

BAB 2 TEORI PENUNJANG

2.1 Teori Korosi

Korosi adalah proses perusakan logam, dimana logam akan mengalami penurunan mutu (*degradation*) karena bereaksi dengan lingkungan baik itu secara kimia atau elektrokimia pada waktu pemakaiannya. Terkorosinya suatu logam dalam lingkungan elektrolit (air) adalah suatu proses elektrokimia. Proses ini terjadi bila ada reaksi setengah sel yang melepaskan elektron (reaksi oksidasi pada anodik) dan reaksi setengah sel yang menerima elektron tersebut (reaksi reduksi pada katodik). Kedua reaksi ini akan terus berlangsung sampai terjadi kesetimbangan dinamis dimana jumlah elektron yang dilepas sama dengan jumlah elektron yang diterima.

Adapun syarat-syarat dimana suatu proses korosi dapat:

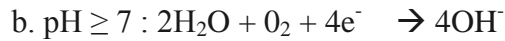
1. Anoda, tempat terjadinya reaksi oksidasi dimana ion negatif berkumpul. Anoda biasanya terkorosi dengan melepaskan elektron – elektron dari atom-atom logam netral untuk membentuk ion-ion yang bersangkutan. Ion – ion ini mungkin tetap tinggal dalam larutan atau bereaksi membentuk hasil korosi yang tidak larut. Reaksi ini bisa menghalangi pelarutan logam lebih lanjut yang disebut pemasifan dimana reaksi korosi berhenti. Reaksi korosi logam M biasanya dinyatakan dalam persamaan



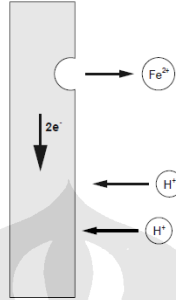
dengan banyak elektron yang diambil dari masing-masing atom yang ditentukan oleh valensi logam yang bersangkutan. Umumnya $z = 1, 2$ atau 3.

2. Katoda, tempat terjadinya reaksi reduksi dimana ion positif berkumpul. Pada katoda biasanya tidak mengalami korosi, walaupun demikian mungkin menderita kerusakan dalam kondisi-kondisi tertentu. Dua reaksi penting yang umum terjadi pada katoda, tergantung pH larutan bersangkutan, adalah :





3. Media elektrolit, sebagai penghantar elektron antara katoda dan anoda.
Bersifat menghantarkan listrik
4. Adanya arus listrik akibat pergerakan elektron.



Gambar 2.1 Reaksi Elektrokimia Pada Proses Korosi[2]

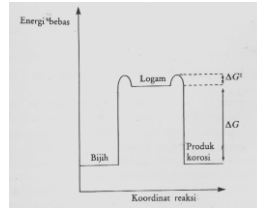
Pengertian korosi dapat dilihat berbagai teori sebagai berikut :

- a. Teori Korosi Berdasarkan Hukum Termodinamika
- b. Teori Korosi Berdasarkan Potensial Campuran (Polarisasi)
- c. Teori Korosi Berdasarkan Reaksi Elektrokimia

2.1.1 Korosi Berdasarkan Hukum Termodinamika

Dialam bebas kebanyakan logam ditemukan dalam keadaan tergabung secara kimia yang disebut *ore*. Bijih-bijih ini bisa berupa oksida, sulfida, karbonat atau senyawa lain yang lebih kompleks. Dengan adanya teori termodinamika[1], dapat dikatakan bahwa bijih atau senyawa lain berada pada energi yang terendah. Energi yang besar diperlukan untuk memisahkan logam misalnya besi dari bijihnya seperti besi oksida, ini dilakukan dengan melalui pemanasan (dengan agen pereduksi) dalam sebuah *blast Furnace*(tanur hembus) dengan temperatur sekitar 1600°C . Oleh karena itu logam-logam dalam keadaan tidak begabung dengan bahan lain memiliki tingkat energi yang tinggi, seperti digambarkan pada gambar 2.2 yang menggunakan profil energi untuk menggambarkan perubahan-perubahan termodinamika yang dialami suatu atom logam, sejak masih dalam bentuk bijih, atom logam dan dalam bentuk hasil korosi. Hukum termodinamika menggambarkan keadaan energi yang tinggi yang akan berubah ke energi yang

rendah. Kecenderungan ini membuat logam –logam bergabung kembali dengan unsur-unsur yang ada dilingkungan, yang akhirnya membentuk gejala yang disebut korosi.



Gambar 2.2 Sebuah Profil Energi Termodinamika Untuk Logam Dan Senyawa-Senyawanya[1].

Selisih energi bebas antara logam dengan produk korosinya (ΔG) dalam gambar 2.2 hanya menggambarkan logam yang mengalami korosi bukan penentuan laju korosinya. Energi bebas merupakan faktor satu-satunya yang menentukan suatu korosi berlangsung spontan atau tidak. Setiap energi bebas suatu unsur dinyatakan sebagai G dan perubahan energi dinyatakan sebagai ΔG . Peralihan energi tinggi ke energi rendah, yang menyebutkan bahwa energi yang diberikan dengan tanda negatif dan energi yang diserap oleh sistem dengan tanda positif. Jadi agar suatu reaksi dapat berjalan spontan maka ΔG harus negatif. Semua korosi bergantung pada temperatur, ini karena tingkat energi bebas unsur-unsur yang terlibat bergantung pada temperatur. Oleh sebab itu kita dapat mengaplikasikan ke persamaan termodinamik sebagai berikut :

$$\Delta G = \Delta G^0 + RT \ln J \quad (2.2)$$

J didefinisikan untuk suatu reaksi $A + B \rightarrow C + D$

$$J = \frac{[C][D]}{[A][B]} \quad (2.3)$$

J mengandung nilai yang berubah-ubah (tidak seimbang) sesuai dengan perubahan energi bebas pada keadaan tidak seimbang. Jika sistem mencapai suatu titik di mana perubahan energi bebas tidak ada, maka sistem itu berada dalam kesetimbangan dan $\Delta G=0$

maka $J = K$ dengan K adalah tetapan kesetimbangan

$$\Delta G^0 = -RT \ln K \quad (2.4)$$

Seperti contoh reaksi diatas menggambarkan besi yang terkorosi didalam larutan tembaga sulfat sebagai berikut :





Yang menggerakkan reaksi tersebut adalah energi bebas sehingga didapatkan persamaan :

$$\Delta G = \Delta G^0 + RT \ln [\text{Fe}^{2+}] [\text{Cu}]/[\text{Cu}^{2+}][\text{Fe}] \quad (2.8)$$

Berdasarkan persamaan yang dirumuskan Michael Faraday yang menyatakan kerja yang dilakukan (perubahan energi bebas pada proses korosi) berdasarkan beda potensial dan muatan yang dipindahkan :

$$\Delta G = E - zF \quad (2.9)$$

Keterangan:

E= potensial yang diukur (dalam Volt)

Z = banyaknya elektron yang dipindahkan dalam reaksi korosi

F = muatan yang dipindahkan oleh satu mol elektron (96494 coulomb per mol)

Tanda negatif menunjukkan bahwa elektron bermuatan negatif.

Tanda (⁰) menyatakan kondisi baku sehingga dapat dituliskan menjadi:

$$\Delta G^0 = - zFE \quad (2.10)$$

Sehingga kita dapat memasukkannya kedalam persamaan [2.6] sebagai berikut:

$$-zFE = -zE^0 + RT \ln [\text{Fe}^{2+}]/[\text{Cu}^{2+}] \rightarrow E = E^0 - RT/zF \ln[\text{Fe}^{2+}]/[\text{Cu}^{2+}]$$



$$E = E^0 - RT/zF \lg \text{ Hasil reaksi/reaktan} \quad (2.11)$$

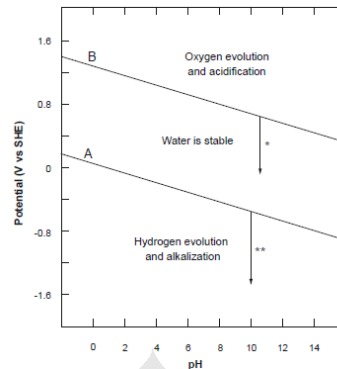
Dengan temperatur baku 298K dan R= 8,3143 J mol⁻¹K⁻¹ serta konversi ke logaritma berbasis 10 persamaan tersebut menjadi :

$$E = E^0 - 0,059/z \log \text{ Hasil reaksi/reaktan} \quad (2.12)$$

E adalah ketidakseimbangan yang dibangkitkan pada reaksi, dengan reaktan menyatakan konsentrasi reaktan dan hasil reaksi menyatakan konsentrasi hasil reaksi.

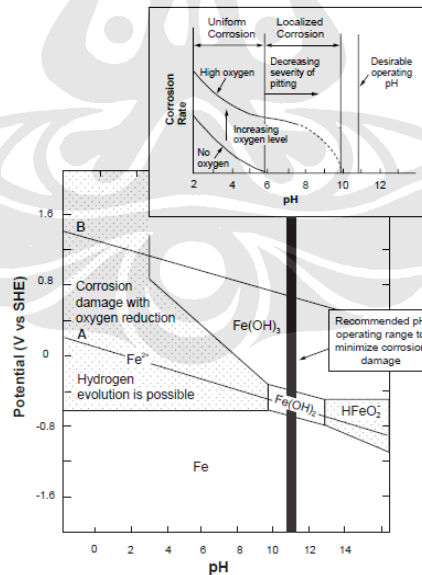
Perilaku termodinamika dapat dijelaskan pada diagram pourbaix/ E-pH. Dalam diagram ini menggambarkan hubungan pH dan potensial elektoda dalam kondisi elektroda sehingga dapat memperlihatkan kondisi-kondisi dimana logam

akan terkorosi, tidak terkorosi atau mengalami pemasifan dalam larutan dalam pelarut air.



Gambar 2.3 Stabilitas Termodinamika Pada Air, Oksigen Dan Hidrogen[2]

Pada gambar 2.3 garis A menunjukkan garis kesetimbangan: $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$. Garis B Menunjukkan garis kesetimbangan $2H_2O \rightarrow O_2 + 4H^+ + 4e^-$, dimana tanda * mengindikasikan peningkatan driving force termodinamika untuk reduksi oksigen secara katodik sebagaimana potensial turun dibawah garis B. Tanda ** mengindikasikan peningkatan driving force untuk evolusi hidrogen secara katodik sebagaimana potensial turun dibawah garis A.



Gambar 2.4 Diagram E-pH Besi Dilingkungan Air Pada Suhu 25⁰C Pada Pengamatan Perilaku Korosi[2]

2.1.2 Teori Korosi Berdasarkan Reaksi Elektrokimia

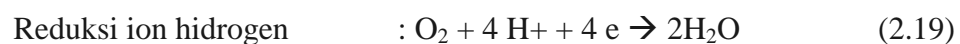
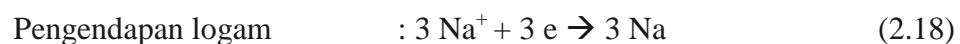
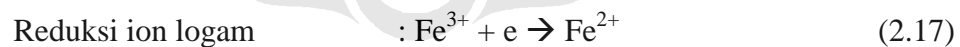
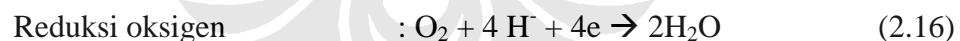
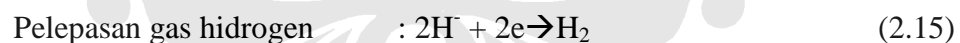
Mekanisme korosi tidak terlepas dari reaksi elektrokimia. Reaksi elektrokimia melibatkan perpindahan elektron-elektron. Perpindahan elektron merupakan hasil reaksi redoks (reduksi-oksidasi). Mekanisme korosi melalui reaksi elektrokimia melibatkan reaksi anodik di daerah anodik. Reaksi anodik (oksidasi) diindikasikan melalui peningkatan valensi atau produk elektron-elektron. Reaksi anodik yang terjadi pada proses korosi logam yaitu :



Proses korosi dari logam M adalah proses oksidasi logam menjadi satu ion (n^+) dalam pelepasan n elektron. Harga dari n bergantung dari sifat logam sebagai contoh besi :



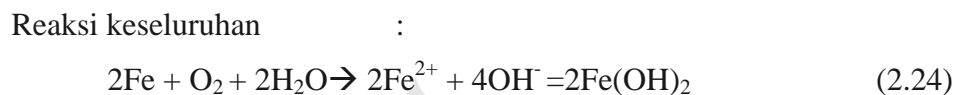
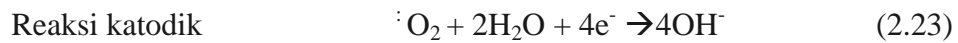
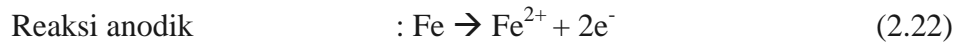
Reaksi katodik juga berlangsung di proses korosi. Reaksi katodik diindikasikan melalui penurunan nilai valensi atau konsumsi elektron-elektron yang dihasilkan dari reaksi anodik. Reaksi katodik terletak di daerah katoda. Beberapa jenis reaksi katodik yang terjadi selama proses korosi logam yaitu :



Reaksi katodik dimana oksigen dari udara akan larut dalam larutan terbuka ($NaCl.H_2O$). Reaksi korosi tersebut sebagai berikut :



Peristiwa korosi pada struktur pipa, baik yang terjadi dilingkungan tanah dan air harus melibatkan syarat-syarat diatas. Peristiwa korosi pada struktur pipa memiliki reaksi anoda dan katoda:



Pada reaksi (2.22) dan (2.23) melibatkan elektron. Reaksi anodik adalah reaksi perubahan logam baja menjadi ion Fe^{2+} dengan melepaskan 2 elektron dimana terjadi penambahan bilangan oksidasi dari 0 menjadi 2, sedangkan reaksi katodik adalah reaksi pelarutan oksigen O_2 didalam air menjadi ion OH^{-} dengan membutuhkan 4 elektron dimana terjadi pengurangan bilangan oksidasi 0 menjadi -4. Elektron ini akan mengalir dari reaksi anodik menuju reaksi katodik untuk mencapai kesetimbangan yang dinamis. Pergerakan elektron ini mengakibatkan terjadinya arus listrik yang arahnya berlawanan dengan arah aliran elektron. Arah aliran elektron berasal dari anoda menuju katoda sehingga arah aliran arus listrik berasal dari katoda menuju anoda.

2.1.2.1 Metode Kehilangan Berat (Weight Loss)

Metode ini sering digunakan untuk menentukan laju korosi dalam berbagai lingkungan. Metode ini berdasarkan ASTM G1,G4,A90 dan NACE RP0775. Korosi kupon digunakan untuk pada pengukuran total kehilangan berat pada periode penanaman. Ini menunjukkan korosi akan terjadi, sebuah kupon tunggal tidak dapat digunakan untuk menentukan kecepatan korosi beragam atau berubah selama periode penanaman. Informasi perubahan kecepatan korosi dapat ditentukan dengan beberapa pemasangan kupon pada satu waktu dan evaluasi kupon pada interval waktu yang pendek.



Gambar 2.5 Kupon Untuk Analisa Kehilangan Berat

Interpretasi data coupon terdiri dari lokasi, waktu, pengukuran kedalaman, profil permukaan (pengelembungan atau erosi) produk korosi dan atau komposisi *scale* (produk yang terbentuk karena tanah memiliki pH basa yang bereaksi dengan tanah) dan faktor operasi (inhibitor, dll).

Dalam preparasi kupon, harus bersih dari semua kontaminan (debu, minyak dan produk karat), pengoperasian pengamplasan harus dilakukan sangat hati-hati untuk menghindari temperatur tinggi pada permukaan yang akan mempengaruhi mikrostruktur kupon. Untuk setiap sudut kupon harus dipoles untuk menghindari adanya konsentrasi tegangan yang mengarah pada korosi karena retak tegangan. Karena jumlah kupon yang ditanam lebih dari satu sehingga pemberian nomor seri menjadi sangat penting dalam penganalisan.

Setelah proses preparasi sampel, data berat, dimensi dan nomor serinya dicatat dan juga penduplikasian foto permukaan menjadi sangat penting untuk data perbandingan setelah penanaman.

Tipe kupon memiliki ukuran dan konfigurasi yang berbeda-beda tergantung alat yang digunakan (holder) atau keinginan dari pengguna. Komposisi kupon terbuat dari 0.1 hingga 0.2 % baja karbon dalam bentuk *strip* atau *plate* yang memiliki kemudahan dalam pengerjaannya.

Waktu penanaman harus dipertimbangkan ketika penginterpretasi data kupon korosi. Waktu pendek penanaman (15 hingga 45 hari) sudah dapat menunjukkan kecepatan korosi dari suatu logam [NACE RP0775]. Untuk waktu penanaman yang panjang (60 hingga 90 hari) sering digunakan untuk mendeteksi serangan pitting.

Setelah penanaman dilakukan dalam jangka tertentu, pembersihan dan penghilangan produk korosi dan semua yang terekspos dipermukaan harus dilakukan dengan hati-hati sebelum berat akhir diukur. Pembersihan dilakukan secara mekanika, kimia atau keduanya. Untuk lebih jelasnya dalam pembersihan

permukaan pada sampel kupon dijelaskan dalam ASTM G1,G4 dan NACE RP0775.



Gambar 2.6 Kupon Yang Telah Terkorosi

Tabel 2.1 Reagen Yang Direkomendasi Untuk Membersihkan dan Penghilangan Produk Korosi Dari Kupon Yang Terkorosi [3]

Material	Zat Kimia	Waktu	Temperatur	Keterangan
Besi Dan Baja	20% NaOH,200g/L Zinc Dust Or Conc.HCl,50 G/L, SnCl ₂ + 20 G/L SbCl ₃	Hingga Bersih	Dingin	-
Baja Tahan Karat	10% H ₂ SO ₄ 10 % HNO ₃	Hingga Bersih	Room 140 ⁰ f (60 ⁰ c)	Terhindar Dari Kontaminasi Klorida

Setelah berat akhir diukur kemudian dilakukan penghitungan kecepatan korosi menggunakan MPY (*mils penetration per year*) dengan rumus sebagai berikut:

$$\text{Corrosion Rate (CR)} = \frac{\text{Weight loss (g)} * K}{\text{Alloy Density (g/cm}^3\text{)} * \text{Exposed Area (A)} * \text{Exposure Time (hr)}}$$

Keterangan :

CR = Laju Korosi (MPY)

Weight Loss = Berat yang hilang (gram)

K = Konstanta-Faktor

Alloy Density = Massa Jenis Paduan (g/cm³)

- Baja Karbon = 7,86 g/cm³

- Epoxy = 1,11 -1,40 g/cm³

Exposed Area = Luas Yang dibentangkan dilingkungan korosi (A)

Exposure time = Waktu pengujian/pembentangan kupon (jam)

Dengan Pengkonversian unit Satuan laju korosi sebagai berikut :

Desired Corrosion Rate Unit (CR)	Area Unit (A)	K-Factor
mils/year (mpy)	in ²	5.34 x 10 ⁵
mils/year (mpy)	cm ²	3.45 x 10 ⁶
millimeters/year (mmy)	cm ²	8.75 x 10 ⁴

MPY adalah penghitungan kecepatan korosi yang paling populer di Amerika Serikat, meskipun ditambahkan penggunaan *metric units* di beberapa tahun belakangan ini. Konversi Ke *Equivalent Metric Penetration Rates* Sebagai Berikut:

$$1 \text{ mpy} = 0,0254 \text{ mm.yr} = 25,4 \text{ } \mu\text{m/yr} = 2,90 \text{ nm/h} = 0,805 \text{ pm/s}$$

Tabel 2.2 perbandingan pada MPY dengan *Equivalent metric-rate Expressions*[4]

Relative Corrosion Resistance	Mpy	mm/yr	$\mu\text{m/yr}$	nm/h	pm/s
Outstanding	< 1	< 0.02	< 25	< 2	<1
Excellent	1-5	0.02-0.1	25-100	2-10	1-5
Good	5-20	0.1-0.5	100-500	10-50	20-50
Fair	20-50	0.5-1	500-1000	50-150	20-50
Poor	50-200	1-5	1000-5000	150-500	50-200
Unacceptable	200+	5+	5000+	500+	200+

2.1.3 Teori Korosi Berdasarkan Prinsip Polarisation

Ketika suatu logam tidak berada dalam kesetimbangan dengan larutan yang mengandung ion-ionnya, potensial elektrodanya berbeda dari potensial korosi bebas dan selisih antara keduanya biasanya disebut polarisasi. Polarisation atau penyimpangan dari potensial kesetimbangan sama dengan polarisation anoda pada logam dan polarisation katoda pada lingkungannya.

Ada dua metode yang tersedia untuk pengukuran korosi dengan *electrochemical polarization: tafel extrapolation and polarization resistance*.

Ekstrapolasi Tafel

Metode polarisasi mengukur laju korosi yang memiliki keuntungan yang sangat baik. Biasanya hanya beberapa menit yang dibutuhkan untuk menentukan kecepatan korosi dengan tahanan polarisasi, dimana pengukuran kehilangan secara konvensional membutuhkan beberapa hari atau lebih. Oleh karena itu, pengukuran *semicontinuous* pada korosi dapat dimasukkan dimana sangat berguna dalam pembelajaran kinetik atau untuk mengawasi proses korosi di *plant* proses. Metode ini sangat sensitif dan membutuhkan faktor pemercepat seperti temperatur tinggi untuk meningkatkan kecepatan di laboratorium. Pengukuran polarisasi adalah pengujian tidak merusak dan dapat dilakukan beberapa kali untuk mengukur kecepatan korosi secara berurutan pada elektroda yang sama.

Kinetika elektrokimia pada sebuah metal yang terkorosi dapat dikarakteriskan dengan penentuan kurang lebih 3 parameter polarisasi seperti *Corrosion current density* (i_{corr}), *Corrosion potential* (E_{corr}) dan *Tafel Slopes* (β_a and/or β_c). Kemudian perilaku korosi dapat diperlihatkan oleh sebuah kurva polarisasi (E vs $\text{Log } i$). Evaluasi dari 3 parameter mengarah ke penentuan *polarization resistance* (R_p) dan *Corrosion rate* (i_{Corr}), dimana sering dikonversi menjadi *Faradaic Corrosion rate* (C_R) yang memiliki satuan mm/y. Ini adalah sebuah percepatan proses elektrokimia untuk menentukan C_R yang memberi sebuah keuntungan lebih bahwa C_R ditentukan dengan kehilangan berat sejak proses berlangsung, dimana menunjuk ke hasil yang tidak memuaskan ketika C_R diubah dengan waktu.

Ekstrapolasi tafel dikenal sebagai ilustrasi pengaplikasian *mixed potential theory* pada korosi *aqueous*. Ketepatan katodik ekstrapolasi tafel membutuhkan sebuah proses reduksi tunggal. Kondisi ini sering ditemukan pada deaerasi larutan asam kuat dimana reaksi reduksi sebagai berikut:



Perilaku tafel yang baik dapat diamati pada deaerasi elektrolit netral. Dengan adanya semua reaksi katodik lainnya, polarisasi katodik akan dikontrol oleh air yang terhidrolisis.



Reaksi ini ekuivalen dengan reaksi (2.25); penambahan 2OH^- pada masing bagian (2.25) akan menghasilkan (2.26). Akan tetapi kinetika pada dua reaksi tersebut sangat berbeda. Kecepatan (2.25) relatif lebih tinggi, karena adanya H^+ dikontrol oleh pH. Kecepatan (2.26) kurang karena *dissociation* molekul air, sehingga kecepatannya lambat.

2.2 Korosi Baja Karbon Rendah ASTM A53 Di Dalam Tanah

Baja karbon murni akan mengalami korosi di hampir semua lingkungan atmosfer bila kelembaban relatif melebihi 60 % [1]. Jika lapisan butir-butir air terbentuk pada permukaan, laju korosi ditentukan oleh berbagai faktor lingkungan tetapi yang paling penting adalah adanya oksigen, pH dan hadirnya ion-ion agresif terutama oksida belerang dan klorida.

Komposisi baja, kondisi permukaan dan sudut *exposure*-nya sangat berpengaruh terhadap laju korosi. Penambahan karbon, mangan dan silikon cenderung mengurangi laju korosi. Laju korosi logam yang ditanam dalam tanah yang kering dapat diabaikan namun, bila kandungan butir-butir pH meningkat, laju korosi yang ada didalam tanah itu ditentukan oleh konduktivitas tanah dengan adanya air, pH, kandungan oksigen, konsentrasi ion agresif dan aktifitas biologi didalam tanah. Daya hantar atau pH sangat bergantung pada kandungan mineral dalam tanah dan ion-ion yang ada didalamnya.

Korosi ditanah adalah korosi *aqueous* dan mekanismenya adalah elektrokimia, tapi kondisi pada tanah dapat berubah dari atmosferik menjadi *completely immersed*, dimana kondisi yang berlaku tergantung pada kepadatan pada tanah dan air atau kandungan kelembaban. Adanya kelembaban ditanah akibat adanya kapilaritas dan poros pada tanah. Tanah terbentuk dengan kombinasi proses terjadinya cuaca (angin, air) maupun pembusukan organik.

2.2.4.1 Karakteristik Baja ASTM A53

Baja ASTM A 53 [5] adalah baja karbon rendah yang sesuai standar American Standar Testing Material untuk pembuatan pipa, steel, black and hot-dipped, Zinc-Coated, Welded-Seamsless. Baja ASTM A53 merupakan baja karbon rendah dengan kadar C = 0,25%. Berdasarkan ASTM A53, pipa baja digunakan didaerah *steam, air, gas* dan *air lines*[5].

Adapun spesifikasi tipe dan grade ASTM A53 sebagai berikut :

- *Type F—Furnace-butt welded, continuous welded, Grade A,*
- *Type E—Electric-resistance welded, Grades A and B*
- *Type S—Seamless, Grades A and B.*

Tabel 2.3 Komposisi kimia [5]

Process	Composition, max %								
	C	Mn	P	S	Cu ^A	Ni ^A	Cr ^A	Mo ^A	Va ^A
Type S (Seamless pipe)									
Open-Hearth, electric-furnace or basic Oxygen									
Grade A	0.25	0.95	0.05	0.045	0.40	0.40	0.40	0.15	0.08
Grade B	0.30	1.20	0.05	0.045	0.40	0.40	0.40	0.15	0.08
Type E (Electric Resistace Welded)									
Open-Hearth, electric-furnace or basic Oxygen									
Grade A	0.25	0.95	0.05	0.0045	0.40	0.40	0.40	0.15	0.08
Grade B	0.30	1.20	0.05	0.0045	0.40	0.40	0.40	0.15	0.08
Type F (Furnace-welded pipe)									
Open-Hearth, electric-furnace or basic Oxygen									
Grade A	0.30	1.20	0.05	0.045	0.40	0.40	0.40	0.15	0.08

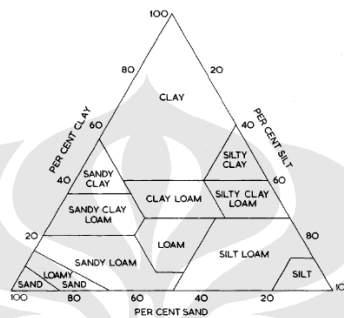
^Athe Combination of these five elements shall not exceed 1.00%

Table 2.4 Persyaratan *Tensile*[5]

	Type F	Type E dan Type S	
	Open Hearth, Basic Oxygen, or Electric Furnace Grade A	Grade A	Grade B
Tensile Strength, min. psi [MPa]	48 000 [330]	48 000 [330]	60 000 [415]
Yield Strength min psi [MPa]	30 000 [205]	30 000 [205]	35 000 [240]

2.2.4.2 Karakteristik Tanah Tekstur dan Struktur tanah

Tanah diklasifikasikan berdasarkan *range* ukuran umum pada zat bahan partikelnya. Partikel dengan ukuran antara 0,07 dan sekitar 2 mm diklasifikasikan sebagai pasir/*sands*. Partikel *silts* rangenya 0,005mm hingga 0,07 dan partikel clay memiliki range ukuran 0,005mm. Pembagian tanah lebih jelas ditunjukkan pada gambar 2.7.



Gambar 2.7 Perbandingan Ukuran Pasir, Lumpur, Dan Tanah Liat Membentuk Klasifikasi Tanah Berdasarkan Ukuran Partikel

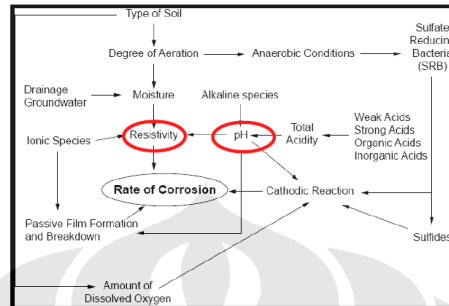
Tanah sebagai media elektrolit sangat mempengaruhi beberapa hal antara lain, karakteristik korosi, mekanisme korosi dan kecepatan korosi. Besar kerugian dan lain-lain. Berdasarkan media elektrolitnya, korosi dibagi menjadi 3, yaitu [6],

1. Atmosfer Corrosion
2. Dry corrosion
3. Wet corrosion

Korosi pada struktur logam baik yang terjadi didalam tanah (dry corrosion) dengan media elektrolit tanah, didalam laut (wet corrosion) dengan media elektrolit air laut dan didaerah pesisir (atmosfer corrosion) dengan media elektrolit udara, memiliki perbedaan karakteristik. Perbedaan ini dapat dilihat dari kemampuan media elektrolit menghambat dan menghantarkan arus listrik, tingkat keasaman, kadar oksigen, dan kandungan mineral yang berada didalam elektolit itu sendiri. Karakteristik media elektrolit inilah yang harus diperhatikan sehingga kita dapat mencegah dan mengontrol terjadinya korosi.

Variabel penentu agar kita dapat mencegah dan mengontrol terjadinya korosi adalah resistifitas tanah. Hal ini ditunjukkan pada gambar dari *Handbook*

of Corrosion, bahwa semua variabel dibawah akan mengerucut pada variabel yang berperan besar untuk menentukan korosifitas tanah, yaitu penentuan laju korosi. Tingkat korosifitas tanah mengacu pada nilai dari resistifitas tanah dengan variabel pengikut yang mempengaruhi resistivitasnya seperti pH, kelembaban, *ion species*, jenis-jenis alkalin dan total keasaman.



Gambar 2.8 Variabel Yang Mempengaruhi Korosifitas Dalam Tanah[6]

a. Kandungan Air

Air dalam bentuk larutan ataupun gas merupakan variabel yang menentukan kemampuan tanah sebagai media elektrolit dalam reaksi korosi. Pergerakan air mengikuti arah gravitasi yaitu, mengalir dari ketinggian tinggi ke rendah. Pergerakan air didalam tanah juga diakibatkan dari tingkat basah yang tinggi menuju daerah kering sehingga air bergerak dari tanah yang basah menuju tanah yang kering meskipun hal ini akan bertentangan dengan gravitasi jika tanah yang basah berada dibawah. Mekanisme pergerakan air dalam tanah ini dapat terjadi melalui gravitasi, kapilaritas, tekanan osmosis dan interaksi elektrostatis antar partikel tanah. Air dapat bergerak didalam tanah dikarenakan adanya porositas tanah sebagai tempat pergerakan air, tekstur dan struktur tanah sebagai kekuatan yang dapat menahan atau menampung air serta kandungan organik didalam tanah.

b. Derajat Aerasi

Derajat aerasi didalam tanah dipengaruhi oleh kedalaman tanah. Penurunan derajat aerasi atau kandungan oksigen sejalan dengan makin dalamnya kedalaman tanah begitu juga sebaliknya dengan peningkatan derajat aerasi. Konsentrasi oksigen merupakan hal terpenting dalam korosi. Oksigen adalah pemicu reaksi katodik pada korosi. Walaupun demikian kehadiran jenis bakteri

tertentu dapat meningkatkan kecepatan korosi walaupun dalam kondisi derajat aerasi yang rendah. Bakteri yang dimaksud adalah *sulfate-reducing bacteria*.

c. pH tanah

Reaksi tanah menunjukkan reaksi asam dan basa di dalam tanah yang ditentukan oleh konsentrasi ion H^+ dan OH^- . pH adalah nilai logaritma negatif dari konsentrasi ion H^+ atau aktivitas H^+ .

$$\begin{aligned} pH &= \log \frac{1}{AH^+} = -\log AH^+ \\ &= \log \frac{1}{[H^+]} = -\log [H^+] \end{aligned}$$

Konsep pH dalam disosiasi air murni memberikan hubungan sebagai berikut:

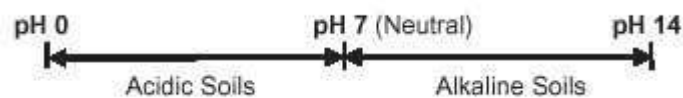
$$-\log [H^+] - \log [OH^-] = 14 \text{ atau}$$

$$pH + pOH = 14$$

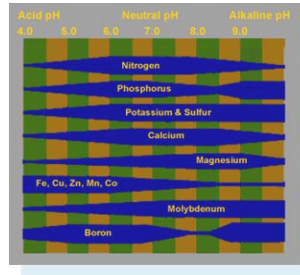
Secara kimiawi murni, nilai pH : 7 disebut netral, pH di bawah 7 disebut asam, pH di atas 7 disebut basa/alkalis. pH netral dalam kimiawi tanah dikaitkan dengan ketersediaan hara bagi tanaman. Kondisi keharaan yang baik adalah pada pH : 6,5

pH rendah → keasaman tinggi
pH tinggi → keasaman rendah

Sifat tanah ditentukan oleh pH tanah yang akan menentukan keadaan dari korosifitas tanah. pH tanah yang asam akan mengakibatkan korosifitas tanah meningkat sedangkan tanah yang bersifat basa mengakibatkan logam akan menghasilkan *scale*.



Gambar 2.9 Korosi Logam pada Tanah dipengaruhi pH



Gambar 2.10 Pengaruh Kandungan Unsur Kimia Dalam Tanah Terhadap pH

Peningkatan pH Tanah dipengaruhi beberapa faktor sebagai berikut:

1. Material penyusun

- Material penyusun bersifat asam akan berkembang menjadi tanah yang bersifat asam
- Material penyusun yang bersifat basa akan berkembang menjadi tanah yang bersifat basa/alkalin

2. Iklim

- Tanah yang berkembang di daerah iklim lembab/basah akan bersifat asam
- Curah hujan dan suhu sangat berpengaruh aktif terhadap asam – basanya tanah.

3. Bahan Organik.

- Bahan organik menghasilkan asam-asam organik hasil proses humifikasi.
- Asam organik memiliki pH nisbi yang rendah
- Asam anorganik (H_2CO_3 , H_2SO_4 , HNO_3) hasil dekomposisi

4. Pengaruh manusia

- Pemupukan dengan pupuk fisiologis yang bersifat asam akan menyebabkan tanah bersifat asam
- Pengapuran akan menyebabkan pH akan naik

5. Jenis lempung

- Lempung silikat merupakan sumber muatan negatif yang bersifat tetap.

PH tanah Oksidatif (pH H_2O_2)

- Menunjukkan nilai pH tanah setelah tanah mengalami oksidasi

- Larutan pengestrak adalah H₂O₂ 30% atau karena proses pengeringan pada udara terbuka.
- Penting untuk daerah tergenang atau rawa untuk melihat potensi bahaya clay (lempung) karena adanya reaksi oksidasi.
- Jika setelah oksidasi nilai pH ≤ 3,5 maka tanah mengandung pirit yang menghasilkan sulfat yang beracun.

- Reaksi :



Pirit dalam tanah oksidator

fasa padat

Dalam larutan tanah

Tabel 2.5 Pengaruh Keasaman Terhadap Beberapa Reaksi-Reaksi Kimia Yang Terpenting Didalam Tanah.

Group dipengaruhi	Reaksi umum yang Terjadi
Hidroksi dan oksida	$x\text{Al}^{3+} + 3_y\text{OH}^- \rightleftharpoons \text{Al}_x\text{OH}^{3-y} + y$ $\text{OH}^- \rightleftharpoons \text{X Al(OH)}_3 + \text{Fe}^{3+} + 3_x\text{OH}^- \rightleftharpoons$ $\text{Fe}_x\text{OH}^{3-x} + y\text{OH}^- \rightleftharpoons x\text{Fe(OH)}_3 + \frac{1}{2}x\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3_x\text{H}_2\text{O}$
Karbonat	$\text{CaCO}_3 + 2\text{H}^+ \rightleftharpoons \text{Ca}^{2+} + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$
kompleks *	$\text{CuCh} + 2\text{H}^+ \rightleftharpoons \text{Cu}^{2+} + \text{H}_2\text{Ch}$
fosfat (prinsip yang sama untuk MoO ₃ , and Mo ²⁺ yang diikatkan pada Fe dan Al	$\text{Fe(OH)}_2 \text{H}_2\text{PO}_4 + \text{OH}^- \rightleftharpoons \text{Fe(OH)}_3 + \text{H}_2\text{PO}_4^-$ $\text{Al(OH)}_2 \text{H}_2\text{PO}_4 + \text{OH}^- \rightleftharpoons \text{Al(OH)}_3 + \text{H}_2\text{PO}_4^-$ $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2 + 14\text{H}^+ \rightleftharpoons 10\text{Ca}^{2+} + 6\text{H}_2\text{PO}_4^- + 2\text{H}_2\text{O}$
Silikat	pengaruhnya tergantung pada variabel komposisi $\text{Mg}_2\text{SiO}_4 + 4\text{H}^+ \rightleftharpoons 2\text{Mg}^{2+} + \text{Si(OH)}_4$ $\text{SiO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{OH}^- \rightleftharpoons \text{OSi(OH)}_2^-$
CEC (pH-dependent)*	$\text{M}^+\text{X}^- + \text{H}^+ \rightleftharpoons \text{M}^+ + \text{HX}$
Sistem Redoks	$\text{Mn}^{2+} + \text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 \rightleftharpoons 2\text{H}^+ + \text{MnO}_2$ $2\text{Fe}_2++ 5\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 \rightleftharpoons 4\text{H}^+ + 2\text{Fe(OH)}_3$ $\text{H}_2\text{S} + 2\text{O}_2 \rightleftharpoons 2\text{H}^+ + \text{SO}_4$ $\text{NH}_4^+ + 2\text{O}_2 \rightleftharpoons 2\text{H}^+ + \text{NO}_3 + \text{H}_2\text{O}$
Ion-Ion Dalam Larutan tanah	$\text{HPO}_4^{2-} + \text{H}^+ \rightleftharpoons \text{H}_2\text{PO}_4^-$ $\text{H}_2\text{CO}_3 \rightleftharpoons \text{HCO}_3^- + \text{H}^+ \rightleftharpoons \text{CO}_3^{2-} + 2\text{H}^+$ $\text{Cu}^{2+} + \text{OH}^- \rightleftharpoons \text{CuOH}^+$
Mikroorganisma	Pengaruhnya beragam tergantung spesies

Kondisi Keharaan Pada Berbagai Kisaran pH sebagai berikut

1. Sangat Tinggi (diatas 8,5)

- Tanah alkali
- Ca dan Mg, kemungkinan tidak tersedia
- Fospat dalam bentuk Ca-P, Mg-P
- Bila kadar Na Tinggi, P menjadi Na-P yang mudah larut
- Aktivitas bakteri rendah
- Proses nitrifikasi menurun
- Ketersediaan hara mikro menurun, kecuali Mo

2. Tinggi (7,0 – 8,5)

- Penurunan ketersediaan P dan B sehingga terjadi kekahatan hara P dan B
- Adanya Co, Cu, Fe, Mn dan Zn
- Kadar Ca dan Mg Tinggi
- Tanah alkali

3. Sedang (5,5 – 7,0)

- Sifat netral
- Kisaran pH yang baik untuk sebagian besar tanaman
- Kadar hara (makro & mikro) optimum
- Aktivitas mikroorganisme (optimum)
- Sifat kimia tanah optimum

4. Rendah (<5,5)

- Tanah bersifat asam
- Ion Fosfat bersenyawa dengan Fe dan Al membentuk senyawa yang tidak cepat tersedia bagi tanaman.
- Semua hara mikro (kecuali Mo) menjadi lebih tersedia dengan peningkatan kadar asam,
- Ion Al dilepaskan dari mineral lempung pada nilai pH di bawah 5,5 dan
- Aktivitas bakteri menurun
- Proses nitrifikasi terhambat.

d. Resistifitas Tanah

Resistifitas tanah adalah besarnya karakteristik tanah sebagai media elektrolit untuk menghantarkan arus listrik yang menyebabkan terjadinya korosi. Telah diketahui bahwa tingkat korosifitas tanah akan meningkat saat arus yang mengalir meningkat yang menyebabkan nilai resistifitas dari tanah menurun. Nilai resistifitas sangat dipengaruhi oleh kandungan air baik dalam bentuk uap air atau cairan didalam tanah.

Resistifitas tanah adalah faktor terpenting dalam mengukur tingkat korosifitas tanah. Setiap tanah memiliki tingkat korosif yang berbeda dengan tanah yang lain karena nilai resistifitasnya yang berbeda. Tanah berpasir (*sandy soil*) memiliki korosifitas yang rendah akibat nilai resistifitasnya tinggi sedangkan tanah liat (*clay*) memiliki korosifitas yang tinggi akibat nilai resistifitasnya rendah. Tinggi dan rendahnya korosifitas tanah ini memiliki range nilai yang dapat dilihat sebagai berikut :

Tabel 2.6 Tingkat Korosifitas dari Pengaruh Resistivity Tanah[6]

Resistivity Tanah (ohm.m)	Tingkat korosifitas	
> 200	Tidak korosif	0
100 -200	Korosif rendah	1
50 – 100	Korosif rendah	2
30 – 50	Korosif	3
10 – 30	Sangat Korosif	4

Pada umumnya, kebanyakan tanah dan batuan mineral memiliki resistivitas yang tinggi. Arus listrik mengalir melalui uap air (kelembaban) yang mengisi celah-celah didalam pori tanah dan pasir dan melalui retakan tanah dan batuan. Oleh karena itu nilai resistifitas tanah dan batuan sangat dipengaruhi oleh pori tanah, jarak pori, retakan, komposisi dan konsentrasi kimia dari uap air dan temperatur. Tanah dapat dibedakan dari air dan batuan berdasarkan nilai resistivitas.

Tabel 2.7 Klasifikasi Tanah, Air Dan Batuan Secara Kasar Berdasarkan Nilai Resistifitas [6]

Reoginal Resistivitas Tanah	Resistivitas (Ohm.m)
Tanah Basah	50 – 200
Tanah Kering	100 – 200
Tanah Gersang	200 – 1000 atau lebih
Air	
Air Tanah	1- 10
Air Hujan	30 – 1000
Air Laut	± 0.2
Air Es	$10^5 - 10^8$
Jenis Batuan dibawah Tabel Air	
Batuan beku perapian dan metamorpik	100 – 10.000
<i>Consolidated sediments</i>	10 – 100
<i>Unconsolidated sediment</i>	1 – 10

Pada tabel 2.7 dapat dilihat bahwa tanah basah (*wet region*) memiliki resistifitas yang rendah. Tanah basah terletak dipermukaan bumi, seperti halnya, tanah lempung atau tanah liat. Nilai resistifitas yang rendah dari tanah basah dikarenakan kandungan uap air dan mineral yang ada pada tanah basah. Sedangkan tanah kering dan tandus (*dry dan arid region*) memiliki resistifitas yang tinggi. Nilai resistifitas yang rendah dari tanah basah dikarenakan kandungan uap air dan mineral yang ada di tanah basah.

Kemampuan tahanan (*resistance*) tanah dipermukaan bumi sebagai media elektrolit yang dapat diwakili oleh resistifitas tanah, dipengaruhi oleh beberapa faktor, yaitu, kelembaban, temperatur tanah, kelarutan garam (*dissolved salt*), kandungan mineral atau kimia didalam tanah, keadaan tanah dan kedalaman tanah. Pengukuran resistifitas tanah pada daerah tertentu bertujuan untuk mengetahui seberapa besar tahanan yang dapat dihasilkan dan dijaga agar biaya pengeluaran dari penginstalasi benda kerja diupayakan serendah mungkin.

Resistifitas tanah memiliki nilai yang beraneka ragam tergantung dari jenis tanahnya sendiri, misalnya daerah endapan lumpur berbeda dengan daerah

pinggiran sungai serta tanah kering berbeda dengan tanah berbatu granit di pegunungan[5]. Perbedaan nilai resistifitas ini dipengaruhi oleh beberapa faktor akan tetapi faktor yang paling mempengaruhi adalah kandungan uap air atau kelembaban. Faktor-faktor yang dimaksud, yaitu :

e. Kandungan uap air atau kelembaban[5]

Daerah dengan kelembaban tinggi dapat menyebabkan nilai resistifitas tanah suatu daerah akan kecil sehingga daerah itu memiliki tingkat korosi yang tinggi. Hal ini disebabkan uap air adalah salah satu pemicu atau media elektrolit dalam peristiwa korosi dan uap air dalam jumlah banyak berakibat daerah itu sangat rentan akan korosi. Fungsi uap air (H_2O) adalah media elektrolit yang dapat mengalirkan elektron. Sudah dijelaskan diatas bahwa peristiwa korosi memerlukan media elektrolit dan uap air dengan jumlah banyak akan memperbanyak jumlah media elektrolitnya sehingga mempercepat korosi. Dengan jumlah uap air yang banyak maka semakin banyak pula elektron sehingga peristiwa korosi semakin sering. Dibawah ini adalah nilai resistifitas pada berbagai kondisi jenis tanah.

Tabel 2.8 Nilai Resistivitas Tanah Berdasarkan Kelembaban Tanah[7]

Kandungan Uap Air (% berat diatmosfer)	Nilai Resistivitas (Ohm-meter)	
	Permukaan	Sandy Loam
0	$>10^7$	$>10^7$
2.5	2.500	1.500
5	1.650	430
10	530	185
15	190	105
20	240	63
30	64	42

f. Temperatur atau Suhu Lingkungan

Nilai resistifitas tanah juga dipengaruhi oleh temperatur lingkungan. Jika temperatur lingkungan tanah tinggi maka nilai resistifitas tanah tersebut rendah sebaliknya jika temperatur lingkungan tanah rendah maka nilai resistifitas tanah tinggi. Saat temperatur naik, air akan menguap. Jika temperatur lingkungan terus menerus meningkat maka semua air akan menjadi uap air. Seiring meningkatnya temperatur dipermukaan tanah maka akan meningkatkan tekanan

sehingga terjadi perbedaan tekanan antara permukaan tanah dan atmosfer udara sehingga uap air akan mengalir dari permukaan tanah yang bertekanan tinggi menuju atmosfer (awan) yang bertekanan rendah. Kenaikan temperatur yang sangat ekstrim seperti halnya gurun pasir akan mengakibatkan uap air akan terus menerus naik ke awan dan tidak turun ke bawah permukaan bumi lagi. Oleh karena itu, dilindungi dengan temperatur yang sangat tinggi, jarang ada bahkan tidak ada uap air atau kandungan air dipermukaan tanah yang mengakibatkan nilai resistifitas meningkat. Dibawah ini adalah berbagai nilai resistifitas berbagai kondisi temperatur pada tanah lempung berpasir dengan kandungan uap air 15,2% uap air.

Tabel 2.9 Nilai Resistivitas Tanah Berdasarkan Perubahan Temperatur[7].

Temperatur		Resistivitas (Ohm-meter)
⁰ C	⁰ F	
20	68	72
10	50	90
0(air)	32(air)	138
0(es)	32(es)	300
- 5	23	790
- 15	14	3300

g. Kandungan garam

Kandungan garam bisa bermacam-macam, misalnya, tembaga/copper sulfat (CuSO_4), sodium karbonat (CaCO_3) dan lain-lain. Ion-ion yang ada dalam garam berperan penting sebagai alat transportasi elektron. Kandungan ion berpengaruh besar untuk resistifitas. Jika semakin banyak kandungan garam maka semakin banyak pula alat transportasi untuk menghantarkan elektron. Saat semakin banyak elektron karena alat transportasinya semakin banyak yang dapat dihantarkan mengakibatkan semakin memudahkan elektron bergerak dalam arus listrik.

Komposisi dan konsentrasi kimia/ mineral terlarut.

Dibawah ini adalah pembagian material berdasarkan resistivity :

Tabel 2.10 Nilai resistifitas mineral didalam tanah [6]

Material	Resistivitas (ohm-meter) pada 20 ⁰ C
Silver	1.63×10^{-8}
Copper, annealed	1.72×10^{-8}
Copper, hard drawn	1.77×10^{-8}
Gold,pure	2.44×10^{-8}
Aluminium	2.82×10^{-8}
Zinc	5.68×10^{-8}
Brass	7.14×10^{-8}
Iron, pure	1.00×10^{-7}
Tin	1.15×10^{-7}
Lead	2.20×10^{-7}
Steel,Structural	3.00×10^{-7}
Constantan	4.90×10^{-7}
Mercury	9.62×10^{-7}
Carbon	3.00×10^{-5}
Sea Water	0.22

h. Potensial Reduksi-Oksidasi

Potensial redoks adalah beda potensial dari potential reduksi dan oksidasi dalam korosi . Potensial redoks berhubungan dengan derajat aerasi didalam tanah. Hal ini dikarenakan oksigen berperan penting dalam reaksi reduksi di katoda. Nilai potensial redoks yang tinggi menunjukkan derajat aerasi tinggi atau kandungan oksigen didalam tanah tinggi.

i. Kandungan Garam

Ada beberapa kandungan garam-garaman yang mempengaruhi tingkat korosifitas tanah seperti ion klorida dan ion sulfat. Ion klorida sangat berbahaya dalam peristiwa korosi sebab klorida dapat mempercepat korosi pada logam. Kehadiran ion klorida akan mempengaruhi nilai resistifitas menjadi lebih kecil.

Ion klorida didalam tanah berasal dari air di dalam tanah (*groundwater*) dan aliran air laut yang merembes ke dalam tanah dan ke lingkungan air tawar baik dipermukaan atau di dalam tanah. Ion klorida juga bisa berasal dari industri pertanian, kendaraan bermotor dan lain-lain. Kandungan sulfat juga tidak kalah berpengaruhnya dengan ion klorida. Kandungan sulfat bisa berasal bakteri anaerob SRB yang menghasilkan sulfide di lingkungan sekitarnya.

j. Mikroorganisme[8]

Bakteri secara garis besar digolongkan menjadi dua golongan yaitu bakteri aerob dan anerob.

- Bakteri Aerob artinya bakteri tersebut membutuhkan oksigen untuk hidup
- Bakteri Anaerob artinya bila ada oksigen bakteri tersebut akan mati, namun akan tumbuh subur dan gemuk bila kandungan oksigen di lingkungannya sangat kecil.

Sedangkan hubungannya dengan istilah pengoksidasi dan pereduksi di atas, maka bakteri pengoksidasi sulfat adalah bakteri aerob, sedangkan bakteri pereduksi sulfat adalah bakteri anaerob. SRB (*Sulphate Reduction Bacteria*) termasuk dalam golongan bakteri anaerob.

Mekanisme Korosi akibat adanya Bakteri SRB[

Besi dan baja karbon biasanya mempunyai laju korosi yang rendah dalam air netral terdeaerasi (oksigen tidak ada) dan di dalam larutan garam karena hanya terjadi reaksi reduksi katodik :



Bakteri anaerob pereduksi sulfat (*sulphate reducing bacteria* / SRB) akan menyebabkan korosi pada struktur baja yang ditimbun dalam tanah, dengan pembentukan lapisan tak protektif seperti FeS dan $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$, bila SRB pada awalnya tidak aktif. Bila SRB aktif sejak awal, maka produk korosi yang terbentuk adalah FeS dan sedikit FeCO_3 , pada pH 7 .

Mikroba ini menyebabkan terjadinya proses korosi dengan bentuk serangan korosi merata, sumuran, ataupun sel konsentrasi. Mekanisma korosi oleh bakteri dapat dikelompokkan dalam proses-proses berikut :

1. Memproduksi sel aerasi diferensial.
2. Memproduksi metabolit korosif.

Interferensi terhadap proses katodik dalam kondisi bebas oksigen. Mekanisme korosi oleh SRB dikemukakan oleh banyak ahli antara lain oleh *Kuhr* dan *Vlugt*, *Sharpley*, *Dexter*, *Booth* dan *Tiller* dan sebagainya. *Kuhr* dan *Vlugt* menyebutkan bahwa korosi oleh SRB dalam lingkungan anaerob dan netral[8], reaksi katodiknya tidak mungkin berupa reduksi O_2 ataupun reduksi H^+ . Namun serangan korosi yang terjadi bisa sangat parah, berarti ada reaksi katodik lain yang berlangsung, yang melibatkan SRB.

Kuhr dan *Vlugt* menyatakan bahwa SRB menggunakan hidrogen katodik untuk reduksi dissimilasi sulfat menurut reaksi sebagai berikut :



Depolarisasi Katodik oleh Bakteri Pereduksi Sulfat :



Produk Korosi :



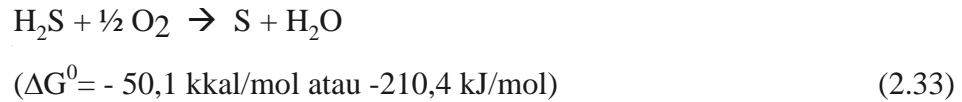
Reaksi Keseluruhan :



Salah satu spesies pendukung korosivitas SRB adalah bakteri besi berfilamen. Organisme ini mengoksidasi besi yang terlarut di dalam larutan menjadi *ferric hydrate* yang tak larut yang membentuk sarung yang menutupi sel-sel dan memproduksi semacam batang yang berbentuk filamen.

Siklus Sulfur[8]

Reaksi:



Dilakukan oleh mikroorganisme mikroaerofilik *Beggiatoa*, *Thioploca*, *Thiothrix*. Ciri khas mikroorganisme ini merupakan mikroorganisme gradien, yaitu hidup pada daerah antara (*interface*) lingkungan anaerob, sedimen, dan air yang mengandung oksigen.

Unsur S kemudian dapat mengalami oksidasi:

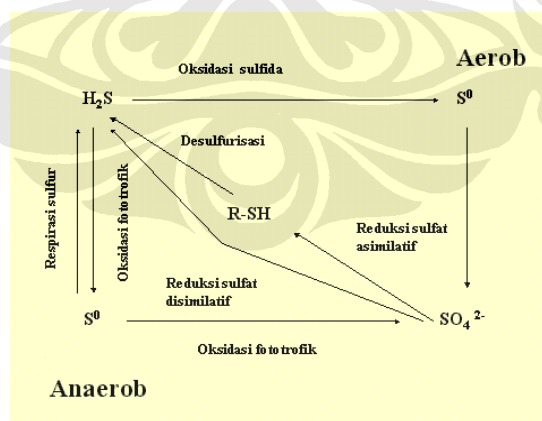


Mikroorganisme yg berperan: genus *Thiobacillus*

Oksidasi H₂S Fototrofik:



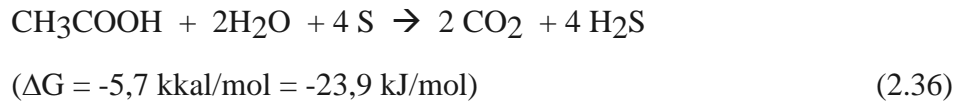
Mikroorganisme yg berperan: *Chromatiaceae*, *Ectothiorhodospiraceae*



Gambar 2.11 Oksidasi Sulfida

Reduksi Sulfur

Unsur S dapat digunakan oleh sejumlah mikroorganisme untuk respirasi, misal oleh *Desulfuromonas acetoxidans*



Bakteri lain yg dpt menggunakan S untuk respirasi: *Thermoproteus*, *Pyrobaculum*, *Pyrodictium*

Interaksi siklus S & Fe

Salah satu implikasi dari siklus S adalah peristiwa korosi pada pipa-pipa besi yang diletakkan di tanah yang mengandung S

Reaksi:



Tabel 2.11 Pengaruh Klorida, Sulfur Dan Ph Pada Korosi Jaringan Pipa Yang Ditanam [7]

Concentration	Degree of corrosivity
Chloride	
>5,000	Severe
1,500-5000	Considerable
500-1.500	Corrosive
<500	Threshold
Sulphate	
>10.000	Severe
1.500-10.000	Considerable
150-1.500	Positive
0-150	Negligible
pH	
<5.5	Severe
5.5-6.5	Moderate
6.5-7.5	Netral
>7.5	None(alkaline)

Tabel 2.12 Keuntungan dan kerugian dalam penggunaan metode *Coating* untuk proteksi korosi

Keuntungan	Kerugian
<ul style="list-style-type: none"> - Mudah diaplikasikan - Mudah dirawat/direpair - Tersedia dalam jumlah yang melimpah (bahan pelapis) - Relatif Murah - Efektif dalam pencegahan korosi - Dapat diaplikasikan bersama-sama proteksi katodik (CP) 	<ul style="list-style-type: none"> - Lifetime lapisan <i>pelapis</i> terbatas (<i>coating breakdown</i>) - Sifat mekanik relative rendah - Mengalami degradasi, khususnya oleh sinar ultraviolet (UV) - Ketahanan terhadap temperature relatif rendah, maksimal $\pm 150^{\circ}\text{C}$. - Dengan persiapan permukaan yang kurang baik dapat mengarah ke <i>corrosion under insulation</i>

2.3 Perlindungan Terhadap Korosi

Adapun perlindungan terhadap korosi dapat dilakukan dengan 4 cara yaitu :

1. Proteksi Anodik dan Katodik
2. Inhibitor
3. Pemilihan Material
4. Pelapisan

2.3.1 Proteksi Katodik Dan Anodik [9]

Proteksi katodik adalah sistem perlindungan permukaan logam dengan cara melalukan arus searah yang memadai ke permukaan logam dan mengkonversikan semua daerah anoda di permukaan logam menjadi daerah katodik. Sistem ini hanya efektif untuk sistem-sistem yang terbenam dalam air atau di dalam tanah. Sistem perlindungan seperti ini telah berhasil mengendalikan proses korosi untuk kapal-kapal laut, struktur pinggir pantai (*water font*), instalasi pipa dan tangki bawah tanah atau laut dan sebagainya. Dalam praktek, untuk memperkecil kebutuhan arus penggunaan proteksi katodik dikombinasikan dengan penggunaan bahan pelapis hanya saja syarat yang harus dipenuhi oleh bahan pelapisnya adalah harus tahan terhadap lingkungan alkalin yang akan

dihasilkan oleh sistem. Cara pemberian arus searah dalam sistem proteksi katodik ada dua yaitu dengan cara menerapkan anoda korban (*sacrificial anode*) atau dengan cara menerapkan arus tanding (*impressed current*)

Pada sistem proteksi katodik dengan anoda korban, tidak diperlukan memberikan daya. Paduan yang dijadikan anoda korban akan membangkitkan arus yang diperlukan sebagai akibat adanya perbedaan potensial dengan struktur yang dilindunginya. Adanya pembangkitan arus dari anoda korban mengakibatkan umur anoda korban terbatas. Jenis logam yang lazim digunakan sebagai anoda korban antara lain: Magnesium, seng atau aluminium pada berbagai derajat kemurnian atau paduan/campuran lain dengan komposisi yang khusus.

Sistem proteksi katodik arus tanding, memanfaatkan arus searah yang diberasal dari suatu sumber daya, dimana kutub positif dari sumber daya dihubungkan dengan anoda sedangkan kutub negatifnya dihubungkan dengan sistem yang akan diproteksi. Anoda yang digunakan umumnya memiliki umur yang relatif panjang seperti misalnya besi cor berkadar silikon yang tinggi, grafit atau aluminium. Disamping itu kadang-kadang digunakan juga besi *scrap*, paduan timah hitam, platina atau paduan platina dengan paladium dan paduan-paduan lainnya. Sumber daya yang digunakan tergantung pada mudah tidaknya jaringan listrik diperoleh. Untuk mengkonversikan arus AC menjadi DC digunakan *Rectifiers*. Jika tidak memungkinkan dapat digunakan *baterai* atau *solar power* sebagai sumber penyuplai arus searah. Masing-masing sistem tentu saja memiliki kelemahan dan kelebihan.

Tabel 2.13 Perbandingan sistem proteksi katodik dengan menggunakan anoda korban dan Arus tanding

Anoda korban	Arus tanding
Tidak memerlukan sumber daya dari luar	Memerlukan sumber daya
Luaran arus terbatas	Arus dapat divariasikan
Terbatas hanya untuk tahanan rendah	Tidak masalah untuk medium yang bertahanan tinggi
Memerlukan elektrolit	Memerlukan elektrolit
Biaya instalasi relative rendah	Biaya instalasi relative tinggi
Persoalan interferensi relative rendah	Dapat menimbulkan masalah interferensi
Lingkup proteksi terbatas	Dapat memproteksi struktur yang lebih luas.

Jika penggunaan sistem proteksi katodik tersebut dikombinasikan dengan penggunaan pelapis; maka ada tiga hal yang perlu diperhatikan yaitu:

1. Selama proses proteksi berjalan (meskipun beroperasi dengan karakteristik sempurna) pada sisi katoda senantiasa akan timbul ion-ion hidroksida (alkalinitas). Karena itu, bahan pelapis harus tahan terhadap alkalinitas.
2. Gas hydrogen yang dihasilkan dari sistem proteksi katodik yang tidak sempurna dapat mengelupaskan lapisan pelindung.
3. Pelapis yang bersifat lebih *permeable* (misalnya *Oleoresinous phenolic*) mudah mengalami *electroendosmosis* dari pada bahan pelapis yang kurang *permeable* seperti epoksi. Bentuk korosi yang kompleks tersebut diakibatkan oleh aliran ion yang lebih besar pada permukaan yang diproteksi secara katodik. Elektroendosmosis adalah suatu proses dimana uap air melewati lapisan karena adanya arus listrik pada arah sumber listrik yang bermuatan sama dengan muatan lapisan. Kebanyakan cat bermuatan negatif dan bila permukaan baja bersifat katodik atau mempunyai sumber elektron, maka air akan bergerak menuju daerah yang bermuatan negatif sehingga bila daerah tersebut mempunyai sifat adhesi lemah, pelepasan akan terbentuk.

Pada perlindungan secara anodik (proteksi anodik), tegangan sistem yang dilindungi dinaikkan sehingga memasuki daerah anodiknya. Pada kondisi ini sistem terlindungi karena terbentuknya lapisan pasif. Syarat yang harus dipenuhi agar sistem ini berjalan dengan baik adalah bahwa karakteristik lingkungannya harus stabil. Pada jenis lingkungan yang tidak stabil (berfluktuasi) penerapan sistem proteksi anodik tidak dianjurkan.

2.3.2 Inhibitor

Perlakuan kimia untuk perlindungan korosi pada bagian internal. Ditambahkan dalam lingkungan dalam jumlah yang sedikit (ppm atau mg/liter), umumnya 10-100 ppm, sehingga dapat mengubah sedikit permukaan material.

Inhibitor berasal dari kata inhibisi : menghambat, jadi inhibitor ditambahkan untuk menghambat reaksi antarmuka antara material dengan lingkungan.

Adapun pembagian inhibitor sebagai berikut :

- Interfasa inhibisi : interaksi inhibitor dengan permukaan logam membentuk lapisan tipis (presipitasi).
- interfasa inhibisi : penurunan tingkat korosifitas lingkungan, misalnya : pengurangan kadar oksigen, netralisasi gas yang bersifat asam, pengaturan pH.

Jenis / Mekanisme Inhibitor

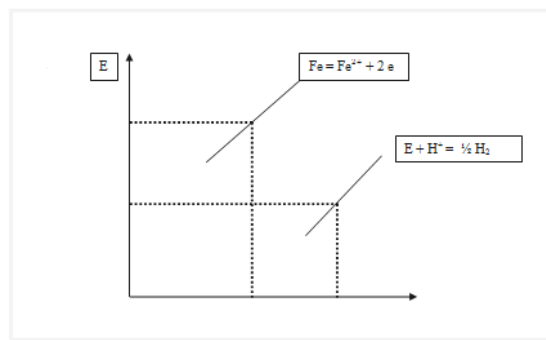
1. *Physical Inhibitor [Adsorption inhibitor (Organic based)]*

Molekul inhibitor secara physical terabsorpsi ke permukaan material atau senyawa organik yang mengabsorpsi pada permukaan logam dan menekan kelarutan logam serta mwnurangi reaksinya.

Contoh : nitrogen dan amina organik.

2. *Passivator [Oxidizer (Anodic Inh.)]*

- Membentuk lapisan pasiv pada permukaan material, sehingga memperlambat reaksi anodik. contoh : *chromat, halogen*.
- Mengubah potensial korosi kearah positif, Menstabilkan passive film, mengurangi laju korosi.
- Merepasive logam jika lapisan film rusak
- Mencegah adsorpsi anion yang agresif seperti ion Cl^- dengan cara mengabsorpsi anion yang bersifat inhibit.
- Membantu memperbaiki lapisan film dengan membentuk senyawa pasivator yang mampu menutupi lubang pada lapisan film.



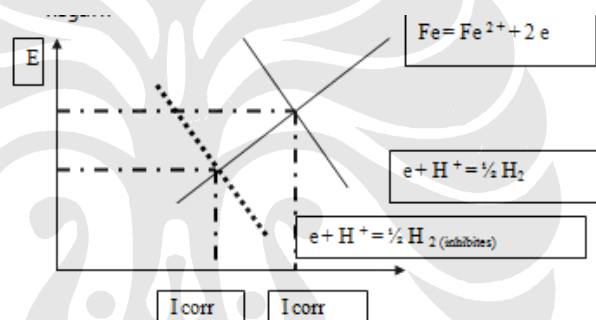
Gambar 2.12 Skema diagram polarisasi; inhibitor anodik

Tabel 2.14 Perbedaan Inhibitor Anodik *Oxidizing* Dan *Non-Oxidizing*

inhibitor Anodik	
Oxidizing	non-oxidizing
membutuhkan O ₂ terlarut	Tidak Membutuhkan O ₂ terlarut
Contoh : <i>kromat, nitrit</i>	contoh: <i>phospate, benzoate, hydroxide, molybdate</i>

3. Pembentukan Film [*Precipitation inhibitors (Cathodic Inh.)*]

- Memperlambat reaksi katodik dengan mengubah potensial ke arah negatif

**Gambar 2.12** Skema diagram polarisasi; inhibitor katodik

Mekanisme inhibitor katodik:

Terbentuk endapan $M(OH)_n$ akibat tingginya pH setempat pada permukaan katoda mencegah oksigen masuk ke permukaan logam. Presipitasi, contoh: phosphate, silicat, borates. Lapisan film memperlambat proses korosi secara:

- Meningkatkan polarisasi anodik / katodik
- Mengurangi difusi ion dipermukaan logam
- Meningkatkan tahanan antar muka logam dan elektrolit
- Meningkatkan overvoltage reaksi oksidasi/reduksi

4. Destimulator

Menurunkan kadar O₂ pada lingkungan (*oxygen scavenger*)

Contoh: reaksi *hydrazine*



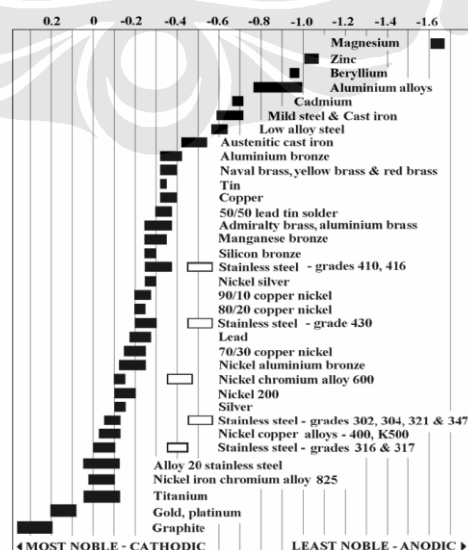
2.3.3 Pemilihan Material [10]

Dalam konteks kontrol korosi, memilih logam atau paduan sedemikian sehingga pertukaran ion dengan lingkungannya tidak berlangsung dengan cepat atau dengan kata lain memilih logam atau paduannya yang perbedaan potensialnya dengan lingkungannya tidak terlalu besar. Dalam praktek, jika lingkungannya relatif agresif (*severe*) wajib memilih logam atau paduannya yang memiliki ketahanan korosi lebih baik dari baja. Hal ini didasarkan pada aspek logam tersebut imun pada lingkungan tersebut atau logam tersebut membentuk lapisan tipis yang memiliki sifat protektif dan memiliki *recoverability* yang memadai apabila lapisan tersebut terkelupas.

Namun dalam prakteknya, suatu sistem peralatan jarang sekali tersusun oleh satu jenis logam, sehingga karakteristik pengendalian/pertukaran ion menjadi tidak sederhana. Dalam hal ini, jika perlu ada yang dikorbankan maka desainer dapat memilih komponen yang bentuknya tidak rumit atau *accessibilitas*-nya pada alat penggantian komponen.

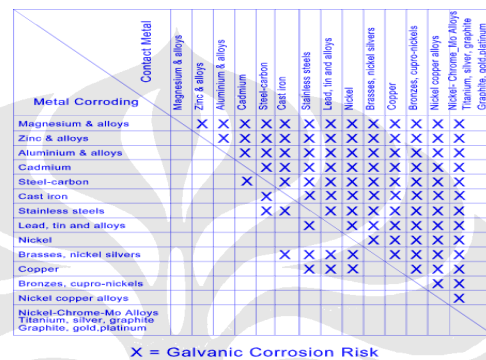
Faktor-faktor lain yang sering diperhitungkan dalam proses pemilihan material:

1. Memiliki ketahanan korosi yang lebih tinggi di suatu media tertentu yang mana pada deret galvanik berada pada daerah Noble atau katodik.



Gambar 2.13 Deret Galvanik Berbagai Jenis Logam [10]

Dari grafik dapat dilihat bahwa baja (*steel*) dan tembaga (*copper*) memiliki beda potensial yang cukup besar sehingga berpotensi terjadi korosi, *Stainless steel* yang dikatakan material sukar terkorosi, terlihat dari grafik ternyata ada beberapa material yang lebih mulia (*noble*) diantaranya grafit. Interaksi antara grafit-*Stainless Steel* harus dihindarkan karena dapat menyebabkan stainless steel terkorosi.



Gambar 2.14 Korosi Logam Yang Bersentuhan Dengan Logam Lainnya(Korosi Galvanik)[10]

2. Persyaratan umur komponen
3. Variasi sifat serta mudah tidaknya material yang diinginkan diperoleh diinjau dari aspek bentuk dan ukuran yang diinginkan serta faktor harga.
4. Analisis yang cermat perlu pula dilakukan mengingat karakteristik logam/paduan dapat berubah akibat proses pengerjaan atau selama terkena pada kondisi operasi yang spesifik
5. Pemilihan material saat ini tidak hanya terbatas pada saat merancang suatu komponen tetapi juga meliputi proses reevaluasi terhadap material yang telah atau sedang digunakan pada suatu komponen/peralatan yang sudah ada,dalam rangka meningkatkan performansi,menaikkan reliabilitas dan menurunkan biaya.

Pemilihan material tidak sebatas logam saja, saat ini banyak material yang terbuat dari plastik,elastomer,komposit dan keramik. Material tersebut digunakan baik sebagai material dasar atau digunakan sebagai pelapis baik sebagai pelapis permukaan luar (coating) maupun sebagai pelapis permukaan bagian dalam (lining).

Pemilihan material dengan pitting resistant equivalent number/penambahan alloy semakin tinggi maka Pre semakin bagus.

$$PRE = \% Cr + 3,3 \% Mo + 16 \% Ni$$

Dimana material Titanium ketahanan korosi yang baik dibandingkan Nikel dan stainless steel.

2.3.4 Pelapisan

Salah satu cara pengendalian korosi dengan cara memberi lapisan perlindungan (coating protection). Proteksi lapisan yang lazim digunakan pada jaringan pipa adalah eksternal pelapisan, yang sering kali dikombinasi dengan proteksi katodik. Untuk korosi bagian dalam pipa (internal korosi) pengendaliannya lebih sukar, bilamana kebocoran/kegagalan terjadi umumnya lebih merata sepanjang jaringan yang berhubungan dengan korosi bagian luar.

Berdasarkan definisi ASTM D16-47, cat yaitu larutan dispersi yang dapat diubah menjadi larutan padat yang relatif tidak tembus cahaya setelah digunakan sebagai lapisan tipis pada suatu permukaan bahan dasar.

Pelapisan biasanya dimaksudkan untuk memberikan suatu lapisan padat dan merata sebagai bahan isolator atau penghambat aliran listrik diseluruh permukaan logam yang dilindungi. Fungsi dari lapisan tersebut adalah untuk mencegah logam dari kontak langsung dengan elektrolit dan lingkungan sehingga reaksi logam dan lingkungan terhambat.

2.3.4.1 Pelapisan dengan Resin Epoksi [11]

Pada dasarnya pelapis dibagi dua :

- A. *Physical drying* yaitu, proses pengeringan secara alami
- B. *Chemical Curing* yaitu, proses pengeringan secara kimia

Adapun penjelasan adalah sebagai berikut:

A. *Physical drying*

Kering secara alami ialah pelapis tersebut diproduksi dan dikalengkan dalam bentuk satu komponen, yang mana bahan perekat, zat pewarna dan pelarut sudah dicampurkan dalam satu kemasan. Pelapis ini

dapat mudah mengering dan membentuk suatu lapisan secara alami setelah penguapan dari zat pelarut

Pada umumnya sifat dari kering alami adalah :

- a. *Reversible* artinya, dapat kembali dalam bentuk semula walaupun pelapisan sudah berbulan-bulan bahkan tahunan, ia akan mudah dilarutkan kembali oleh pelarut tertentu
- b. *Solvent sensitive* artinya, sangat peka dan tidak tahan terhadap pelarut yang lebih kuat dari pelarutnya sendiri
- c. *Thermoplastic* artinya, pelapis tersebut mudah menjadi lunak atau lentur pada temperatur tertentu.

B. Chemical Curing

Proses kering secara kimia terbagi atas:

1. Reaksi dengan oksigen
Dalam udara terbuka komponen-komponen akan membentuk suatu lapisan, sedang oksigen sebagai penghantarnya (oksidasi).
2. Reaksi antara dua komponen.
Artinya, pelapis tersebut diproduksi dan dikemas dalam bentuk dua komponen yang mana bahan perekat, zat pewarna dan pelarut dipisahkan dalam dua kemasan terpisah, yang disebut base dan curing agent. Pelapis ini baru dicampurkan bila akan digunakan dan akan membentuk suatu lapisan keras.
3. Reaksi dengan carbon dioxide dalam udara, atau reaksi dalam satu komponen dengan jalan memanaskan permukaan dengan panas yang tinggi.

Pada umumnya sifat kering secara kimia antara lain :

- *Non-reversible*, artinya tidak dapat kembali dalam bentuk semula, tidak mudah dilarutkan kembali oleh pelarut tertentu.
- *Solvent Resistant*, artinya ia sangat tahan terhadap pelarut yang lebih kuat dari pelarutnya sendiri
- *Non Thermoplastic*, artinya pelapis tersebut tidak akan lunak atau lentur pada temperatur tertentu.

Tabel 2.15 Jenis –Jenis Solution Pada Setiap Klasifikasi Pelapis[11]

Kering secara alami (<i>physically drying</i>)	Solution	<ul style="list-style-type: none"> - Tars - Bitumens - Chlorinated Rubbers - Vinyls - Acrylics - Polyvinyl Butyrals
Kering secara reaksi kimia (<i>Chemically Curing</i>)	Oksidative	<ul style="list-style-type: none"> - Oil - Oleoresionous - Alkyds - Modified Alkyds - Epoxy Ester
	Two-Pack	<ul style="list-style-type: none"> - Epoxy - Polyurethanes - Polyesters
	Other	<ul style="list-style-type: none"> - Polyurethanes - Zinc Silicanes - Silicones

a. Pelapis Epoksi[11]

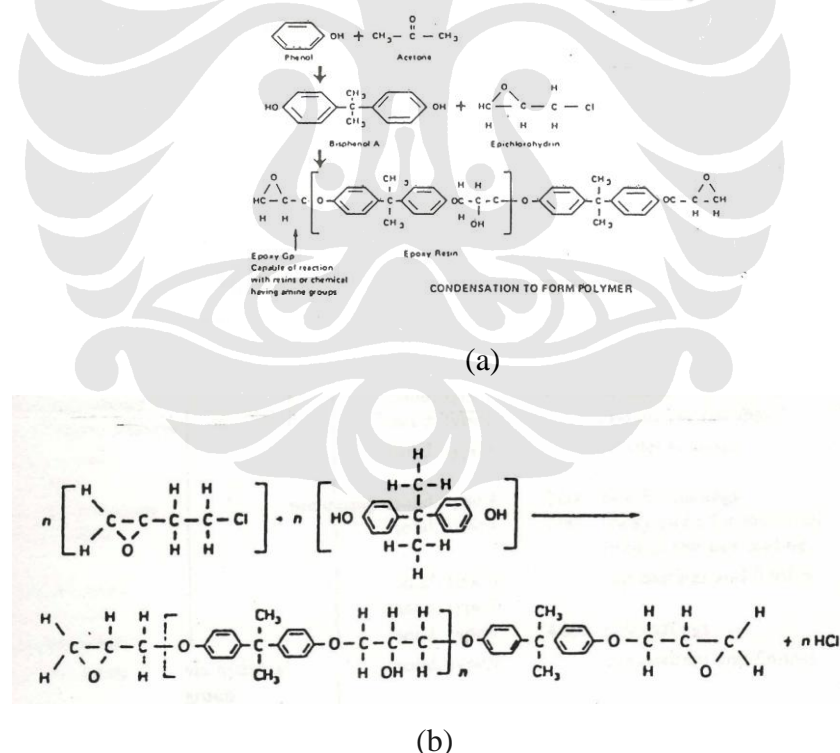
Epoksi merupakan jenis polimer tipe termoset. Umumnya terdiri dari kumpulan “mer” yang tersusun terulang. Gabungan dari polimer yang berbentuk rantai panjang dan bercabang membentuk polimer bersambung silang (*cross linked*) yang mengandung epoksi atau *oxirane*.

Biasa terdiri dari 2 bagian, yang pertama berisikan resin epoksi, *pigmen* dan beberapa pelarut, untuk bagian kedua adalah kopolimer (polimer yang terbentuk dari monomer yang berbeda) agen pengeras dapat berupa *polyamine, amine product* dan *polyanide*. Cat dengan binder mengalami pengeringan secara kimia, dimana terjadi reaksi dua komponen antara resin dan *hardener* (pengeras) yang ditambahkan sebelum pengecatan dimulai, dengan presentase pengenceran kurang dari 5 % akhirnya mengeras membentuk struktur makromolekul. Reaksi pengeringannya akan merubah dari berat molekul rendah menjadi struktur termoset tiga dimensi dengan sifat-sifat unggul. Sifat dari pelapis epoksi ini ditentukan dari tipe dan berat molekul dari resin epoksi dan kopolimer agennya, yang digunakan untuk membentuk ikatan *cross linked*. Karena pengeringan resin epoksi adalah reaksi kimia, lingkungan atmosfer oksigen tidak mempengaruhi sehingga tidak ada batas dari ketebalan lapisan yang dikeringkan.

Hanya pada lapisan cat tebal yang penting untuk diperhatikan adalah sifat kecenderungan cat basah untuk turun meleleh (*sag*) akibat lapisan tebal pada permukaan vertikal dan pelarut tertinggal dalam lapisan. Pelarut yang tertinggal dalam lapisan cat dapat menjadi penyebab kerusakan pada cat, akan tetapi pada cat epoksi 2 komponen, pelarut yang digunakan sedikit sekali atau bahkan jenis bebas pelarut.

Pengeringan resin epoksi dapat terjadi pada temperatur ruang maupun pada temperatur tinggi, tergantung dari bahan yang dipilih. Pengeringan pada temperatur ruang biasanya memerlukan dua komponen yang memisahkan antara resin dan *hardener*, sedangkan pengeringan pada temperatur tinggi biasanya pada campuran 1 komponen.

Dalam industri pelapisan sebagian dari resin epoxy yang dipakai adalah yang bertipe 'glycidyl ether', yang merupakan turunan dari 'bisphenol-A' dan 'Epichlorohydrin'.



Gambar 2.15 (A) Rumus Bangun Kelompok 2] (B)Pembentukkan Epoxy Dari Epichlorohydrin Dan Bisphenol-A[11]

Jenis Epoksi *cycloaliphatic* juga dikembangkan yang juga merupakan turunan dari molekul diatas, tapi tidak menonjol dalam daya lekat, ketahanan kimia dan fleksibilitas. Tipe epoksi *cresol novolac*, adalah jenis yang tahan temperatur tinggi dan kimia, namun keadaanya getas dan tidak begitu fleksibel.

Walaupun epoxy umumnya bereaksi secara katalisasi, tetapi reaksi *cross-linked* yang terjadi nyatanya adalah sebuah kopolimerisasi. Reaksi yang terjadi utamanya adalah cincin epoxy pada akhir grup molekul, dan *hidroxylys* pada bagian tengah rantai resin epoxy tersebut. Yang biasa menjadi zat pengeras adalah sebuah '*amine atau polyamide*'. Dengan *cross linked* diturunkan dan diaktifkan oleh hidrogen menjadi nitrogen amine.

Tabel 2.16 Karakteristik Epoksi [13]

Densitas	1.11 – 1.40 g/cm ³ (0.040 – 0.050 lb _m /in ³)
Modulus Elastisitas	2.41 Gpa(0.35 10 ⁶ psi)
Tensile Strength	27.6 – 90 Mpa[4-1.3 ksi]
% Elongation	3 – 6
Fracture Toughness	0.6 MPa√m(0.5 ksi√in)
Koefisiem Termal Ekspansi	81 – 117 10 ⁻⁶ (°C) ⁻¹
Konduktifitas Termal	0.19 W/m-K

Tabel 2.17 Nama Dagang,Karakteristik Dan Aplikasinya[13]

Jenis material	Nama Dagang	Aplikasi Umum	Aplikasi Khusus
Epoxies	Araldite Epikote Epon Epi-rez Lekutherm Nepoxide	Polimer termosetting Sangat bagus; gabungan dari sifat mekanik dan ketahanan korosi;dimensi stabil;daya ikat baik;tidak mahal;dan sifat kelistrikan baik	Kelistrikan molding,sinks,adhesives,pelapis pelindung,digunakan dengan laminat fiberglass

Dalam penelitian ini pelapisan yang digunakan Resin Epoksi dari International Paint Indonesia. *Modified Epoxy* interzone 954, terdiri dari dua komponen , low VOC(*Volatile Organic Compound*) dan Kepadatan tinggi serta memiliki *Cathodic disbondment resistance* yang sangat baik. Modified Epoxy lapisan penghalang dibuat untuk perlindungan masa panjang pada aplikasi pelapisan tunggal. Epoksi ini digunakan untuk penggunaan pemeliharaan *splash*

zone lepas pantai dan juga digunakan dilingkungan korosif seperti pabrik Kertas, pabrik kimia, *jetties* dan *sluice gates*. Adapun komposisi epoksi yang digunakan pada pengujian ini adalah sebagai berikut:

Tabel 2.18 Komposisi Kimia Resin Epoksi Part A

Kandungan	No CAS	Batasan konsentrasi %
Bubuk Magnesium Silikat	014807-96-6	2.5 - 10
Xilen (campuran isomer)	001330-20-7	2.5 - 10
Iron(III) oxide	001317-61-9	2.5 - 10
Petroleum derived aromatic hydrocarbon resin	068410-16-2	2.5 - 10
Etil benzen	000100-41-4	1 - 2.5
3-Glisidiloksiipropil-trimetoksisilan	002530-83-8	1 - 2.5
Metil Isobutil Keton	000108-10-1	1 - 2.5
Bis-amine wax	068604-06-8	<1
Alkyl(C12-C14)glycidyl ether	068609-97-2	<1

Tabel 2.19 Komposisi Kimia Resin Epoksi Part B

Kandungan	No CAS	Batasan konsentrasi %
Benzil alkohol	000100-51-6	25 - 50
Isoforon diamin	002855-13-2	10 - 25
M-Xililenediamin	001477-55-0	2.5 - 10
2,4,6-tris(dimetilaminometil)fenol	000090-72-2	2.5 - 10
N-Tallow-1,3-diaminopropan dioleate	061791-53-5	2.5 - 10
Metil Isobutil Keton	000108-10-1	2.5 - 10

Tabel 2.20 Karakteritik Performa Pelapis Epoksi

Colour		Range available via chromscan system		
Gloss Level		Gloss		
Volume Solids		85% ± 3 % (depends on colour)		
Typical Thickness		350 – 500 microns (14-20 mils) dry equivalent to 412-588 microns (16.5-23.5 mils) wet		
Theoretical Coverage		1.70 m ² /Litre at 500 microns d.f.t and stated volume solids 68 sq.ft/US gallon at 20 mils d.f.t and stated volume solids		
Practical Coverage		Allow appropriate loss factors		
Method of application		Airless spray, air Spray, brush, roller		
Drying Time		Overcoating interval with recommended topcoats		
Temperature °C (°F)	Touch Dry	Hard Dry	Minimum	maximum
10 (50)	14 hours	24 hours	24 hours	14 days
15 (59)	10 hours	18 hours	18 hours	10 days
25 (77)	4 hours	8 hours	8 hours	7 days
40 (104)	90 minutes	3 hours	3 hours	5 days
Flash point	Base (part A)	C/A (part B)	Mixed	
	30°C (86°F)	44°C (111°F)	33°C (91°F)	
Product Weight	1.7 – 1.8 Kg/l (14.2 – 15 lb/gal)			
VOC	130 g/l	UK-PG6/23(92).appendix 3		
	1.36 lb/gal	USA-EPA Method 24		

Tabel 2.21 Prosedur pelapisan dengan Modified Epoxy 954

Mixing	Material is supplied in two containers as a unit. (1). Agitate base (part A) with a power agitator (2). Combine entire contents of curing agents (part B) with base (part A) and mix thoroughly with power agitator.			
Mix Ratio	4 Parts : 1 Parts by volume			
Working Pot Life	10 ⁰ C (50 ⁰ F)	15 ⁰ C (59 ⁰ F)	25 ⁰ C (77 ⁰ F)	40 ⁰ C (104 ⁰ F)
	3 hours	2 hours	90 minutes	45 minutes
Airless Spray	Recomended	- Tip range 0.53-0.66 mm(21-26 thou) - Total output fluid pressure at spray tip not less than 176 kg/cm ² (2,500 p.s.i)		
Airspray (pressure Pot)	Recomended	Gun Air Cap Fluid Tip	DeVilbiss MBC or JGA 62 AC	
Brush	Suitable	Typically 100-500 microns (4-6 mils) can be achieved		
Roller	Suitable	Typically 75-125 microns (3-5 mils) can be achieved		
Thinner	International GTA220 GTA415	(or)	Do not thin more than allowed by local environment legislation.	
Cleaner	International GTA882 GTA415	(or)		
Works Stoppages	Do not allow material to remain in hoses, gun or spray equipment. Thoroughly flush all equipment with international GTA882			

b. Proses Pelapisan[11]

Persiapan permukaan yang baik sangat dibutuhkan untuk berbagai jenis pelapis ini. Lebih dari 60 % keberhasilan dari sistem perlindungan menggunakan pelapisan (coating) ditentukan oleh persiapan permukaannya. Dalam pemilihan pembersihannya tergantung dari logam dasarnya yang akan dilapisi.

Tujuan tahapan preparasi permukaan adalah:

- Memperbesar luas permukaan benda kerja, sehingga adanya daya lekat (adhesi) pelapis dengan logam dasar menjadi semakin kuat
- Membentuk faktor mekanik dimana dengan permukaan yang kasar akan bertindak sebagai gigi (mengikat)

Secara garis besar persiapan permukaan dibagi menjadi dua bagian yaitu :

a. Cara mekanik

- Pembersihan secara manual yaitu dengan menggunakan sikat,sendok, pisau,palu,amplas dan sebagainya. Pembersihan dengan cara ini hanya mampu melepaskan karat yang mudah lepas, pelapis dan kontaminan lain yang daya lekatnya rendah. Biasanya cara ini efektif dilakukan pada benda kerja yang berukuran kecil.
- Pembersihan dengan tenaga lain (*power tool cleaning*), dengan menggunakan energi listrik atau udara untuk menggerakkan

peralatan pembersihan. Meskipun laju pembersihan dengan cara ini lebih cepat tetapi kemampuannya kira-kira sama.

- Pembersihan dengan api, menggunakan semburan api yang dihasilkan dari *oxyacetylene* pada permukaan benda kerja. Karena adanya perbedaan koefisien ekspansi panas antara benda kerja dengan kontaminan yang akan dilepaskan dan karena adanya tekanan uap air yang terjebak oleh produk korosi, pelapis akan terkelupas. Cara ini tidak baik dilakukan pada benda kerja yang memerlukan ukuran yang presisi dan berbentuk datar dan tipis, karena benda tersebut akan mengalami deformasi.
- Pembersihan dengan uap air, digunakan untuk menghilangkan minyak, debu dan lemak pada bagian yang sukar dijangkau dengan metode pembersihan dengan pelarut. Biasanya menggunakan *boiler* kecil dengan konsumsi air yang bersifat basa sekitar ± 750 l/jam dengan tekanan ± 14 kg/cm².
- Pembersihan dengan semprot air, menggunakan tekanan air untuk menghilangkan kontaminan yang tidak terikat kuat seperti pelapis yang terkelupas, lemak, minyak, debu dan lainnya.
- Pembersihan dengan blasting (*Abrasive Blast Cleaning*), dengan cara ini diperlukan tingkat derajat kebersihan yang tinggi. Partikel *abrasive* akan menumbuk dan mengikis permukaan logam, semua kontaminan dan pelapis yang terikat kuat akan lepas dari permukaan logam.

b. Cara kimia

Pembersihan dilakukan dengan melarutkan semua kontaminan dalam hal ini senyawa oksida-oksida logam, hasil reaksi dengan larutan kimia jenis asam yang dipakai (*pickling*), dan dengan senyawa basa, lemak, minyak yang diubah menjadi sabun yang larut.

Senyawa- seanyawa asam yang sering digunakan antara lain :

1. H_2SO_4/ H_3PO_4

- *pickling* dengan 5- 25 % H_2SO_4 , $50^{\circ}C-60^{\circ}C$
 - cuci dengan air bersih $60^{\circ}C - 65^{\circ}C$
 - pasivasi dengan H_3PO_4 2%, $80^{\circ}C-90^{\circ}C$
2. HCl/ H_3PO_4
 3. H_3PO_4
 - *pickling* dengan 10- 20 % H_3PO_4 , $60^{\circ}C-85^{\circ}C$
 - pasivasi dengan 2% H_3PO_4 , $80^{\circ}C-90^{\circ}C$

Pasivasi diperlukan agar permukaan logam yang dibersihkan tidak mudah terserang korosi untuk beberapa saja. Untuk meningkatkan pasivasi terkadang dilakukan dengan senyawa Zn phosphate atau senyawa kromat.

2.3.4.2 Adhesi (Daya Lekat)

Untuk melihat kemampuan lekat dari pelapis (adhesi) dan kegagalan yang berhubungan dipengaruhi oleh kesetimbangan antara fasa-fasa yang ada didalamnya, yaitu padatan, zat cair (pelapis) dan lingkungan (udara). Formulasi semacam ini memudahkan kita untuk menilai suatu kontak permukaan dapat terjadi atau tidak antara berbagai fasa. Kontak permukaan antara dua fasa padat akan terjadi apabila salah satu fasa padat tersebut dalam keadaan cair sanggup untuk membasahi permukaan fasa padat yang lain, berarti antara dua permukaan fasa padat akan terjadi ikatan tarik-menarik. Ada tiga jenis atau proses dimana suatu pelapis dapat melekat ke suatu permukaan yaitu : adhesi Mekanik, adhesi polar dan adhesi kimia.

A. Adhesi Mekanik

Merupakan adesi yang paling berperan dalam perekatan pelapis. Sangat tergantung pada kekasaran permukaan, jadi semakin kasar permukaan maka semakin baik adesi mekaniknya. Permukaan yang mengalami pembersihan abrasi atau pencelupan secara kimia yang terkontrol dapat memberikan suatu profil yang optimum. Kedalaman dari kekasaran permukaan (jarak dari lembah ke puncak) disebut pola jangkar (*anchor pattern*). Pelapis yang hanya tergantung hanya pada adesi mekanik memerlukan pola jangkar yang dalam untuk mendapatkan gaya

yang baik pada substrat yang mempunyai sifat lekat fisik dan kimia yang baik. Untuk keperluan ketebalan pelapis untuk memberikan adesi yang memuaskan dan untuk melindungi substrat akan bergantung pada macam pelapis dan jenis lingkungan.

B. Adhesi polar

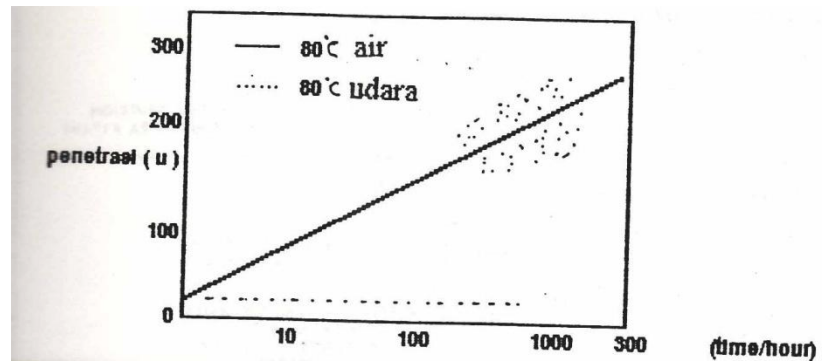
Adesi polar atau ikatan bergantung pada gaya tarik resin pada substrat. Resin bertindak sebagai magnet yang lemah, sehingga disebut sebagai kutub utara dan selatan dari suatu magnet. Tingkat gaya tarik antar pengikat dan elemen-elemen dari permukaan-permukaan logam menentukan jumlah adesi polar. Material akan mempunyai adesi yang lebih baik apabila pada permukaan yang dibersihkan dengan secara abrasi dan dengan celup asam (pickling). Resin-resin seperti tipe epoksi menunjukkan adesi yang sangat baik karena mempunyai gaya tarik polar yang sangat besar pada permukaan logam. Resin-resin yang alin sangat berbeda tarikan polarnya atau kemampuannya melekat pada permukaan logam.

C. Adhesi Kimia

Adesi kimia adalah reaksi yang sebenarnya antara pelapis dengan permukaan logam yang dilapis. Reaksi seperti ini terjadi dalam primer vinyl, dimana adanya asam posfat mengawali reaksi antara logam, resin dan pigmen inhibitor untuk menghasilkan pelapis yang melekat kuat dan tahan korosi.

Pengaruh Penetrasi Air Terhadap Kekuatan Adhesi

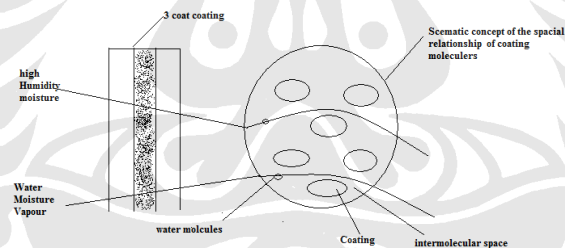
Untuk pemakaian pelapis dilingkungan yang banyak air, adanya senyawa air ini akan menimbulkan masalah dalam perlindungan logam dasar oleh pelapis. Molekul air merupakan molekul polar yang cukup kuat dengan masuknya molekul polar air kedalam lapisan *coating*, akan segera berikatan dengan molekul polar dari polimer, sehingga menyebabkan daya tarik menarik antar molekul polimer akan menurun. Dengan turunnya ikatan polar dalam polimer maka akan menurunkan sifat mekanis dari pelapis itu sendiri. Pengaruh masuknya molekul air ini berbanding lurus dengan waktu bisa dilihat pada gambar berikut:



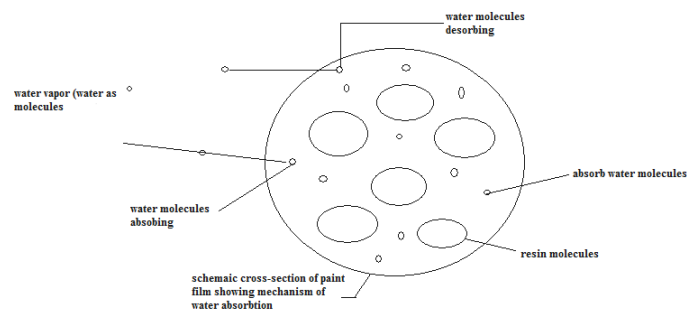
Gambar 2.16 Penetrasi Air Terhadap Waktu [11]

Laju penetrasi molekul uap air adalah keadaan yang menyatakan laju penetrasi molekul air yang melewati ruang antar molekul lapisan pelapis, hal ini merupakan fenomena yang spesifik dan dipengaruhi oleh ketebalan lapisan, pigmen, dan aplikasi dari pelapis tersebut.

Seperti jaringan pipa yang dilalui oleh produk-produk hidrokarbon yang diikuti oleh unsur lainnya, terutama air yang kandungan cukup besar. Adapun untuk absorpsi molekul air adalah menyatakan jumlah molekul-molekul air yang terdapat atau tertahan dalam struktur molekul pelapis.

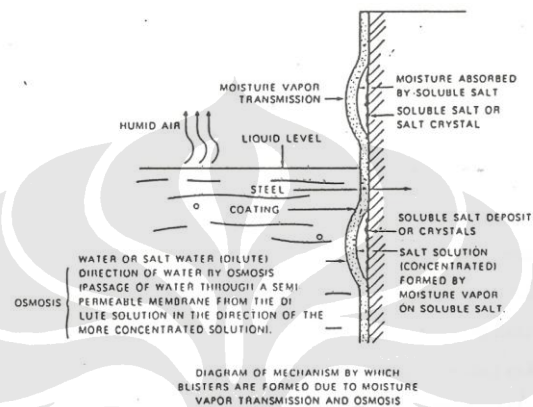


Gambar 2.17 Skema Penetrasi Air Pada Pelapis [11]



Gambar 2.18 Skema Peristiwa Osmosis[11]

Faktor utama yang mendorong mekanisme masuk atau berkumpulnya molekul air di dalam lapisan adalah peristiwa osmosis. Hal ini terjadi bila molekul-molekul uap air melewati membran semi permeabel dari larutan yang mempunyai konsentrasi rendah menuju larutan yang berkonsentrasi tinggi. Tekanan dibawah lapisan coating biasanya cukup tinggi sehingga menyebabkan pada daerah rendah adhesinya akan melemah daya lekat lapisan itu, tetapi daya adesi lebih tinggi dari tekanan osmosis, maka daya lekat pelapis tetap kuat.



Gambar 2.19 Osmosis Pada Lapisan Coating[12]

Disamping itu peranan temperatur dan lingkungan kimia juga bisa mengakibatkan terjadinya peristiwa osmosis.

2.3.4.3 Kegagalan Pelapisan

Kegagalan plastik disebabkan oleh 2 faktor utama yaitu:[17]

- a. Kurangnya preparasi permukaan dan juga pada proses pelapisannya
- b. Efek atmosferik

Berbagai macam kegagalan yang sering timbul dalam proses pelapisan dan pada saat pengaplikasiannya yang mengganggu fungsi dari pelapisan itu sendiri sebagai berikut: [11]

a. Pengapuran (*chalking*)

Terbentuk lapisan serbuk pada permukaan pelapisan yang terekspos diudara. Dengan warna yang putih ini disebabkan sinar ultra violet, kelembaban yang tinggi, oksigen dan zat kimia. Lapisan ini terdiri dari produk degradasi dari pengikat, residu pigmen dan kontaminasi dari luar. Jika pengapuran ini terjadi, pertimbangan utama adalah kecepatan

pengikisan karena pengapuran. Ketebalan lapisan yang cukup harus diaplikasikan untuk memberikan ketahanan yang ekonomis, jika terjadi pengapuran yang besar maka pelapisan dilakukan kembali.

b. Retak (*Cracking*)

Keadaan ini berhubungan dengan berjalannya waktu dari pelapis. Retak disebabkan oleh penyusutan lapisan selama waktu tertentu. Jika kegagalan ini terjadi dalam garis panjang maka disebut retak dan terkadang retak ini diperburuk oleh ketebalan yang berlebihan.

c. Terkelupas, Serpihan Dan Delaminasi

Disebabkan karena lemahnya sifat adesi. Terkelupas adalah dimana lapisan lepas dalam ukuran besar atau terbentuk lembaran. Serpihan adalah lapisan yang lepas dalam bentuk serpihan lapisan yang kecil-kecil, adapun bila kegagalan terkelupas dan serpihan ini terjadi diantara lapisan pelapis maka ini disebut Delaminasi. Hal ini disebabkan karena kurangnya preparasi permukaan, pemilihan lapisan primer yang kurang baik, terlalu tebalnya pelapis atau kurang cukupnya pengeringan antara lapisan. Kehilangan adesi ini tidak harus langsung terjadi tetapi berjalan sesuai waktu, keganasan lingkungan dan ketebalan lapisan. Lapisan kerak yang sering terdapat pada logam besi hasil dari pengerolan panas dapat menyebabkan retak pada permukaan logam, dan jika uap air atau oksigen berpenetrasi kedalam retakan ini, korosi yang terjadi kemudian akan mendorong kerak dan menarik pelapis. Besarnya nilai kelembaban udara, temperatur selama pelapisan dapat menyebabkan kegagalan karena permukaan yang terkontaminasi oleh lingkungan tersebut. Begitupun dengan ketebalan pelapis, yang mana jika terlalu tipis maka untuk memperoleh sistem yang melekat kuat kurang terpenuhi, dan jika terlalu tebal, pada saat pelapis tersebut kering akan ada proses penyusutan, yang mengakibatkan tegangan-tegangan didalam pelapis. Jika tegangan itu terus menumpuk maka akan melebihi gaya adesi yang ada.

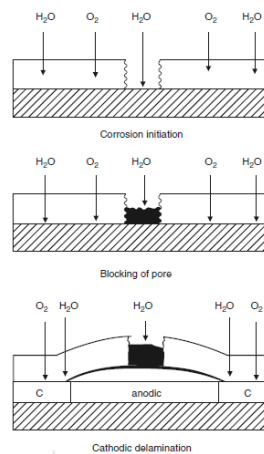


FIGURE 7.25
Blister initiation and propagation under a defective coating (cathodic delamination).

Gambar 2.20 Inisiasi Blistering Dan Propagasi Dibawah Pelapis
(Delaminasi Katodik)[14]

d. Pelepuhan (*Blistering*)

Keadaan ini ditandai dengan terdapatnya bulatan kecil atau besar yang menonjol dipermukaan pelapis. Keadaan ini diakibatkan oleh tereksposnya lapisan pada lingkungan yang mempunyai kelembaban tinggi atau dalam lingkungan air. Uap air yang masuk melalui lapisan film berkondensasi pada lapisan yang memiliki daya adesi lemah, blister kemudian akan meluas, yang dimana didukung oleh garam yang terlarut atau zat-zat lain yang terlarut dalam lapisan film. Blister yang terjadi dengan cara ini dapat melarutkan pigmen anti korosi dari pelapis dan akan terisi air yang diikuti dengan terjadinya karat. Blister juga dapat disebabkan oleh difusi gas hidrogen pada logam, hal ini disebabkan penggunaan pada gas aliran gas hidrokarbon.

Degradasi Pada Polimer/Plastik

Material plastik tidak menunjukkan laju korosinya. Plastik diserang oleh reaksi kimia atau dengan pelarutan. Pelarutan adalah penetrasi pada plastik oleh korodan.

Degradasi plastik dapat diklasifikasikan berdasarkan mekanisme penyerangan[15]:

- a. Disintegrasi atau degradasi pada *physical nature* seperti absorpsi, penyerapan, *Solvent action*, atau faktor lainnya.
- b. Oksidasi, dimana ikatan kimia diserang
- c. Hidrolisis, dimana sambungan ester diserang
- d. Radiasi
- e. Degradasi termal, yang menunjukkan depolimerisasi dan kemungkinan repolimerisasi
- f. Dehidrasi
- g. Gabungan dari mekanisme diatas.

2.4 Korosi Pipa Dibawah Lapisan Epoksi (Corrosion Under Insulation)[4]

Kabut dan pengembunan bisa mendatangkan bahaya korosi dari udara karena membasahi seluruh permukaan termasuk yang tersembunyi. Lapisan-lapisan tipis air dari kabut dan embun tidak akan mengalir dan akan tetap di situ sampai menguap oleh hembusan angin atau meningkatnya temperatur. Untuk memulai serangan, selapis tipis air yang tidak kelihatan sudah lebih dari cukup. Kebanyakan logam seperti besi, baja, nikel, tembaga, dan seng mengalami korosi bila kelembaban relatif lebih besar dari 60 %. Jika kelembaban lebih dari 80 %, karat pada besi dan baja menjadi higroskopik (menyerap air) dan dengan demikian laju serangan meningkat lagi.

Laju korosi di bawah insulasi dalam kondisi tanah basah memiliki laju 20 kali lebih besar dibandingkan pada kondisi atmosferik (*ambient*). Bila pipa yang terkorosi harus diperbaiki / diganti, maka diperlukan biaya bermilyar-milyard untuk satu Pabrik, tidak termasuk kehilangan produksi serta akibat keseluruhan dari Pabrik yang mati (shut down). Karena tidak terlihat, maka *corrosion under insulation* (CUI) seakan terjadi secara mendadak, dan dapat menimbulkan kebocoran dengan potensial terjadinya bahaya, khususnya pada aliran fluida yang berbahaya, sehingga sebagai contoh akan memicu terjadinya kenaikan temperature atau tekanan pada vessel

Tiga faktor yang diperlukan sehingga terjadi korosi di bawah isolasi (corrosion under insulation / CUI) :

1. Air

Air akan terbawa selama penyimpanan isolasi ataupun pada saat pemasangan, karena kebocoran system, tidak efektifnya waterproofing, pemeliharaan yang kurang baik atau "service lapses".

2. Kandungan Bahan Kimia dalam Air.

Bila pH turun di bawah 4, korosi akan berlangsung sangat cepat. Seperti korosi asam (*acidic corrosion*) umumnya terjadi pada material *Carbon Steel*. Sehingga selalu dijaga kondisi pH isolasi berada pada kondisi netral/alkali pada range antara 7,0 – 11,7.

3. Temperatur

Temperatur berpengaruh terhadap korosi atmosferik melalui dua cara :

- a. Peningkatan temperatur biasanya diikuti oleh peningkatan laju reaksi. Temperatur service antara 32°F dan 212°F (0°C dan 100°C) memungkinkan air masih dalam bentuk cair. Dengan range temperatur tersebut, laju korosi akan naik dua kali setiap kenaikan temperatur 27°F sampai 36°F (15°C sampai 20°C). Potensial korosi maksimum umumnya berada di antara kedua range tersebut. Stress Corrosion Cracking yang diinduksi oleh Chloride pada material Carbon Steel umumnya terjadi pada range ambient (atau bisa juga di bawah) dari 248°F (120°C).
- b. Perubahan temperatur berpengaruh terhadap kelembaban relatif dan dapat menyebabkan pengembunan pada titik embun (dew point condensation). Jika temperatur turun lebih rendah dari titik embun, udara menjadi jenuh dengan uap air dan titik-titik air akan mengendap pada setiap permukaan yang terbuka. Pengembunan bisa terjadi di semua permukaan yang cukup dingin, baik di luar maupun di dalam isolasi. Titik-titik air dapat menggenang pada tempat-tempat tertentu dan membentuk kolam elektrolit yang tersembunyi dalam suatu struktur sehingga korosi terjadi di tempat yang tidak disangka-sangka.

Selain itu ada dua kondisi temperatur korosi yang khusus yaitu :

- a. Temperatur siklis yang mempercepat korosi,
- b. Temperatur extreme yang tercapai selama terjadinya shut down pabrik, di mana air terakumulasi tanpa pembekuan atau evaporasi (pada kondisi ini penggantian isolasi harus direkomendasikan).

Secara umum mekanisme terjadinya korosi dibawah insulasi sangat berhubungan dengan peristiwa Osmosis. Air yang terperangkap pada pelapis dengan perubahan temperatur menguap, sehingga memungkinkannya masuknya ion-ion agresif masuk kedalam cat sehingga terjadi reaksi elektrokimia antara logam dan ion-ion agresif serta air yang berada dilapisan tersebut (korosi). atau diakibatkan dengan adanya soil stress. Soil stress [7] adalah gap yang terbentuk antara pelapis dengan dan permukaan pipa akibat ketidakseragaman permukaan pipa khususnya pada Seams dan lasan girth sehingga air dan mikroorganisme dapat masuk hingga menyebabkan sel korosi dibawah *Disbonding coating*. Soil stress atau tenting sering terjadi pada tanah dengan clay basah yang tinggi.

2.5 Penilaian Umur Struktur (*Life Assessment*)

Pada struktur baja yang terpendam, terdapat dua hal utama yaitu umur *coating* protektif dan laju korosi dari baja tersebut. Kecepatan degradasi tersebut berhubungan dengan ketebalan coating yang diaplikasikan sehingga merupakan fungsi dari laju korosi.

Contohnya, struktur baja memiliki ketebalan 2 mm dengan ketebalan *coating* minimal 190 mikron, bagian dalam dan luar. *Coating* Epoksi memiliki laju korosi **0,08103** mpy = $0,08103 \times 25,4 = 2,058$ *micron per year* dan struktur baja memiliki laju korosi 6,2mpy = $6,2 \times 0,0254 = 0,15746$ mm *per year* sehingga dapat di perkirakan umur stuktur maupun coating seperti berikut :

Tabel 2.22 Contoh Perhitungan Umur Struktur/*Coating*

Umur Coating Epoksi	$(190 \text{ micron coating}) / (2.058 \text{ micron/year})$	92 tahun
Umur Baja Terkorosi	$(2 \text{ mm}) / (0,15746 \text{ mm/year})$	12 tahun
	Total	104 tahun

Pipe coating	Desirable characteristics	Limitations
Coal tar enamels	80+ years of use Minimum holiday susceptibility Low current requirements Good resistance to cathodic disbondment Good adhesion to steel	Limited manufacturers Limited applicators Health and air quality concerns Change in allowable reinforcements
Mill-applied tape systems	30+ years of use Minimum holiday susceptibility Ease of application Good adhesion to steel Low energy required for application	Handling restrictions—shipping and installation UV and thermal blistering— storage potential Shielding CP from soil Stress disbondment
Crosshead-extruded polyolefin with asphalt/butyl adhesive	40+ years of use Minimum holiday susceptibility Low current requirements Ease of application Nonpolluting Low energy required for application	Minimum adhesion to steel Limited storage (except with carbon black) Tendency for tear to propagate along pipe length
Dual-side-extruded polyolefin with butyl adhesive	25 years of use Minimum holiday susceptibility Low current requirements Excellent resistance to cathodic disbondment Good adhesion to steel Ease of application Nonpolluting Low energy required for application	Difficult to remove coating Limited applicators
Fusion-bonded	35+ years of use Low current requirements Excellent resistance to cathodic disbondment Excellent adhesion to steel Excellent resistance to hydrocarbons	Exacting application parameters High application temperature Subject to steel pipe surface imperfections Lower impact and abrasion resistance High moisture absorption
Multi-layer epoxy/extruded polyolefin systems	Lowest current requirements Highest resistance to cathodic disbondment Excellent adhesion to steel Excellent resistance to hydrocarbons High impact and abrasion resistance	Limited applicators Exacting application parameters Higher initial cost Possible shielding of CP current

Gambar 2.22 Estimasi Waktu Pakai Pada Jaringan Pipa Yang Dilapisi[1]

Fusion Bonded Epoxy (FBE)[7]

Pelapis ini Beberapa tahun yang lalu Digunakan pada pipa diameter $\frac{3}{4}$ hingga $8 \frac{5}{8}$ in (1,9 Cm hingga 21,9 Cm), namun sekarang diamerika utara dapat digunakan untuk pipa 48 in (122 Cm). Untuk tahun belakangan ini FBE diaplikasikan pada 8-10 mill (203,2 – 254 μ m) untuk lebih kompetitif dengan pelapis lain. Sekarang ini, pelapis tersebut diaplikasikan pada minimum 12 mil hingga 25 mil(304,8-635 μ m). Sekarang FBE tidak lagi menggunakan pelapisan primer dan pemanasan pada saat pengaplikasiannya. Sistem FBE terbaru yang dikenalkan pada tahun 1990-an menunjukkan ketahanan terhadap penyerapan air dan abrasi. Ketahanan terhadap *Soil Stress* dan *Cathodic Disbondment* telah dibuat untuk pelapisan khusus pipa diamerika serikat. Soil stress [7]adalah gap yang terbentuk antara pelapis dengan dan permukaan pipa akibat ketidakseragaman permukaan pipa khususnya pada Seams dan lasan girth sehingga air dan mikroorganisme dapat masuk hingga menyebabkan sel korosi dibawah *Disbonding coating*. Soil stress atau tenting sering terjadi pada tanah dengan clay basah yang tinggi.