *strength to weight ratio* yang lebih tinggi dari baja. Sifat tahan korosi alumunium diperoleh dari terbentuknya lapisan oksida alumunium dari permukaan alumunium. Lapisan oksida ini melekat kuat dan rapat pada permukaan, serta stabil (tidak bereaksi dengan lingkungan sekitarnya) sehingga melindungi bagian dalam.

## 3.2 Korosi

Korosi adalah penurunan mutu logam yang disebabkan oleh reaksi elektrokimia antara logam dengan lingkungan sekitarnya. Korosi juga dapat diartikan sebagai serangan yang merusak pada logam karena lingkungannya dan umumnya terjadi fenomena elektrokimia.

Korosi dapat terjadi karena logam kontak dengan lingkungan sekitarnya. Udara mengandung oksigen, sehingga memungkinkan mengalami reaksi reduksi oksigen. Logam akan selalu berusaha menyesuaikan diri dengan lingkungannya untuk mencapai kestabilan, sehingga dalam udara terbuka logam akan melepaskan elektron dan elektron tersebut ditangkap dan bereaksi dengan uap air (reduksi oksigen). Reaksi oksidasi yang terjadi pada logam dan reduksi oksigen udara terbuka akan menghasilkan oksida logam yang warnanya kecoklatan. Oksida logam inilah yang biasa dikenal dengan korosi.

Faktor penyebab terjadinya korosi adalah sebagai berikut :

1. Udara

Udara adalah suatu campuran gas yang terdapat pada lapisan bumi dan komposisi campuran gas tersebut tidak selalu konsisten. Adanya oksigen yang terdapat di dalam udara dapat bersentuhan dengan permukaan logam yang lembab sehingga kemungkinan terjadinya korosi lebih besar.

2. Air

Air dapat dibedakan atas air laut dan air tawar. Air laut merupakan larutan yang mengandung berbagai macam garam yang bersifat korosif. Kadar garam dapat dinyatakan dengan salinitas, yaitu jumlah bahan-bahan padat yang terlarut dalam satu kilogram air laut karena banyaknya bahan-bahan padat yang terdapat dalam air laut maka akan mempengaruhi laju korosi suatu bahan logam. Air laut sangat mempengaruhi laju korosi dari logam yang dilaluinya atau yang kontak langsung dengannya, hal ini dikarenakan air laut mempunyai konduktivitas yang tinggi dan memiliki ion klorida yang dapat menembus permukaan logam.

### 3. Tanah

Tanah merupakan bagian kerak bumi yang tersusun dari mineral dan bahan organik. Susunan tanah yang terdiri dari mineral dan bahan organik tersebut dapat menyebabkan terjadinya korosi. Korosi dapat terjadi pada pipa-pipa dan kabel-kabel juga terjadi pada pondasi-pondasi logam yang terendam di dalamnya. Tiang- tiang baja yang dikubur jauh di dalam tanah yang sudah lama tidak digali terkena korosi karena kurangnya oksigen dalam tanah. Pada pemasangan pipa-pipa dalam tanah, tanah yang digali dan kemudian ditutup lagi memungkinkan adanya oksigen terkurung di dalam tanah dapat menyebabkan korosi. Korosi elektrokimia dapat terjadi dalam tanah akibat adanya arus listrik yang disebabkan oleh kebocoran arus listrik dari kabel-kabel jalan rel kereta api atau sumber-sumber lain. Tanah harus dianalisis terlebih dahulu sebelum logam - logam dimasukkan ke dalamnya, karena tanah dapat mengandung berbagai macam zat-zat kimia dan mineral-mineral yang korosif. Setelah dianalisis, kita dapat menentukan usaha perlindungan yang tepat terhadap logam-logam tersebut dari serangan korosi di dalam tanah. Tabel *corrosivity ratings based on soil resistivity* dapat dilihat pada Tabel 3.1 di bawah ini.

**Tabel 3.1**  
***Corrosivity Ratings Based on Soil Resistivity***

No	Soil Resistivity ( $\Omega$ cm )	Corrosivity Rating
1	> 20000	<i>Essentially noncorrosive</i>
2	10000 to 20000	<i>Mildly corrosive</i>
3	5000 to 10000	<i>Moderately corrosive</i>
4	3000 to 5000	<i>Corrosive</i>
5	1000 to 3000	<i>Highly corrosive</i>
6	<1000	<i>Extremely Corrosive</i>

Sumber : Roberge, P.R., 2008

### 4. Zat-zat kimia

Zat-zat kimia yang dapat menyebabkan korosi antara lain adalah asam, basa dan garam baik dalam bentuk cair, padat maupun gas. Pada umumnya

korosi oleh zat-zat kimia pada suatu material dapat terjadi bila material yang mengalami kontak langsung dengan zat-zat kimia tersebut.

Reaksi yang terjadi pada poses korosi pipa baja adalah sebagai berikut:

1. Reaksi Oksidasi

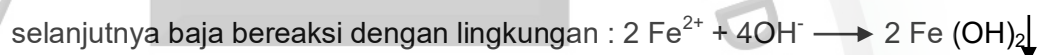


2. Reaksi Reduksi

a. Dalam kondisi lingkungan  $\text{pH} < 7$  (asam)



b. Dalam kondisi lingkungan  $\text{pH} > 7$  (netral dan basa)



### 3.3 Jenis - Jenis Korosi

Korosi terjadi tidak hanya melibatkan reaksi kimia, namun juga reaksi elektrokimia. Lingkungan dapat memicu perpindahan elektron dalam reaksi elektrokimia. Mekanisme korosi pada lingkungan terjadi dengan proses yang berbeda – beda tergantung reaksi dan pemicunya. Mekanisme korosi yang berbeda – beda akan menyebabkan korosi yang berbeda pula. Dasar umum untuk mengklasifikasikan korosi yaitu dari proses terjadinya korosi dan tampilan logam yang terkorosi. Pada umumnya pengamatan secara visual dengan mata dapat dilakukan, namun terkadang dibutuhkan pengamatan yang lebih seksama dengan menggunakan alat dengan perbesaran tertentu.

Jenis – jenis korosi pada pipa minyak dan gas bumi umumnya diklasifikasikan sebagai berikut :

1. Korosi Udara (*Atmospheric Corrosion*)

Korosi udara dipengaruhi oleh beberapa faktor penting, di antaranya air yang berasal dari air hujan, pengembunan akibat kelembaban relatif yang tinggi, kandungan ion – ion dalam udara dan lain – lain. Pengembunan dapat memicu terjadinya korosi pada logam karena membasahi seluruh permukaan termasuk permukaan yang tersembunyi. Lapisan - lapisan tipis air tidak akan mengalir dan akan tetap di situ sampai menguap oleh hembusan angin atau meningkatnya temperatur.

Tingkat keparahan korosi udara biasanya ditentukan oleh pengotor yang berasal dari karbon dioksida, belerang dioksida, belerang trioksida, senyawa – senyawa nitrat, hydrogen sulfida dan ion – ion ammonium di kawasan industri.

Temperatur berpengaruh terhadap korosi melalui dua cara. Cara pertama, yaitu apabila temperatur tinggi maka kelarutan oksigen berkurang. Cara kedua, yaitu jika temperatur turun lebih rendah dari titik embun, udara menjadi jenuh dan titik – titik air akan mengendap pada setiap permukaan yang terbuka.

2. Korosi Merata (*Uniform Corrosion*)

Korosi yang terjadi secara bersamaan dan menyeluruh pada permukaan logam diidentifikasi dengan korosi merata (Gambar 3.1). Hal ini dikarenakan adanya reaksi dengan lingkungan sekitar, di antaranya uap air, kelembaban relatif, pH tanah, pH air dan lainnya. Korosi jenis ini terlihat pada permukaan yang secara menyeluruh terkorosi akibat terekspos dengan lingkungannya. Logam menjadi tipis dan akhirnya terjadi kegagalan pada logam tersebut. Sebagai contoh, potongan baja atau seng dicelupkan pada asam sulfat encer, biasanya akan terlarut secara seragam pada seluruh permukaannya.



Contoh lain dari korosi merata yaitu, pada pelat baja atau profil, permukaannya bersih dan logamnya homogen, bila dibiarkan di udara biasa beberapa bulan maka akan terbentuk korosi merata pada seluruh permukaannya.



Sumber : Utomo Budi , 2009

**Gambar 3.1**  
**Korosi Merata**

Korosi seragam dapat diminimalkan terjadi dengan cara:

- a) Menggunakan material yang sesuai pada saat mendesain,
- b) Menggunakan atau mengaplikasikan coating yang sesuai,
- c) Menggunakan inhibitor korosi, dan
- d) Menggunakan proteksi katodik.



Sumber : Utomo Budi , 2009

**Gambar 3.2**  
**Skema korosi merata**

### 3. Korosi sumuran (*Pitting Corrosion*)

Korosi sumuran merupakan korosi yang terjadi berupa lubang – lubang pada permukaan yang tidak merata (Gambar 3.3). Pada korosi ini akan terbentuk suatu rongga atau lubang pada material. Korosi sumuran lebih berbahaya

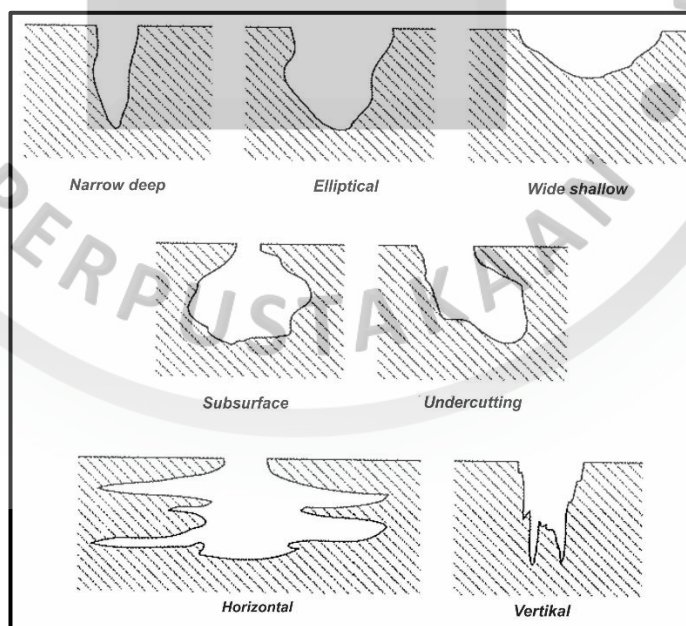
jika dibandingkan dengan dengan korosi merata (*Uniform Corrosion*). Korosi ini biasanya disebabkan oleh *chloride* ( $\text{Cl}^-$ ).



Sumber : Utomo Budi , 2009

**Gambar 3.3**  
**Korosi Sumuran**

Jenis Korosi ini pada umumnya digambarkan sebagai rongga atau lubang dengan diameter yang berbeda – beda. Bentuk – bentuk korosi sumuran di antaranya, *narrow deep*, *elliptical*, *wide shallow*, *subsurface*, *undercutting*, *horizontal* dan *vertikal* (Gambar 3.4).



Sumber : Utomo Budi , 2009

**Gambar 3.4**  
**Bentuk Korosi Sumuran**

#### 4. Korosi Galvanik

Korosi galvanik terjadi karena dua logam yang memiliki potensial elektrokimia berbeda berada berdekatan. Hal ini akan mengakibatkan logam yang lebih anodik terkorosi dan sebaliknya yang lebih katodik terlindungi.

Korosi galvanik dapat dicegah dengan cara sebagai berikut:

- a. Pilih kombinasi dari logam yang paling berdekatan di seri galvanik.
- b. Hindari adanya daerah yang tidak menguntungkan dari sebuah anoda kecil dan katoda besar.
- c. Melindungi logam berbeda bila dimungkinkan.
- d. Menerapkan pelapisan dengan hati – hati. Menjaga lapisan selalu terpasang dengan baik, terutama yang ada di daerah anodik.
- e. Tambahkan inhibitor untuk mengurangi sifat agresif lingkungan.
- f. Hindari sambungan yang berbahaya untuk bahan yang berjauhan dalam deret galvanik.
- g. Desain untuk penggunaan bagian – bagian anodik mudah diganti atau dibuat lebih tebal agar lebih tahan lama.
- h. Menempatkan logam ketiga yang anodik untuk kedua logam dalam kontak galvanik.

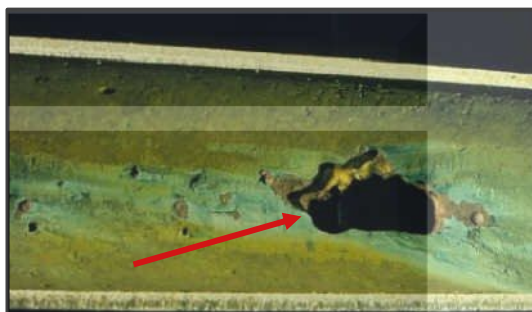


Sumber : Utomo Budi , 2009

**Gambar 3.5**  
**Korosi Galvanik**

#### 5. Korosi Erosi

Korosi erosi merupakan pengikisan lapisan pelindung material akibat dari erosi. Adanya fluida yang memiliki kandungan material abrasif akan menyebabkan terjadinya korosi erosi. Korosi jenis ini sering ditemui pada pipa – pipa minyak. Korosi pada permukaan logam disebabkan aliran fluida yang sangat cepat sehingga merusak permukaan logam dan lapisan pelindung. Korosi erosi juga dapat terjadi karena pengaruh – pengaruh mekanik yang terjadi pada permukaan logam, contohnya seperti pengausan, abrasi dan gesekan.



Sumber : Utomo Budi, 2009

**Gambar 3.6**  
**Korosi Erosi**

#### 6. Korosi Celah (*Crevice Corrosion*)

Korosi jenis ini termasuk korosi lokal. Korosi ini terjadi pada lingkungan agresif dalam celah – celah atau daerah permukaan logam yang tersembunyi. Korosi lokal intensif sering terjadi di dalam celah – celah dan daerah terlindung lainnya pada permukaan logam yang terkena korosi. Jenis korosi ini berhubungan dengan sejumlah kecil larutan yang terjebak oleh lubang, permukaan yang tertutup, kotoran permukaan, dan celah – celah di bawah kepala baut, baut dan paku, sehingga bentuk korosi ini disebut korosi celah.

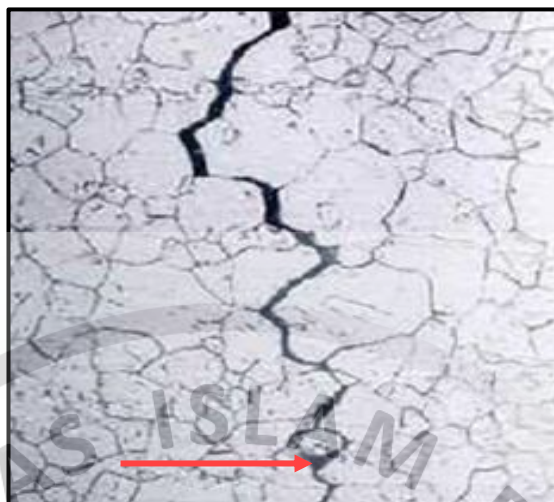


Sumber : Utomo Budi, 2009

**Gambar 3.7**  
**Korosi Celah**

7. Korosi Tegangan (*Stress Corrosion Cracking*)

*Stress corrosion cracking* adalah retak akibat adanya *stress* dan terjadinya korosi secara bersamaan. Korosi jenis ini hanya terjadi jika kedua unsur penyebabnya, yaitu tegangan (*stress*) dan lingkungan korosif berada secara bersama – sama. Tipe korosi ini biasanya terjadi pada logam *stainless steel*. Hal ini disebabkan ketika terjadi korosi, pada permukaan logam terbentuk lapisan produk korosi berupa  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  yang merupakan bahan keramik. Ketika ada tegangan, maka lapisan keramik tersebut tidak tahan sehingga pecah. Akibatnya permukaan logam tidak lagi terlapsi oleh keramik dan terekspos kembali pada lingkungan yang korosif, sehingga kembali terkorosi dan membentuk lapisan oksida baru yang selanjutnya pecah lagi oleh tegangan. Demikian seterusnya, sehingga terjadilah retak (*crack*) yang dapat menyebabkan pecahnya peralatan.



Sumber : Utomo Budi,2009

**Gambar 3.8**  
**Korosi Tegangan**

### 3.4 Inspeksi dan *Monitoring* Korosi

Metode inspeksi dan pengawasan (*monitoring*) korosi yang sering digunakan adalah metoda kehilangan berat dan metoda pengurangan ketebalan.

#### 3.4.1 Metoda Pengurangan Ketebalan

Korosi yang terjadi pada permukaan logam akan menyebabkan terjadinya penipisan atau pengurangan ketebalan, contohnya korosi pada pipa baja yang menyebabkan pengurangan ketebalan pada dinding pipa. Metoda pengurangan ketebalan dilakukan dengan menghitung pengurangan ketebalan yang terjadi pada permukaan logam.

Pengurangan ketebalan pipa dihitung dari selisih tebal nominal atau tebal awal pipa dengan tebal aktual pipa. Pengukuran tebal aktual pipa dapat dilakukan dengan menggunakan alat *ultrasonic thickness gauge* yang bekerja berdasarkan pantulan gelombang ultrasonik. Gelombang ultrasonik yang dipancarkan oleh rangkaian *transmitter* akan menembus permukaan benda dan dipantulkan kembali ke *receiver*. Waktu tempuh menjalani gelombang ini diukur dengan menggunakan metoda *time of flight*.



Sumber : Surdia, T dan Saito, S 1995

Gambar 3.9

*Ultrasonic Thickness Gauge DM 5*

### 3.4.2 Metoda Kehilangan Berat

Metode ini adalah mengukur berat awal dan berat akhir dari benda uji (objek yang ingin diketahui laju korosi yang terjadi padanya), kekurangan berat dari pada berat awal merupakan nilai kehilangan berat. Kehilangan berat dimasukkan ke dalam rumus untuk mendapatkan laju korosinya. Metode ini bila dijalankan dengan waktu yang lama dan *sustainable* dapat dijadikan acuan terhadap kondisi tempat objek diletakkan (dapat diketahui seberapa korosif daerah tersebut) juga dapat dijadikan referensi untuk *treatment* yang harus diterapkan pada daerah dan kondisi tempat objek tersebut.

Persamaan yang digunakan dalam menghitung laju korosi dengan metoda kehilangan berat adalah sebagai berikut :

$$Mpy = \frac{534 W}{D \times A \times T}$$

Keterangan :

Mpy = Laju Korosi (*mils per year*)

W = Berat Hilang (mg)

D = Massa Jenis ( $g/cm^3$ )

A = Luas Permukaan ( $inch^2$ )

T = Waktu (jam)

### 3.5 Pengendalian Korosi

Logam dan paduannya merupakan salah satu material konstruksi yang secara luas digunakan pada berbagai macam industri, seperti industri nuklir, perminyakan, industri makanan, obat – obatan dan industri elektrokimia. Dalam proses konstruksi, logam dan paduannya akan mengalami tiga tahapan utama, yaitu tahap perancangan, pembuatan dan pemakaian. Pada setiap tahapan tersebut, pengendalian korosi memainkan peranan penting agar diperoleh hasil yang baik untuk kepentingan industri. Adapun jenis pengendalian korosi di antaranya adalah sebagai berikut:

1. Seleksi Material

Seleksi material merupakan pemilihan bahan yang tepat sesuai dengan peruntukannya. Contohnya, seleksi material logam untuk pipa transportasi pada perusahaan minyak dan gas didasarkan pada pertimbangan kondisi lingkungan, karakteristik fluida atau gas yang akan dialirkan, tekanan, suhu dan debit fluida. Pipa *low carbon steel* memiliki keuletan yang baik namun, memiliki tingkat keausan yang tinggi sedangkan *medium carbon steel* dan *high carbon steel* dapat beroperasi pada suhu tinggi, tetapi mempunyai potensi untuk retak akibat sifat material yang getas.

2. Pelapisan (*Coating*)

Metode ini dilakukan dengan cara melapiskan logam dasar dengan suatu material pelindung. Jenis pelapis yang banyak digunakan terbagi tiga, yaitu pelapis non organik, organik dan logam. Dengan adanya pelapisan pada logam diharapkan menjadi pembatas antara logam tersebut dengan lingkungannya sehingga tidak terjadi reaksi logam dengan lingkungan. Jenis pelapisan di antaranya adalah sebagai berikut :



a. Pelapisan Organik

Metode ini merupakan prinsip pembatasan logam dengan lingkungannya. Vernis, cat, enamel dan selaput organik lainnya biasanya digunakan sebagai pelapis organik. Komponen pelapis organik terdiri atas *binder*, *additive*, *pigment*, dan *solvent*. Sedangkan metode pelapisan organik dibedakan berdasarkan jenis *binder* atau resin. Besar dan jenis *solvent*, *additive* dan *pigment* mempengaruhi dan sifat lapisan organik.

b. Pelapisan Inorganik

Pelapisan inorganik merupakan metode pelapis yang berfungsi hanya sebagai lapisan pelindung atau berfungsi juga sebagai inhibitor. Contoh pelapisan inorganik *coating* yang tergolong dalam kategori sebagai lapisan pelindung adalah *vitreous enamel*. Bahan ini dapat tahan terhadap alkali (yang tidak terlalu kuat) dan asam.

c. *Electroplating*

*Electroplating* atau lapis listrik menggunakan prinsip elektrolisa di mana terjadi proses pengendapan atau deposisi suatu logam pelindung pada logam lainnya. Proses elektrolisa dilakukan pada *bath* yang di dalamnya terdapat larutan elektrolit. Logam akan dicelupkan di *bath*, setidaknya ada dua elektroda yang masing - masing terhubung arus listrik. Kedua elektroda terbagi menjadi kutub positif dan kutub negatif dikenal dengan kutub katoda dan anoda.

d. Pencelupan Panas (*Hot Dipping*)

Konsep dasar dari metode ini adalah logam yang akan dilindungi direndam atau dicelupkan dalam suatu bak atau *bath* yang berisi logam

pelapis yang telah cair. Setelah logam dasar diangkat dari bak yang berisi cairan logam panas, cairan tersebut akan melapisi logam dasar.

e. Pelapisan dengan Penyemprotan

Prinsip dari metode penyemprotan adalah dengan mengumpalkan kawat bagian depan penyembur api. Kawat tersebut akan meleleh dan menghembuskan butir – butir halus dengan tekanan tinggi. Kecepatan tinggi diperlukan agar butir – butir halus terlempar dan menjadi pipih ketika membentur dan melekat pada permukaan logam sampai ketebalan tertentu.

f. *Cladding*

Metode ini dilakukan oleh logam yang tahan korosi dan dilapiskan ke logam yang tidak tahan korosi pada lingkungan tertentu. Namun logam yang tidak tahan korosi ini memiliki sifat mekanik dan sifat fisik yang baik. Metoda ini biasanya dilakukan pada logam yang memiliki sifat mampu bentuk yang baik. Metoda ini dilakukan dengan cara pengerolan, pengelasan dan lain – lain.

g. Pelapisan Difusi

Metode ini dilakukan dengan prinsip difusi antara logam dasar dan logam pelapis. Metoda ini akan membentuk lapisan paduan logam. Proses ini dilakukan dengan menumbuhkan benda berbentuk bola terhadap permukaan benda kerja dengan lapisan metalik yang berbentuk serbuk logam dan bahan – bahan kimia.

3. Proteksi Katodik

Prinsip dasar proteksi katodik mengacu pada reaksi oksidasi ataupun reduksi yang akan terjadi berdasarkan deret elektrokimia. Reaksi oksidasi terjadi pada daerah anoda dan daerah katoda dipersempit sekecil mungkin

dalam sel yang sama. Proteksi katodik dibagi menjadi dua, yaitu sistem anoda korban (*sacrificial anode*) dan sistem arus yang dipaksakan (*impressed current*).

a. Sistem Anoda Korban (*sacrificial anode*)

Sistem anoda korban diistilahkan juga *galvanic anode*. Hal ini dikarenakan prinsip proteksi dan sumber arus yang digunakan hanya berasal dari reaksi galvanik logam (anoda) tersebut. Dua logam yang berbeda dihubungkan secara elektrik dalam suatu elektrolit dan menggunakan prinsip sel elektrokimia galvanik. Elektrolitnya dapat berupa air ataupun tanah. Pada sel tersebut, logam yang potensial oksidasinya lebih besar atau lebih tinggi akan menjadi anodik terhadap logam yang kurang aktif mendapatkan proteksi katodik pada permukaan. Hal ini disebabkan karena adanya aliran arus melalui elektrolit dari logam yang anodik. Contoh logam yang digunakan sebagai anoda korban untuk logam baja diantaranya adalah aluminium (Al), zinc (Zn), dan magnesium (Mg).



Sumber : [indonesian.magnesiumalloyplate.com](http://indonesian.magnesiumalloyplate.com)

**Gambar 3.10**  
**Anoda Korban Magnesium (Mg)**

b. Sistem Arus yang Dipaksakan (*impressed current*)

Sumber arus pada sistem *impressed current* berasal dari luar, biasanya berasal dari DC dan AC yang dilengkapi dengan arus (*rectifier*). Kutub

negatif dihubungkan dengan ke struktur yang dilindungi dan kutub positif dihubungkan ke anoda. Arus mengalir dari anoda melalui elektrolit ke permukaan struktur, kemudian mengalir ke sepanjang struktur dan kembali ke *rectifier* melalui konduktor elektris. Karena struktur menerima arus dari elektrolit, maka struktur menjadi terproteksi.

#### 4. Inhibitor

Inhibitor korosi merupakan senyawa kimia yang jika ditambahkan dalam konsentrasi yang sedikit ke dalam lingkungan maka akan menghambat laju korosi. Dengan kata lain, inhibitor disebut juga sebagai katalis penghambat. Inhibitor menurunkan laju korosi dengan beberapa cara, yaitu :

- a. Meningkatkan polarisasi anoda atau katoda.
- b. Mengurangi perpindahan atau difusi ion pada permukaan logam.
- c. Meningkatkan ketahanan elektrik permukaan logam

### 3.6 Faktor – Faktor yang Mempengaruhi Laju Korosi

Suatu pipa dengan logam yang sama belum tentu akan mengalami jenis korosi yang sama pada lingkungan yang berbeda. Begitu juga dengan pipa bahan logam di lingkungan yang sama tetapi material pipa berbeda, belum tentu material pipa tersebut mengalami jenis korosi yang sama. Terdapat dua faktor utama yang berpengaruh terhadap laju korosi pada suatu pipa berbahan logam, yaitu faktor metalurgi dan faktor lingkungan.

#### 3.6.1 Faktor Metalurgi

Faktor metalurgi meliputi komposisi paduan logam yang berada dalam pipa. Setiap bahan logam dan paduan logam memiliki sifat dan karakteristik yang berbeda baik itu secara kimia maupun fisika dalam kondisi lingkungan kerja tertentu. Contohnya adalah pipa aluminium yang dapat membentuk suatu lapisan pasif pada

lingkungan tanah dan air. Sedangkan pipa dengan komposisi logam Fe atau Zn dapat dengan mudah terkena korosi pada lingkungan ini.

### 3.6.2 Faktor Lingkungan

Faktor lingkungan sangat mempengaruhi laju korosi. Beberapa faktor lingkungan yang mempengaruhi laju korosi adalah kandungan oksigen, kandungan air, pH tanah, resistivitas tanah, temperature udara, Kelembaban relatif, konsentrasi ion-ion yang ada di lingkungan dan lain-lain. Adapun contoh faktor lingkungan yang mempengaruhi laju korosi adalah sebagai berikut:

1. Faktor eksternal, yaitu lingkungan air dengan komposisi ion-ion tertentu yang terlarut dalam air, seperti air laut dan tanah dapat mengakibatkan jenis korosi yang berbeda. Pada lingkungan air laut, material pipa dapat dengan mudah korosif. Hal ini disebabkan karena dalam lingkungan air laut mengandung ion klorida yang sangat reaktif, sehingga mengakibatkan tingginya laju korosi. Berbeda dengan lingkungan dalam tanah yang relatif lebih tahan terhadap korosi.
2. Faktor internal, yaitu komposisi, pH, temperatur, dan tekanan fluida yang dialirkan. Contohnya, apabila fluida bersifat asam, maka korosi akan mudah terjadi, karena asam bersifat korosif.

### 3.7 Ketahanan Korosi Relatif

Ketahanan suatu material pipa terhadap korosi pada suatu kondisi tertentu dapat menghasilkan laju korosi yang berbeda. Ketahanan korosi relatif digolongkan berdasarkan nilai laju korosi yang terjadi. Pembagian golongan tersebut akan mempermudah dalam mengetahui kondisi material pipa yang sebenarnya di lapangan. Ketahanan korosi relatif untuk baja dapat dilihat pada Tabel 3.2 berikut ini.

**Tabel 3.2**  
**Corrosion Of MPY With Equivalent Metric-Rate Expression**

Relative Corrosion Resistance	Mpy	mm/yr	µm/yr	Nm/h	Pm/s
<b>Outstanding</b>	<1	<0.02	<25	<2	<1
<b>Excelent</b>	1 - 5	0,02 – 0,1	25 – 100	02 - 10	1 - 5
<b>Good</b>	1 - 5	0,1 – 0,5	100 - 500	10 - 50	20 - 50
<b>Fair</b>	20 – 50	0,5 – 1	500 – 1000	50 – 150	20 – 50
<b>Poor</b>	50 – 200	01 – 5	1000 – 5000	150 – 500	50 – 200
<b>Unacceptable</b>	200+	5+	5000+	500+	200+

Sumber : MG Fontana, *Rekayasa Korosi*, McGraw-Hill, 3rd ed, hal 172, 1986

### 3.8 Perhitungan *Thickness required, Maximum Allowable Working Pressure, Corrothion Rate, dan Remaining Service Life*

Perhitungan *Thickness Required, Maximum Allowable Working Pressure, Corrosion Rate* dan *Remaining Service Life* mengacu pada standar API 570. Standar ini digunakan untuk menentukan sisa umur pakai pipa tersebut.

#### 3.8.1 Perhitungan *Thickness Required (Tr)*

*Thickness Required* adalah tebal minimum yang diizinkan. *Thickness Required* diperlukan untuk menentukan tebal minimal dari pipa agar pipa dapat beroperasi dengan aman, perhitungan ini diperlukan untuk menentukan sisa umur pakai (*Remaining Service Life/ RSL*) pada pipa tersebut. Persamaan yang digunakan dalam menentukan *Thickness required* ini adalah sebagai berikut :

$$Tr = \frac{P \times D}{2 \times S \times E} + CA$$

Keterangan :

Tr = *Thickness Required* (mm)

P = *Internal Design Pressure* (psi)

D = *Diameter Pipa* (mm)

S = *Specification Minimum Yield Strength* (psi)

E = *Joint Factor*

CA = *Corrosion Allowance* (mm)

### 3.8.2 Perhitungan MAWP (*Maximum Allowable Working Pressure*)

MAWP (*maximum allowable working pressure*) adalah tegangan yang diizinkan dari material yang digunakan. MAWP merupakan parameter penting dalam analisis tegangan sistem perpipaan. Tegangan kerja dalam sistem perpipaan tidak boleh melebihi tegangan yang diizinkan berdasarkan kode dan standar material tersebut.

$$MAWP = \frac{2 \times S \times E \times t_{\text{actual}}}{D}$$

keterangan:

MAWP = *Maximum Allowable Working Pressure* (psi)

S = *Specification Minimum Yield Strength* (psi)

E = *Joint Factor*

$t_{\text{actual}}$  = Tebal hasil pengukuran (mm)

D = *Outside Diameter* (mm)

### 3.8.3 Perhitungan *Corrosion Rate* (CR)

Perhitungan *corrosion rate* (laju korosi) adalah suatu perhitungan yang digunakan untuk mengetahui nilai laju korosi pada material pipa baja yang terkorosi. Pada standar API 570 rumus yang digunakan untuk menghitung laju korosi ini adalah sebagai berikut :

$$CR = \frac{t_{\text{nominal}} - t_{\text{aktual}}}{\text{Umur Pakai Pipa}}$$

Keterangan :

- CR = *Corrosion rate* (laju korosi) (mm/tahun)
- $t_{\text{nominal}}$  = Tebal pipa pada pemasangan awal (mm)
- $t_{\text{aktual}}$  = Tebal pipa pada saat inspeksi (mm)
- Umur Pakai Pipa = Waktu pemasangan hingga inspeksi saat ini (tahun)

### 3.8.4 Perhitungan *Remaining Service Life* (RSL)

Perhitungan *Remaining Service Life* (RSL) adalah perhitungan yang digunakan untuk menentukan sisa umur pakai pipa agar pipa dapat beroperasi dengan aman berdasarkan tebal pipa minimal yang diperbolehkan untuk dipakai. Persamaan yang dipakai dalam perhitungan *Remaining Service Life* ini adalah sebagai berikut:

$$RSL = \frac{t_{\text{aktual}} - t_{\text{required}}}{CR}$$

Keterangan :

- RSL = Sisa Umur Pakai Pipa ( tahun)
- $t_{\text{aktual}}$  = Tebal pipa pada saat inspeksi (mm)
- $t_{\text{required}}$  = *Thickness Required* (mm)
- CR = *Corrosion Rate* (laju korosi) (mm per tahun)