

# KOROSI



*JH*

MILIK PERPUSTAKAAN UNIV. NEGERI PADANG	
DITERIMA TGL. :	4-1-2000
SUMBER/HARGA :	Hd 1
KOLEKSI :	IC1
NO. INVENTARIS :	468/IC/2000 - k2 (23)
KLASIFIKASI :	620.112.23 8um k

Oleh :

**Drs. Sumantri, MT**

Editor :

**Drs. Jhon Hendri, M.Si**

**FAKULTAS TEKNIK**

**UNIVERSITAS NEGERI PADANG**

---

**DIP Proyek Universitas Negeri Padang**

Nomor : 071/XXIII/008/4/--/1999

Tanggal : 1 April 1999

**MILIK PERPUSTAKAAN  
UNIV. NEGERI PADANG**

## Kata Pengantar

Buku ajar berjudul Korosi ini ditulis dalam rangka pengadaan buku ajar bagi mahasiswa, sebagai upaya untuk peningkatan mutu lulusan. Program penulisan buku ajar ini dibiayai oleh Proyek P2T Universitas Negeri Padang.

Buku ajar berjudul Korosi ini dirancang sebagai buku bacaan wajib bagi matakuliah Korosi dalam kurikulum D3 Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Negeri Padang dengan bobot 2 SKS termasuk didalamnya pengajaran teori dan praktikum.

Buku ajar ini terdiri dari sembilan bab, dan pada masing-masing bab telah ditetapkan tujuan umum dari pengajaran pada setiap babnya. Di samping itu buku ajar ini telah diusahakan ditulis dengan bahasa yang sederhana supaya mudah dipahami oleh para mahasiswa, dan para pembaca yang ingin mengetahui masalah yang berkaitan dengan korosi.

Pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terimakasih kepada Pemimpin Proyek P2T Universitas Negeri Padang yang telah memberikan dana dalam penulisan buku ajar ini, dan kepada Ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Negeri Padang yang telah memberikan kepercayaan kepada penulis untuk menulis buku ajar ini. Kemudian kepada Drs. John Hendri, M.Si yang telah berkenan untuk mengedit buku ini penulis mengucapkan banyak terimakasih.

Akhirnya penulis menyadari masih ada kekurangan dalam buku ini, maka penulis mengharapkan para pembaca, terutama teman sejawat untuk memberikan sumbang saran guna perbaikan atau penyempurnaan buku ajar ini.

Padang, Desember 1999

Penulis

## DAFTAR ISI

	halaman
Kata Pengantar	
Bab I : Korosi	1
A. Pendahuluan	1
B. Pengertian Korosi	1
C. Biaya dan Pentingnya Korosi	3
D. Laju Korosi	7
E. Kesimpulan	8
Bab II : Proses Korosi	10
A. Pendahuluan	10
B. Sel Korosi	10
C. Seri Galvanik	14
D. Pentingnya Katoda	16
E. Korosi Pada Baja	17
Bab III : Dasar-Dasar Korosi	21
A. Pendahuluan	21
B. Dasar Korosi	21
C. Prinsip Dasar Elektrokimia dari Korosi	22
D. Prinsip Dasar Termodinamika Korosi	30
Bab IV : Memprediksi Reaksi Korosi	36
A. Pendahuluan	36
B. Memperkirakan Reaksi Korosi	36
Bab V : Aspek Metalurgi Dalam Korosi	65
A. Pendahuluan	65
B. Struktur Logam Murni	65
C. Deformasi Plastik pada Logam	69
D. Struktur Logam Polikristalin	71
E. Paduan	73
F. Pengelasan	81
G. Perpatahan dan Pengujian Patah	82

Bab VI : Jenis-Jenis Korosi Metalik	84
A. Pendahuluan	84
B. Jenis-jenis Korosi pada Logam	85
Bab VII : Korosi Lingkungan	113
A. Pendahuluan	113
B. Korosi Lingkungan	113
Bab VIII : Sifat Korosi Logam	128
A. Pendahuluan	128
B. Jenis Logam	128
Bab IX : Pengontrolan/Pengendalian Korosi	151
A. Pendahuluan	151
B. Pengontrolan/Pengendalian Korosi	151
C. Pengendalian Korosi dengan Lapis Lindung Organik (Cat)	164
D. Pengendalin Korosi dengan Proteksi Katodik	172
E. Pengendalian Korosi dengan Proteksi Anodik.	189

Daftar Pustaka

# BAB I

## KOROSI

### A. Pendahuluan

Pada bab ini akan membahas masalah korosi yaitu mengenai definisi korosi, penjelasan tentang kerugian akibat terjadinya korosi, biaya untuk penanggulangan korosi, beberapa akibat atau implikasi terjadinya korosi, dan beberapa metoda dalam menggambarkan besar laju korosi.

Setelah mempelajari bab ini diharapkan para pembaca khususnya mahasiswa akan dapat menyebutkan, menjelaskan, dan memahami :

1. Definisi korosi dan aspek-aspek yang berkaitan dengan korosi.
2. Kerugian yang diakibatkan oleh terjadinya korosi dan biaya yang harus dikeluarkan untuk penanggulangan korosi.
3. Pengaruh-pengaruh akibat terjadinya korosi, dan
4. Menghitung laju korosi, sehingga dapat ditetapkan metoda penanggulangan korosi secara tepat.

### B. Pengertian Korosi

Korosi didefinisikan sebagai degradasi atau penurunan mutu logam akibat logam tersebut bereaksi dengan lingkungannya. Terminologi ini mengacu kepada proses atau kerusakan yang diakibatkan oleh suatu proses tertentu.

Korosi adalah berkaitan dengan logam, ketika atom-atom logam mengalami suatu reaksi korosi, maka atom-atom logam tersebut diubah menjadi ion-ion melalui reaksi dengan unsur di lingkungannya. Jika atom logam diberi simbol M, maka korosi dapat digambarkan melalui persamaan reaksi;



yang merupakan reaksi korosi sejati, sedangkan reaksi setengahnya lagi bukan reaksi korosi meskipun untuk terjadinya korosi reaksi tersebut harus berlangsung. Penurunan mutu logam tidak hanya melibatkan reaksi kimia namun juga reaksi elektrokimia di mana antara bahan-bahan terjadi perpindahan elektron. Elektron adalah bermuatan negatif maka dalam pengangkutannya/perpindahannya akan

menimbulkan arus listrik sehingga reaksinya di-pengaruhi oleh potensial listrik. Hal-hal penting yang perlu diperhatikan ialah:

1. Dalam beberapa kasus, korosi tidak dapat dilihat secara jelas kerusakannya. Pengaruh reaksi dengan lingkungan menyebabkan sifat-sifat mekanis bahan seperti kekuatannya akan berubah. Dari hasil penelitian ternyata bentuk-bentuk korosi semakin hari semakin banyak jenisnya, sehingga merupakan hal yang sangat penting bagi para rekayasa untuk terus dapat mengikuti perkembangannya.
2. Hilangnya gaya mekanis material atau yang lebih dikenal dengan sifat keausan material akibat terjadinya korosi, sehingga jika terjadi korosi maka material akan kehilangan sifat ketahanan keausannya.
3. Definisi korosi banyak ditujukan untuk logam, dengan demikian dikenal dengan istilah metallic corrosion (korosi logam). Mekanisme korosi untuk bahan-bahan non logam pada prinsipnya diakibatkan oleh adanya perbedaan sifat fisik dan sifat kimia dari bahan tersebut.
4. Terminologi korosi atau karat umumnya adalah untuk logam besi dan baja, meskipun keramik, dan plastik juga dapat terkorosi.

Karat pada besi atau baja adalah contoh paling banyak dan umum dari metallic corrosion (korosi logam). Ada banyak contoh mengenai korosi logam yang dapat dilihat dalam kehidupan sehari-hari, seperti korosi pada sistem saluran pembuangan (exhaust system), korosi terhadap badan mobil, korosi pada pipa air, korosi pada konstruksi baja (struktur), dan lain sebagainya. Selain itu juga dapat dilihat contoh korosi pada logam non fero, misalnya korosi pada perak, dimana warna perak yang mengkilap menjadi berwarna hitam akibat adanya reaksi dengan belerang (terbentuk perak sulfida). Atap tembaga yang berubah warna menjadi patina berwarna hijau (green patina) akibat terjadinya reaksi dengan berbagai komponen/unsur yang ada di lingkungan atmosfer. Pemilik kapal harus lebih berhati-hati terhadap sejumlah masalah korosi yang akan terjadi dalam lingkungan air laut, meskipun komponen-komponennya terbuat dari bahan yang mempunyai sifat anti karat seperti penggunaan baja tahan karat.

Banyak masalah korosi terjadi pada kebanyakan industri, khususnya dalam industri minyak, industri petrokimia, dan sebagian besar dari kita masih belum memperhatikan dan menyadarinya.

Korosi merupakan proses yang sangat berbaya, tetapi korosi juga banyak diharapkan karena mendatangkan keuntungan. Contohnya patina yang berwarna hijau (pada tembaga) menjadikan warna tembaga enak untuk dilihat oleh mata. Dengan proses electrochemical machining dan proses elektrokimia suatu material yang sulit dikerjakan dengan mesin dapat dengan mudah dikerjakan sehingga proses pengerjaan menjadi ekonomis. Proses anodizing pada aluminium merupakan suatu proses korosi yang diharapkan atau yang menguntungkan, yaitu dengan proses korosi ini (anodizing) akan diperoleh warna atau penampakan yang lebih baik dan justru akan meningkatkan ketahanan terhadap korosi. Etsa pada proses pengujian metalografi juga merupakan contoh proses korosi yang diharapkan karena dengan proses ini diharapkan dapat dilihat dan dianalisa struktur mikro dari bahan. Demikian halnya pada baterai yang juga merupakan proses reaksi korosi yang menguntungkan.

### C. Biaya dan Pentingnya Korosi

Korosi menyebabkan kerugian yang sangat besar, sebagai contoh di Amerika Serikat pada tahun 1980 kerugian yang disebabkan oleh korosi sebesar 70 milyar dollar. Korosi juga sangat memboroskan sumber daya alam, hal ini bisa dilihat bahwa di Inggris pada tahun 1971 dapat diungkapkan bahwa 1 ton baja diubah menjadi karat dalam waktu 98 detik, sedangkan energi untuk memproduksi 1 ton baja dari bijih besi dapat digunakan untuk kebutuhan energi satu keluarga selama 3 bulan. Bagaimana kerugian korosi di Indonesia?. Kerugian korosi di Indonesia diperkirakan sebesar 1,5 milyar dollar AS (1997) atau kurang lebih 10,5 trilyun rupiah per tahun atau kurang lebih 5% dari APBN tahun 1999/2000.

Di samping itu korosi juga dapat menyebabkan bencana, contohnya ialah pada tahun 1985 di Swiss terjadi kecelakaan yang menyebabkan tewasnya 12 orang dan mencederai beberapa orang lainnya akibat atap stadion yang berumur

13 tahun roboh, dan diperkirakan penyebabnya adalah terjadinya korosi pada konstruksinya.

Pada prinsipnya kerugian akibat korosi dapat dibagi menjadi 2 (dua) yaitu kerugian langsung dan kerugian yang tidak langsung.

#### 1. Kerugian Langsung

Kerugian korosi yang menyebabkan terjadinya biaya langsung, dapat dicontohkan:

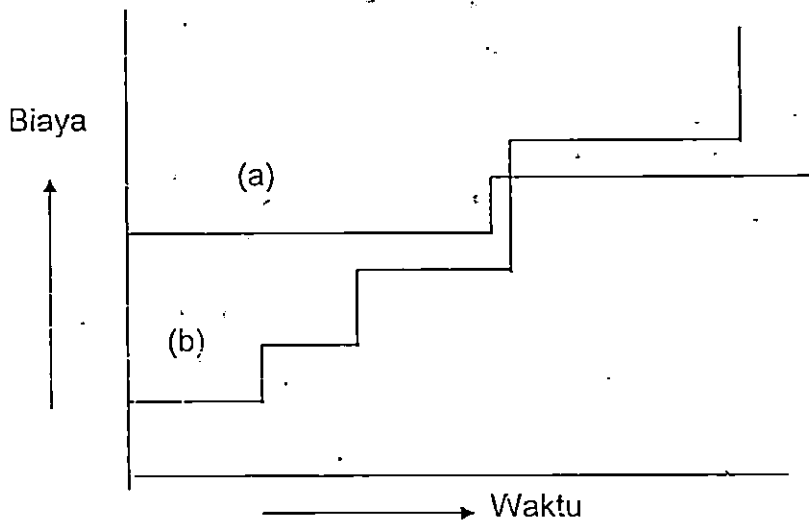
- a. Biaya tambahan untuk pengecatan anti korosi atau biaya yang diperlukan untuk perlindungan korosi lainnya (misalnya dengan proteksi katodik).
- b. Biaya perbaikan atau penggantian komponen atau peralatan yang mengalami korosi
- c. Over design (perencanaan yang berlebihan, misalnya penambahan ukuran ketebalan benda kerja, untuk penanggulangan korosi.
- d. Penggunaan bahan yang lebih mahal, misalnya dengan menggunakan baja tahan karat, yang harganya lebih mahal dibandingkan dengan baja karbon.

#### 2. Biaya tidak langsung

- a. Terjadinya kontaminasi terhadap produk, contoh makanan yang terkontaminasi oleh karat akibat kaleng pengemasannya mengalami korosi.
- b. Kehilangan produk karena terjadinya korosi pada kaleng kemasannya, sehingga tidak dapat dipasarkan/dijual.
- c. Rusak akibat kebocoran terhadap material tempat penyimpanannya, misalnya kebocoran pada kemasan oli, dan lainnya.
- d. Kehilangan produktifitasnya atau efisiensinya, karena kerusakan akibat korosi, misalnya terjadi penurunan produktivitas akibat kerusakan pada peralatan pemindah kalor. Dengan demikian diperlukan penggantian pada pipa-pipanya yang membutuhkan waktu yang cukup lama dan biaya yang besar. Untuk penggantian pipa maka produksi akan berhenti, sehingga kemungkinan kapasitas produksi tidak tercapai, yang pada akhirnya keuntungan menjadi menurun dan bisa berakibat hilangnya pasar.



- e. Berpengaruh terhadap keselamatan kerja, seperti kemungkinan terjadinya kebakaran, ledakan dan jenis kecelakaan lain akibat terjadinya korosi pada komponen.
- f. Penampakan atau penampilan warna produk menjadi kurang menarik. Bahan yang terkorosi kebanyakan akan berubah warnanya, menjadikan produk kurang menarik, sehingga kurang diminati.
- g. Tingginya biaya perawatan. Pemilihan bahan atau sistem proteksi dapat mengoptimalkan hambatan terhadap korosi, sehingga sangat mengurangi biaya perawatan, meskipun biaya awal lebih tinggi, tetapi biaya perawatan kecil. Dengan demikian secara keseluruhan biaya keseluruhan jauh lebih kecil, seperti ditunjukkan pada gambar dibawah ini.



Gb.1.1. Penghematan dari pemilihan bahan yang tepat.

#### Keterangan Gambar

(a) Biaya awal tinggi, biaya perawatan rendah

(b) Biaya awal rendah, biaya perawatan tinggi.

Dari gambar 1.1 di atas dapat dijelaskan bahwa jika kita memilih (a) maka dalam investasi kita memerlukan biaya awal yang tinggi, tetapi setelah beberapa waktu biaya perawatannya lebih kecil. Jika pilih (b) maka

biaya awal untuk investasi adalah rendah, tetapi dengan perjalanan waktu biaya perawatannya menjadi semakin besar.

Masalahnya sekarang adalah di dunia industri sendiri, masalah usia pakai dari produk yang dihasilkan, pada umumnya industri penghasil produk biasanya akan memilih bahan yang kurang baik dengan alasan-alasan:

- 1) Biaya produksi bisa ditekan
- 2) Produk bisa dijual murah
- 3) Umur pakai produk menjadi pendek, sehingga kebutuhan akan produk baru menjadi tetap tinggi yang pada akhirnya keuntungan menjadi semakin tinggi.

Kebanyakan pada negara berkembang telah mengestimasi kerugian akibat korosi sekitar 3 sampai 4% dari GNP nya (gross national product). Oleh karenanya diperlukan langkah-langkah nyata untuk penanggulangan korosi, seperti dengan menggunakan sistem proteksi korosi yang baik, meningkatkan perencanaan, dan penggunaan bahan-bahan yang lebih baik/tahan korosi.

Masalah korosi semakin hari semakin meningkat baik jumlah kerusakan yang diakibatkan maupun jenis atau bentuk korosinya. Di samping pengembangan berbagai bahan plastik dan keramik untuk menggantikan logam, tetapi penggunaan logam masih tetap tinggi untuk berbagai bidang. Lebih lanjut logam seperti besi cor yang telah sangat luas digunakan untuk daerah yang korosif apakah perlu digantikan dengan logam lain. Memang saat ini sudah banyak logam-logam yang sangat mahal telah banyak digunakan untuk aplikasi tertentu seperti pada pesawat ruang angkasa, dan keperluan peralatan untuk pembangkit energi tinggi (nuklir misalnya), tetapi bagaimanapun logam-logam tersebut juga dapat mengalami kerusakan. Dan juga perlu diingat makin berkembangnya industri, maka pencemaran udara semakin kompleks yang pada kenyataannya semakin sulit untuk menentukan jenis polutan yang ada, dan pada akhirnya sulit untuk melakukan pencegahan korosi atau memproteksinya.

D. Laju Korosi

Perbedaan suatu bahan dapat dibandingkan dari sifat ketahanan korosinya dan ketahanan korosi dari suatu bahan dapat diukur dengan berbagai cara seperti dengan kehilangan beratnya. Pengukuran laju korosi dengan kehilangan berat merupakan pengukuran laju korosi yang paling umum digunakan. Metoda pengukuran kehilangan berat dilakukan dengan cara : (a) spesimen dibersihkan, didegrease, kemudian ditimbang beratnya, (b) spesimen ditempatkan dalam lingkungan korosif dengan waktu yang ditetapkan, sehingga terjadi korosi pada bahan/spesimen, (c) spesimen dibersihkan dari karat, kemudian ditimbang kembali, (d). selisih berat awal dengan berat akhir adalah merupakan kehilangan berat.

Ada beberapa cara untuk menyatakan laju korosi, tetapi yang paling banyak digunakan adalah dengan satuan *miligram per desimeter persegi per hari (mg/dm<sup>2</sup>/hari atau biasa disingkat dengan mdd)*, di mana dalam satuan ini sudah termasuk lamanya bahan dilingkungan korosif dan luas permukaan dari bahan yang berhubungan langsung dengan lingkungan korosif. Oleh karenanya laju korosi secara langsung dapat dinyatakan dengan penetrasi yang dinyatakan dalam milimeter per tahun. Cara atau satuan ini banyak digunakan dalam bidang rekayasa karena dapat langsung digunakan untuk memprediksi umur dari suatu komponen.

Satau metrik untuk penetrasi biasanya dalam besaran mikron atau  $\mu\text{m}$  per tahun, meskipun dapat juga dengan satuan milimeter per tahun untuk laju korosi yang cepat. Satuan "mils" (seperseribu inchi) per tahun atau yang dikenal dengan "mpy" juga banyak digunakan terutama di Amerika Serikat dan negara yang menggunakan sistem satuan inchi.

Perhitungan laju korosi dengan metoda kehilangan berat, dihitung dengan menggunakan rumus:

$$\frac{\mu\text{m}}{\text{tahun}} = 87600 \frac{W}{\text{DAT}} \quad \text{atau} \quad \frac{\text{mm}}{\text{tahun}} = 87,6 \frac{W}{\text{DAT}}$$

di mana:

W = kehilangan berat dalam miligram

- D = densitas dalam gram/cm<sup>3</sup>  
 A = luas dalam cm<sup>2</sup>.  
 T = waktu (lamanya benda kerja ditempatkan dalam lingkungan korosif) dalam jam.

Laju korosi pada dasarnya tidak konstan dan biasanya akan menurun dengan waktu, meskipun jarang mencapai laju yang tetap. Oleh karenanya jika kita mem-perhatikan laju korosi, kita harus mengetahui laju korosi pada tahun-tahun awal, seperti laju korosi pada tahun pertama. Di bawah ini diberikan laju korosi (tahun pertama dan kondisi tetap) untuk baja dan seng pada beberapa lingkungan korosif.

Tabel 1: Perbandingan laju korosi untuk baja dan seng ( $\mu\text{m}/\text{tahun}$ ) dalam berbagai jenis lingkungan

No	Sifat Korosi	Baja Karbon		Seng		Jenis Lingkungan
		Tahun Pertama	Keadaan Tetap	Tahun Pertama	Keadaan Tetap	
1	Sangat lambat	< 1,3	< 0,1	< 0,1	< 0,05	Daerah terbuka dan kering
2	Lambat	1,3-25	0,1-1,5	0,1-0,7	0,05-0,5	Daerah berpasir sampai daerah pemukiman
3	Menengah	25-50	1,5-6	0,7-2,1	0,5-2	Dekat laut atau dekat industri
4	Cepat	50-80	6-20	2,1-4,2	2-4	Laut (tenang)
5	Sangat Cepat	80-200	20-90	4,2-8,4	4-10	Laut (bergelombang)

#### E. Kesimpulan

Dari uraian yang dijelaskan dimuka dapat disimpulkan bahwa meskipun telah diuraikan secara jelas bahwa korosi menimbulkan kerugian yang sangat besar, namun perhatian orang terhadap korosi masih rendah dan upaya-upaya untuk mencegah terjadinya korosi masih belum dilakukan secara optimal. Hal ini disebabkan untuk penanggulangan korosi diperlukan biaya awal yang cukup

besar, sehingga berpengaruh terhadap biaya investasi. Di samping itu untuk menumbuhkan kesadaran tentang bahaya korosi, dan besarnya kerugian yang diderita akibat terjadinya korosi. Diharapkan dengan adanya penjelasan dan pelatihan dan pembuktian setelah terjadinya suatu kecelakaan masyarakat terutama pada perekayasa menyadari pentingnya melakukan perancangan yang progresif dengan memasukkan unsur penanggulangan korosi.

## BAB II

### PROSES KOROSI

#### A. Pendahuluan

Dalam bab ini akan dibahas masalah yang berkaitan dengan proses terjadinya korosi, yaitu:

1. Pentingnya bentuk dari sel korosi
2. Penjelasan dan gambaran tentang seri Galvanik
3. Pentingnya katoda dalam reaksi korosi
4. Bagaimana sepotong pelat baja terkorosi.

Tujuan umum yang ingin dicapai dalam pembahasan pada bab ini adalah:

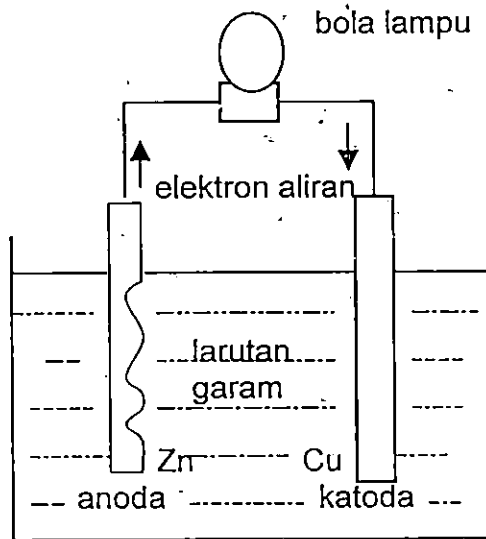
Mahasiswa diharapkan :

1. Membuat sel korosi, sehingga dapat menjelaskan bagaimana proses korosi bisa berlangsung, serta dapat menjelaskan fungsi masing-masing komponen dalam sel korosi untuk dapat terjadinya korosi.
2. Menjelaskan apa yang dimaksud dengan seri galvanik, bagaimana mengukur potensial suatu elektroda, serta dapat menyebutkan seri galvanik untuk beberapa logam penting untuk konstruksi.
3. Menjelaskan pentingnya fungsi katoda dalam proses korosi.
4. Menjelaskan mekanisme terjadinya korosi pada sepotong baja.

#### B. Sel Korosi

Sebagaimana telah dijelaskan di muka bahwa korosi adalah reaksi antara logam dengan lingkungannya. Kejadian tersebut disebut dengan proses elektrokimia atau elektrolitik. dan timbul akibat pembentukan sel seperti terjadi pada baterai.

Reaksi korosi sederhana dapat dijelaskan dengan memperhatikan operasi dari sebuah baterai sebagaimana digambarkan di bawah ini.



Gb.2.1 Korosi seng dalam sel voltaik sederhana

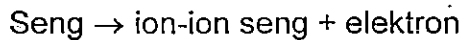
Dari gambar di atas ditunjukkan suatu baterai yang terdiri dari plat seng dan plat tembaga yang dicelupkan dalam larutan air garam. Jika pelat tidak dihubungkan satu dengan yang lainnya tidak akan terjadi reaksi. Segera setelah keduanya dihubungkan akan terjadi aliran arus listrik melalui rangkaianannya.

Pada saat yang sama oksigen yang terlarutkan dalam larutan dikonsumsi oleh pelat tembaga, sementara pelat seng yang dilarutkan membentuk muatan ion positif. Dengan terlarutnya pelat seng dalam larutan, maka elektron akan dibebaskan. Aliran arus listrik yang mengalir melalui rangkaian akan menyalakan lampu. Jika alat pengukur tegangan dipasang pada tempat lampu, maka dapat dilihat adanya perbedaan potensial antara seng dan tembaga. Dengan demikian terjadi sel korosi jenis reaksi yang terjadi dalam sel ini adalah sama dengan yang terjadi dalam setiap sel korosi.

#### 1. Anoda

Anoda biasanya terkorosi dengan melepaskan elektron-elektron dari atom-atom logam netral untuk membentuk ion-ionnya. Dalam contoh sel di atas seng plat adalah sebagai anoda. Jadi secara sederhana anoda adalah logam yang

terkorosi, di mana pada saat yang sama elektron diproduksi. Reaksi yang terjadi adalah:



Atau dengan simbol-simbol kimia :



Dari reaksi ini banyak elektron yang diambil masing-masing atau ditentukan oleh valensinya, yaitu 2 karena valensi seng adalah 2.

## 2. Katoda

Telah disebutkan bahwa katoda biasanya tidak terkorosi, maka dalam gambar di atas katodanya adalah pelat tembaga. Reaksi dengan oksigen didalam larutan dan molekul air membentuk partikel bermuatan negatif yang dikenal dengan nama ion hidroksil. Reaksinya dapat dituliskan sebagai berikut:



atau



Reaksi yang lain adalah pada pH yang lebih kecil dari 7, yaitu



## 3. Elektrolit

Istilah elektrolit diberikan kepada larutan harus bersifat menghantarkan listrik. Larutan yang digunakan dalam percobaan ini adalah larutan garam, di mana dalam larutan ini mengandung ion-ion bermuatan positif dan negatif. Anoda menghasilkan ion-ion bermuatan positif, yang mengalir kedalam elektrolit. Pada katoda ion-ion bermuatan positif atau spesi netral mengambil elektron yang mengalir dalam rangkaian listrik. Dalam contoh sel di atas oksigen dan air mengambil elektron-elektron untuk menghasilkan ion hidroksil.

## 5. Kawat/kabel penghubung/Hubungan listrik.

Antara anoda dan katoda harus terdapat hubungan kelistrikan agar arus dalam sel korosi dapat mengalir. Elektron-elektron memerlukan sarana untuk ber-gerak dari anoda ke katoda. Dalam contoh kita di atas sarana tersebut adalah kawat atau kabel. Jadi jika dalam suatu sel ada katoda, anoda, kawat



penghubung, dan elektrolit, maka korosi akan terjadi/timbul. Perhatikan sebatang tembaga dihubungkan ke sebatang besi dalam larutan air. Disini besi bertindak sebagai anoda dan terkorosi, tembaga sebagai katoda dan air bertindak sebagai elektrolit. Reaksi anodik pada kasus ini adalah:



sementara itu reaksi katodik adalah:



Pada kasus ini ion-ion hidroksil bereaksi dengan ion-ion ferro, dan oksigen membentuk ferrous hidroksida



Hidroksida besi ini berwarna putih, endapan yang menyerupai warna susu yang secara cepat teroksidasi dalam udara membentuk ferri hidroksida  $[\text{Fe}(\text{OH})_3]$ . Ferri hidroksida ini tidak stabil dan akan bereaksi lebih lanjut dengan oksigen dan air membentuk bermacam-macam oksida dan hidroksida besi, yang secara kolektif disebut dengan karat. Karat sendiri tidak mempunyai rumus kimia tunggal, tetapi ia adalah suatu komposisi yang sangat tergantung pada kondisi dari pembentukannya. Meskipun demikian komponen utama karat adalah hidrat oksida besi ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ). Magnetite ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) adalah contoh unsur lain, yang ditemukan jika suatu baja mengalami korosi secara cepat seperti yang terjadi dalam air laut (lingkungan agresif).

Kasus yang hampir sama adalah jika besi dilarutkan dalam asam hidroklor ( $\text{HCl}$ ). Pada kasus ini reaksi anodiknya sama seperti reaksi di muka, yaitu:



tetapi reaksi katodiknya akan berbeda. Dalam larutan asam, banyak sekali ion-ion hidrogen didalam larutan, dan reaksi katodik adalah berupa kombinasi bersama dengan elektron-elektron membentuk gas hidrogen, menurut reaksi:



Kedua reaksi katodik yang ditunjukkan di atas sejauh ini adalah reaksi katodik umum, meskipun reaksi katodik lain juga dimungkinkan. Dalam reaksi korosi reaksi anodik selalu merupakan pelarutan logam menjadi ion-ion logam.

Kapan saja dua logam yang tidak sama dihubungkan dan keduanya berada dalam elektrolit (bisa berupa humiditas dari atmosfer), anoda akan terkorosi dan katoda tidak akan mengalami korosi. Adalah perlu mengetahui bagaimana menentukan logam mana yang mempunyai kecenderungan terkorosi. Keadaan ini dapat diukur dengan menentukan besar potensial yang ditimbulkan oleh lingkungan yang diberikan dan dengan elektroda reference. Logam-logam yang berbeda akan memberikan potensial berbeda tergantung pada kecenderungannya untuk terlarut.

### C. Galvanic Series

Galvanic series diperoleh dengan menghimpun potensial-potensial dari berbagai jenis logam dengan cara mengukurnya dengan elektroda reference (pembanding). Galvanic series untuk berbagai jenis logam diberikan pada tabel 1 di bawah ini.

Tabel 1. Galvanic series untuk berbagai jenis logam dalam lingkungan air laut.

No	Logam
	<b>Katodik atau noble</b>
1	Platina
2	emas
3	karbon (grafit)
4	titanium
5	baja tahan karat type 316 (pasif)
6	baja tahan karat type 18/8 (pasif)
7	logam monel (70% Ni, 30% Cu)
8	perak
9	nikel
10	tinah hitam
11	bronze
12	tembaga
13	kuningan
14	timah putih
15	timah hitam/timah patri
16	baja tahan karat type 316 (aktif)
17	baja tahan karat type 304 (aktif)
18	besi tuang
19	mild steel
20	kadmium
21	paduan aluminium

22	aluminium murni
23	seng
24	magnesium
	<b>Anodik atau aktif</b>

Jika dua logam dari tabel di atas digabungkan, hal ini akan selalu terjadi bahwa satu logam mempunyai potensial yang lebih rendah (lebih aktif) yang akan bertindak sebagai anoda dan akan terlarut, dan satunya lagi mempunyai potensial lebih tinggi (lebih nobel) dan menjadi katodik dan tetap (tidak terlarut).

Dari tabel di atas, dapat dilihat bahwa tembaga dan seng, dan tembaga dengan besi adalah berjarauhan, maka reaksi korosi akan terjadi secara cepat. Jika tembaga dihubungkan dengan perak, maka dapat diprediksikan bahwa tembaga yang akan terkorosi. Contoh lain dari korosi galvanik yaitu korosi akan terjadi jika dua logam yang berbeda dihubungkan/digabungkan bersama, seperti mild steel yang digabungkan secara kelistrikan dengan baja tahan karat, disini mild steel akan bertindak sebagai anoda dan terkorosi sementara itu baja tahan karat sebagai katoda maka akan terproteksi.

Dalam beberapa lingkungan, beberapa logam akan tertutup oleh lapisan karat (seperti oksida), yang akan memproteksi logam dari korosi lebih lanjut. Logam yang dapat membentuk lapisan oksida dalam lingkungan tertentu tersebut disebut logam mempunyai sifat pasif atau dapat dipasivasi. Tetapi jika logam tersebut ditempatkan pada lingkungan korosif yang berbeda, mungkin potensialnya juga akan berbeda sehingga tidak dapat mengalami pasivasi. Hal ini dapat dilihat dalam tabel di mana paduan dari baja tahan karat yang sama posisinya berbeda dalam tabel.

Sebenarnya tidak hanya logam-logam yang berbeda yang dapat menyebabkan korosi galvanic. Masalah yang hampir sama terjadi pada baja yang ditutupi oleh mill-scale (kerak). Kerak yang menutupi baja merupakan campuran dari berbagai oksida dari besi yang terbentuk pada waktu pengerjaan panas baja. Oleh karenanya korosi akan dikonsentrasikan pada pecahan pada kerak yang mana akan bertindak sebagai anoda dan adanya daerah katodik sangat besar untuk terjadinya reduksi oksigen. Hal ini merupakan alasan mengapa dalam persiapan permukaan untuk baja perlu dilakukan pembersihan kerak.

#### D. Pentingnya Katoda

Sejauh ini kita kurang memperhatikan reaksi yang terjadi di katoda. Apa permasalahannya? Setiap elektron yang dihasilkan pada anoda yang terkorosi harus diambil oleh katoda, dimana reaksi pengambilan elektron oleh katoda adalah sangat penting, dan sangat berpengaruh terhadap laju korosi. Dalam baterai (tembaga-seng), oksigen dalam air mengambil elektron yang diproduksi oleh reaksi anodik membentuk ion hidroksil bermuatan negatif. Dalam korosi atmosferik oksigen dalam udara dan uap air dalam udara yang lembab bereaksi dengan cara yang sama. Pada kondisi asam ion-ion hidrogen ( $H^+$ ) dalam asam bereaksi dengan elektron membentuk gas hidrogen.

Pada semua kasus gas adalah terlibat dalam reaksi korosi, sehingga katoda adalah menjadi sangat penting. Jika katodanya luas, maka reaksi katodik akan mudah berlangsung, baik dalam hal memproduksi hidrogen atau mengkonversi oksigen menjadi ion-ion hidroksil dan elektron-elektron akan digunakan secepat yang diproduksi oleh anoda. Oleh karenanya diusahakan katoda sebaiknya mempunyai luas yang kecil, sehingga akan memperkecil reaksi di anoda. Dengan demikian proses di katoda mempunyai pengaruh yang sangat besar dari setiap masalah korosi.

Untuk memperjelas keterangan di atas diambil contoh:

Kasus 1:

Paku keling dari bahan tembaga digunakan untuk menyambungkan dua potong plat baja yang berukuran besar.

Kasus 2:

Paku keling dari bahan baja untuk menyambungkan dua plat tembaga yang besar (luas).

Pertanyaannya:

Dari kedua kasus di atas mana yang lebih berbahaya ditinjau dari sudut korosi?

Jawabannya :

Pada kasus 1:

Cara penyambungan yang dilakukan adalah yang paling benar, meski-pun dari tabel 1 di muka, baja adalah lebih anodik terhadap tembaga, tetapi dengan luas katodik yang kecil (paku keling tembaga) maka gas yang akan mencapai katoda kecil dan sangat lambat sehingga laju korosinya dapat diabaikan.

Pada kasus 2:

Cara penyambungan dengan menggunakan paku keling baja adalah tidak benar, karena luas katoda yang sangat besar (tembaga lebih katodik dibandingkan dengan baja), sehingga reaksi katodik dapat berlangsung secara cepat, sehingga baja akan terkorosi secara cepat, dan pada akhirnya paku keling baja hanya bertahan untuk beberapa waktu saja.

Contoh lain yang sama masalahnya ialah:

Jika kita ingin menyambung pipa baja dengan pipa tembaga, maka pipa yang mana yang harus dicat, pipa tembaga atau pipa baja?

Penyelesaiannya adalah:

Anda harus mengecat pipa tembaga, sehingga luas katoda menjadi lebih sempit (kecil), yaitu daerah-daerah yang tidak tertutup oleh cat. Dengan demikian anoda menjadi lebih luas, sehingga laju korosi dapat diminimumkan. Jadi dari contoh kasus di atas, maka jika kita akan menggabungkan/menyambungkan dua logam yang tidak sama, maka harus dipilih anoda harus mempunyai daerah yang besar dan katoda luasnya harus kecil.

#### E. Korosi pada Baja

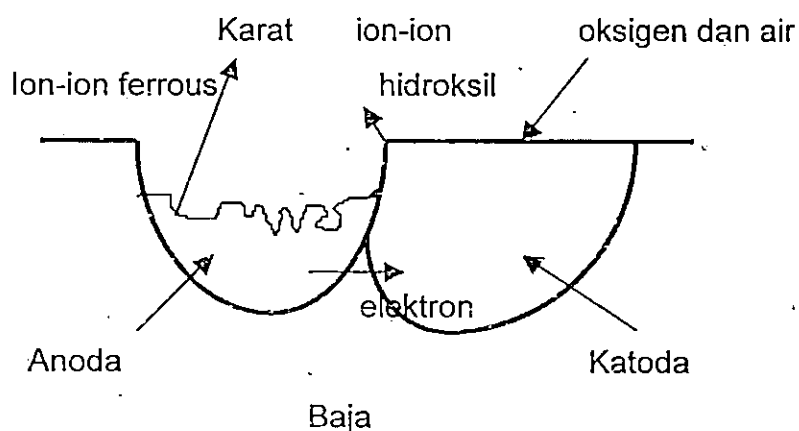
Sejauh yang kita bicarakan baru mengenai korosi galvanik, di mana korosi ini terjadi jika dua logam yang berbeda digabungkan. Bentuk korosi galvanik juga dapat terjadi pada satu jenis logam, dengan prinsip kejadian yang sama, yaitu melibatkan anoda, katoda, elektrolit, dan konduktor, serta perbandingan antara anoda dan katoda adalah sangat penting.

Contoh yang kita bicarakan diatas adalah mengapa sepotong baja terkorosi?. Di mana anoda dan katodanya?. Jawabnya adalah bahwa pada sepotong baja

MILIK PERPUSTAKAAN  
UNIVERSITAS NEGERI PADANG

ada beberapa cara terbentuknya anoda dan katoda. Sebagai hasilnya pada baja terbentuk daerah anodik dan terkorosi, serta daerah katodik yang tidak terkorosi.

Perhatikan gambar 2.2 yang menunjukkan sel korosi pada sebuah baja. Elektrolit harus menutup daerah anodik dan katodik sebagai korosi galvanik, tetapi dalam kasus ini konduktor elektronik timbul secara sederhana karena pada logam baja adalah bersifat konduktor sehingga elektron dapat secara mudah mengalir dari anoda ke katoda. Daerah anodik dan katodik tidak terletak sebelah menyebelah, tetapi berjarak satu sama lainnya, sepanjang ada elektrolit dan jaringan penghubungnya.



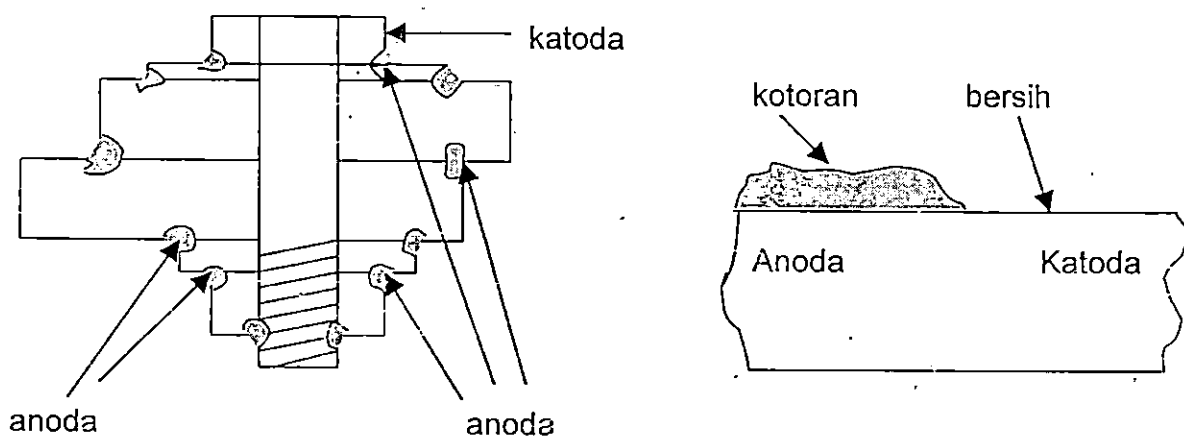
Gb.2.2 Pembentukan anoda dan katoda pada sepotong baja

Terbentuknya sel korosi pada sepotong baja, karena baja merupakan bahan yang tidak uniform atau homogen. Hal ini bisa dibuktikan dengan bantuan mikroskop, di mana terlihat bahwa baja terdiri dari kristal-kristal yang berbeda komposisinya. Kristal-kristal tersebut mungkin anoda atau katoda, dan sel-sel korosi yang sangat kecil dapat terbentuk pada permukaan baja. Di samping itu bahan-bahan pengotor dalam baja seperti sulfida dan partikel silikat yang terbentuk dan tumbuh pada proses pembuatan baja merupakan daerah katoda.

Terbentuknya katoda dan anoda pada baja dapat terjadi pada proses pengelasan, pemotongan, pengeboran, pengerindaan atau pembengkokan. Hal ini dikarenakan pada daerah kerja cenderung menjadi anodik terhadap daerah

yang tidak dikerjakan (dikenai beban). Jika benda kerja tersebut ditempatkan pada elektrolit maka sel korosi akan timbul dan baja akan terkorosi.

Sel korosi pada logam-logam yang homogen seperti pada baja dikarenakan adanya perbedaan konsentrasi oksigen. Daerah dengan konsentrasi oksigen yang rendah akan menjadi anodik terhadap daerah dengan konsentrasi oksigen yang lebih tinggi. Sel korosi yang terbentuk dikenal sebagai "*differential aeration cell*". Contoh korosi yang terbentuk melalui cara di atas, dapat ditemui pada baut atau paku keling (lihat gambar 2.3), di mana pada daerah yang diekspose (terbuka) menjadi katodik dan daerah yang tersembunyi sebagai daerah anodik.



Gb.2.3. Korosi yang terjadi pada daerah yang berakses dengan udara bebas

Contoh lain ialah pada pipa yang dibenamkan dalam tanah, pada bagian bawah pipa yang menempel di tanah mempunyai konsentrasi oksigen yang rendah dan lebih cepat terkorosi, sementara pada bagian atasnya tetap bersifat katodik dan bebas dari korosi untuk sementara, sebelum korosi menjalar. Demikian halnya jika pipa dibenam dalam daerah tanah liat padat, maka pipa akan cepat terkorosi dibandingkan dengan daerah yang berpasir.

Dalam korosi atmosferik dan lingkungan yang merata, daerah anodik dan katodik pada baja biasanya tidak konstan, tetapi selalu berubah setiap saat. Karat (produk korosi) yang terbentuk pada daerah katodik mencegah oksigen mencapai daerah tersebut, sehingga daerah tersebut berubah menjadi daerah

anodik. Dengan demikian sekarang daerah anoda mempunyai akses dengan oksigen, sehingga daerah anodik tersebut berubah menjadi daerah katodik. Hasilnya korosi dipermukaan adalah merata atau uniform dan pengkaratan berlanjut tidak bisa dicegah. Produk korosi dipermukaan kemudian akan terbuang sehingga meninggalkan pori-pori dipermukaan dan produk korosi baru segera akan terbentuk secara kontinyu di atas muka logam dan produk korosi. Korosi ini dikenal dengan korosi uniform atau merata dan sejauh ini merupakan bentuk korosi yang umum dijumpai. Meskipun demikian dalam beberapa situasi perubahan dari anodik ke katodik tidak dapat terjadi, sehingga akan terjadi korosi setempat atau yang disebut dengan korosi sumuran (pitting corrosion) atau korosi celah (crevice corrosion). Jenis korosi sumuran dan korosi celah adalah lebih berbahaya, sehingga menjadikan perhatian yang besar bagi para perancang. Pembahasan lebih mendalam tentang korosi sumuran dan korosi celah akan diberikan pada bab bentuk-bentuk korosi pada logam.



## BAB III DASAR-DASAR KOROSI

### A. Pendahuluan

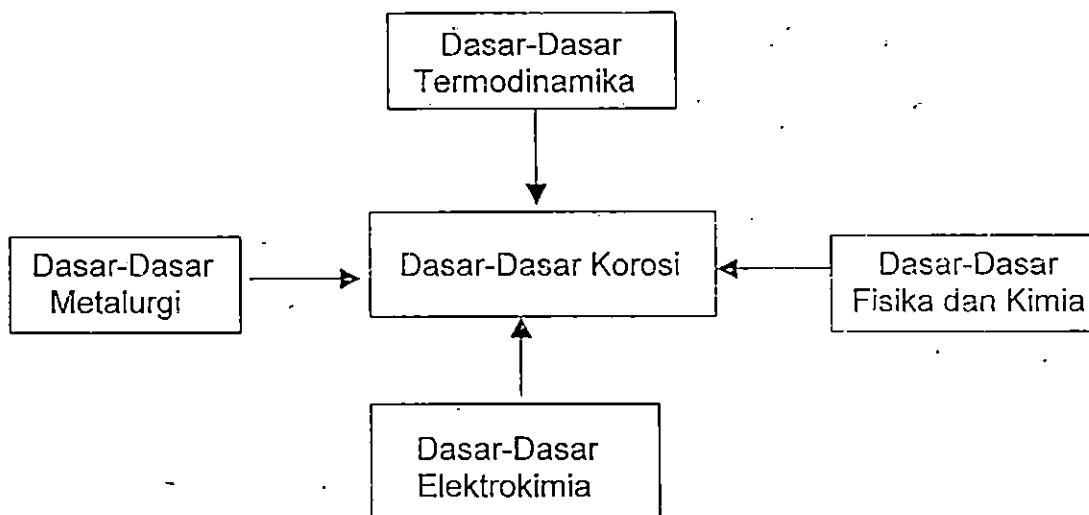
Dalam bab ini akan dibahas dasar-dasar dan terjadinya korosi, ditinjau dari dasar reaksi elektrokimia dari korosi dan jenis-jenis sel elektrokimia dari sel korosi, serta prinsip termodinamika dari korosi.

Tujuan umum yang ingin dicapai dalam pembahasan pada bab ini adalah mahasiswa diharapkan :

1. Menjelaskan prinsip umum terjadinya korosi.
2. Menjelaskan prinsip korosi ditinjau dari sel elektrokimia, dan dari prinsip termodinamika.
3. Menghitung potensial standar untuk reaksi dari suatu logam
4. Menjelaskan pentingnya fungsi katoda dalam proses korosi.
5. Menjelaskan mekanisme terjadinya korosi pada sepotong baja.

### B. Dasar Korosi

Ketahanan korosi dari suatu bahan tergantung pada beberapa faktor. Untuk memahami dasar-dasar korosi harus memahami atau mengetahui beberapa disiplin ilmu pengetahuan seperti ditunjukkan pada gambar di bawah ini.



Gb.3.1. Ketergantungan korosi

Dengan dasar termodinamika korosi dapat diindikasikan pada arah dari reaksi kimia yang terjadi secara spontan. Prinsip ini dapat digunakan untuk menentukan secara teoritis apakah suatu bahan terkorosi atau tidak. Prinsip elektrokimia termasuk kinetika dari elektroda dapat memberikan informasi yang berharga pada laju korosi dari reaksi korosi yang berbeda. Dasar-dasar metalurgi yang meliputi sifat fisik dan kimia juga akan membantu untuk memahami perilaku korosi pada suatu logam. Dalam banyak kasus struktur metalurgi (struktur mikro) pada logam paduan dapat diubah untuk memungkinkan ketahanan korosi logam tersebut meningkat.

### C. Prinsip Dasar Elektrokimia dari Korosi

Korosi pada suatu logam dapat berlangsung baik melalui reaksi kimia dan elektrokimia atau dengan cara keduanya. Dalam korosi basah (aqueous) di mana biasanya terjadi dalam media elektrolit, mekanisme elektrokimia berlaku, sehingga mekanisme secara kimia di sini dapat diabaikan.

Perbedaan dasar atau utama antara mekanisme kimia dan elektrokimia adalah pada reaksi kimia seluruh logam bereaksi dengan lingkungannya, yaitu tidak ada perpindahan muatan. Sedangkan pada proses elektrokimia berlangsung melalui dua proses, yaitu reaksi anodik dan katodik. Anoda dan katoda bisa dari logam yang berbeda seperti pada korosi galvanik. Sifat elektrokimia dapat digambarkan oleh serangan korosi terhadap besi oleh asam HCl, yaitu reaksi yang berlangsung adalah:



Ion klorida tidak dilibatkan pada reaksi ini, persamaan reaksi diatas dapat dituliskan dengan bentuk sederhana sebagai berikut:



Besi bereaksi dengan ion hidrogen dari larutan asam HCl membentuk ion besi dan gas hidrogen. Dengan demikian reaksi di atas dapat dibagi menjadi dua bagian reaksi, yaitu;

1. Reaksi oksidasi (reaksi anodik):  $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$
2. Reaksi reduksi (reaksi katodik):  $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$

Kedua reaksi di atas berlangsung secara bersamaan dengan laju reaksi yang sama pada permukaan logam.

Dapat disimpulkan bahwa selama korosi logam, laju oksidasi adalah sama dengan laju reduksi (produksi elektron sama dengan elektron yang dikonsumsi). Korosi terjadi melalui pembentukan sel elektrokimia dalam mana anoda terkorosi dan katoda diproteksi.

## 1. Hukum Faraday.

### a. Hukum Faraday Pertama

Jika arus melalui suatu larutan, maka sejumlah bahan akan masuk kedalam larutan yang besarnya proporsional dengan jumlah muatan yang melewatinya, atau bisa dituliskan sebagai:

$$W \propto I \times t \quad (3.3)$$

$$W = W_e \times I \times t$$

Di mana:

$W$  adalah berat unsur atau substance yang dibentuk atau dilarutkan pada elektroda dengan arus yang mengalir sebesar  $I$  ampere untuk waktu sebesar  $t$ ,  $W_e$  adalah berat equivalen elektrokimia.

$W_e$  adalah unsur yang didefinisikan sebagai massa yang dibebaskan atau dilarutkan oleh arus sebesar 1 amper dalam waktu 1 detik, yaitu sebesar 1 coulomb. Jika arusnya tidak kosntan, maka besarnya  $W$  dapat dicari cengan persamaan berikut:

$$W = W_e \int_{t_1}^{t_2} I dt \quad (3.4)$$

Tabel -1. Electrochemical equivalent untuk beberapa unsur

No	Unsur/ Substance	Electrochemical Equivalent, mg/coulomb	Valensi	Reaksi Elektrokimia, Kalori
1	Aluminium	0,09319	3	$Al^{3+} + 3e = Al$
2	Krom	0,08983	6	$Cr^{6+} + 6e = Cr$
3	Krom	0,17965	3	$Cr^{3+} + 3e = Cr$
4	Tembaga	0,32922	2	$Cr^{2+} + 2e = Cu$
5	Emas	2,04145	1	$Au^{+} + e = Au$
6	Hidrogen	0,01045	1	$2H^{+} + 2e = H_2$
7	Besi	0,28938	2	$Fe^{2+} + 2e = Fe$
8	Magnesium	0,12601	2	$Mg^{2+} + 2e = Mg$
9	Nikel	0,30420	2	$Ni^{2+} + 2e = Ni$
10	Perak	1,11793	1	$Ag^{+} + e = Ag$
11	Seng	0,33876	2	$Zn^{2+} + 2e = Zn$

## b. Hukum Kedua Faraday

Berat dari berbagai jenis unsur/substance yang diendapkan atau dilarutkan oleh suatu arus listrik adalah proporsional dengan berat equivalennya, atau dapat dituliskan sebagai:

$$W \propto E \quad (3.5)$$

$W$  = berat unsur yang diendapkan atau dilarutkan

$E$  = berat equivalen, dimana

$$= \frac{\text{Berat atom unsur}}{\text{Valensi elektrokimia}} = \frac{A}{ne}$$

$$\text{Jadi } E = \frac{A}{ne} \quad (3.6)$$

Jadi untuk  $H^+$ ,  $Ag^+$ ,  $\frac{1}{2} Cu^{2+}$ ,  $\frac{1}{2} Fe^{2+}$ ,  $\frac{1}{3} Fe^{3+}$ ,  $\frac{1}{2} (SO_4)^{-2}$  dan  $\frac{1}{4} Fe(CN_6)^{-2}$  mempunyai berat equivalen yang sama.

Dari hukum kedua Faraday dinyatakan bahwa arus listrik yang dibutuhkan untuk melarutkan atau mengendapkan unsur adalah sama

dengan jumlah 1 gram equivalent dari unsurnya. Jumlah tersebut disebut dengan bilangan Faraday (F) dengan harga sebesar 96483,7 atau dibulatkan 96500 coulomb/gram equivalent.

Kombinasi dari kedua hukum Faraday (hukum pertama dan kedua):

Dari hukum pertama:

$$1 \text{ Faraday} = 1 \text{ gram equivalent}$$

atau

$$1 \text{ Faraday} = \frac{A}{ne} \text{ gram unsur}$$

Oleh karenanya:

$$1 \text{ coulomb} = \frac{A}{ne F} \text{ gram unsur}$$

Telah dinyatakan sebelumnya bahwa :

$W_e$  = unsur yang diendapkan oleh 1 coulomb,

Maka:

$$W_e = \frac{A}{Ne F} \quad (3.7)$$

Substitusi kedalam persamaan (1), diperoleh:

$$W = W_e \times I \times t, \text{ maka } W = \frac{A \times I \times t}{Ne \times F} \quad (3.8)$$

Contoh:

Suatu sel Daniel mengeluarkan arus 0,10 amper. Diameter anoda 1 cm dan anoda tersebut dicelupkan kedalam larutan sedalam 15 cm, densitas seng 7 gram/cm<sup>3</sup>.  $W_e = 0,3387$  mg/coulomb. Hitung laju korosi seng dalam inchi/hari dan mills per tahun.

Jawab:

Jumlah kehilangan berat akibat korosi per detik pada elektroda yang luasnya 1 cm<sup>2</sup> adalah  $W/t$ .

Dari hukum Faraday 1

$$W = W_e \times I \times t$$

Oleh karenanya

$$\frac{W}{t} = \frac{W_e \times I \times t}{t} = W_e \times I$$

$$= \frac{0,3387}{1000} \times 1 \text{ gram/detik}$$

$$= \frac{0,3387}{1000} \times \frac{1}{7} \text{ cc/detik}$$

Jika volume = massa/densitas, maka

$$\frac{W}{t} = 4,84 \times 10^{-6} \text{ cc/detik}$$

Daerah yang terbenam adalah :

$$\frac{\pi d^2}{4} + \pi d l$$

$$\frac{3,14 \times 1^2}{4} + 3,14 \times 1 \times 15$$

$$= 47,9 \text{ cm}^2$$

Laju Korosi Seng

$$= \frac{W}{t \times A} \text{ cm/detik}$$

$$= \frac{4,84 \times 10^{-6}}{1 \times 47,9}$$

$$= 1,1 \times 10^{-7} \text{ cm/detik}$$

atau

$$= 3,4 \times 10^{-3} \text{ inch/hari}$$

atau

$$= 1,24 \times 10^3 \text{ mills/per tahun (mpy)}$$

## 2. Jenis-Jenis Sel Elektrokimia

Ada 3 (tiga) jenis sel utama elektrokimia pada reaksi korosi, yaitu:

### a. Sel Galvanik

Sel galvanik dibentuk dari 2 jenis logam yang tidak sama (berbeda) atau dari dua jenis logam yang sama, tetapi "sectionnya" tidak sama. Contoh dari sel galvanik tersebut adalah:

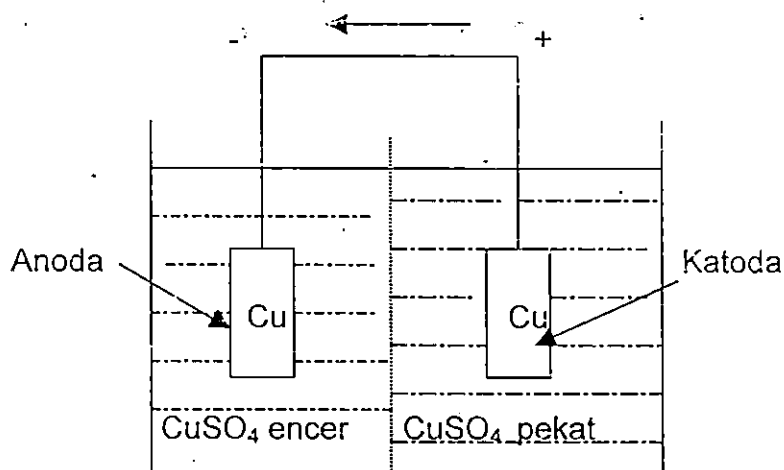
- 1) Dua logam yang tidak sama dihubungkan antara keduanya, misalnya suatu pipa besi disambungkan dengan pipa dari tembaga digunakan untuk mengalirkan air.
- 2) Perlakuan panas yang berbeda. Perilaku logam tergantung pada jenis perlakuan panas yang diberikan misalnya baja yang ditemper adalah anodik terhadap baja yang dianil.
- 3) Goresan atau abrasi. Jika sepotong logam digores atau diabrasi, maka bekas goresan atau daerah yang kasar akan anodik terhadap daerah yang tidak tergores atau tidak terabrasi.
- 4) Perbedaan tegangan. Daerah yang mengalami regangan biasanya anodik terhadap daerah yang mengalami regangan.
- 5) Perbedaan butiran dan komposisi matriknya. Banyak logam paduan terdiri dari fasa yang heterogen, di mana mungkin mempunyai potensial yang berbeda.
- 6) Batas butir. Pada semua logam terdapat butiran dan diantara butiran tersebut dipisahkan oleh batas butir. Biasanya batas butir adalah lebih anodik dibandingkan butirannya.
- 7) Perbedaan ukuran butiran. Butiran yang halus anodik terhadap butiran yang kasar.
- 8) Kondisi permukaan. Perbedaan kondisi permukaan mungkin dapat

menghasilkan perbedaan potensial

#### b. Sel Konsentrasi

Dalam beberapa kasus permukaan logam adalah uniform, sehingga tidak ada daerah anodik dan katodik. Meskipun perbedaan hubungan antara elektrolit dengan logam dapat menyebabkan terjadinya korosi. Faktor-faktor yang berkontribusi pada perbedaan tersebut adalah:

- 1) Perbedaan komposisi dari elektrolit. Pipa yang ditanam dalam tanah liat lebih anodik dibandingkan pipa yang ditanam dalam loam soil.
- 2) Perbedaan temperatur. Dua daerah yang mempunyai temperatur yang berbeda mungkin mempunyai perbedaan potensial.
- 3) Perbedaan pergerakan elektrolit. Daerah dengan kecepatan aliran yang lebih tinggi akan bersifat katodik.
- 4) Perbedaan iluminasi. Daerah yang lebih gelap akan anodik terhadap daerah yang lebih terang.
- 5) Perbedaan konsentrasi dari elektrolit. Daerah logam yang kontak langsung dengan larutan yang lebih encer biasanya anodik dan terkorosi. Perhatikan gambar 3.2 di bawah ini.



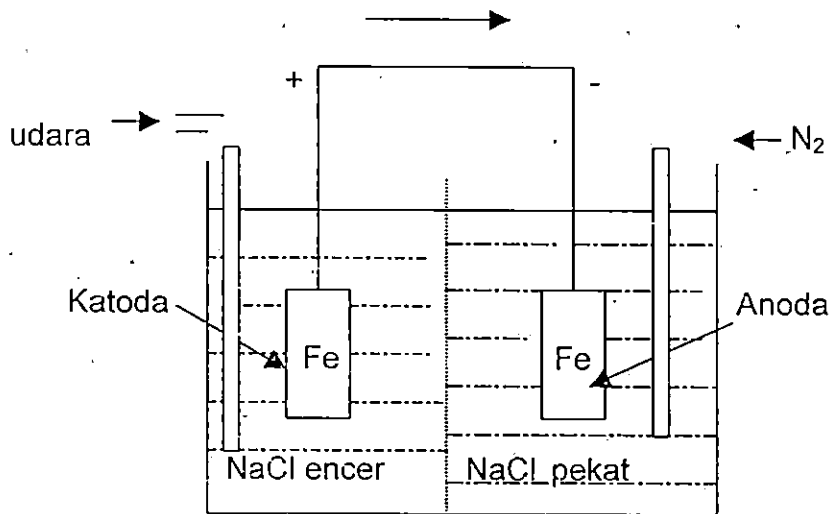
Gb. 3.2. Sel dengan perbedaan konsentrasi elektrolit



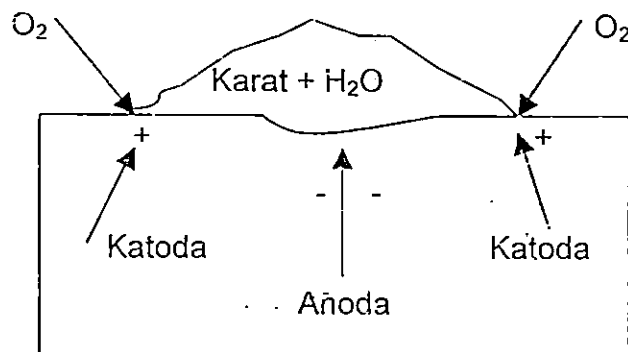
Satu elektroda tembaga ditempatkan dalam larutan tembaga sulfat pekat, dan satu elektroda lagi dalam larutan tembaga sulfat encer. Pada saat dihubungkan tembaga yang kontak dengan larutan encer menjadi anodik dan terkorosi, dan tembaga yang kontak dengan larutan pekat menjadi katodik dan tembaga diendapkan padanya. Reaksi katodik dan anodik cenderung menjadikan larutan menjadi sama konsentrasinya.

- 6) Perbedaan konsentrasi oksigen. Keadaan ini juga disebut dengan sel dengan perbedaan aerasi. Perhatikan gambar 3.3. dibawah di mana dua elektroda besi dimasukkan dalam larutan NaCl. Elektrolit disekeliling elektroda yang satu diberikan gas nitrogen sehingga timbul gelembung-gelembung uap air disekeliling elektroda. Kemudian elektroda besi yang satunya lagi disekelilingnya diberikan udara. Jika kedua elektroda tersebut dihubungkan, maka elektroda yang larutan disekelilingnya kekurangan oksigen menjadi anodik dan terkorosi. Bentuk lain yang sering dijumpai adalah seperti digambarkan pada 3.4, yaitu suatu kerusakan korosi sumuran yang terjadi dibawah produk korosi, dan kerusakan korosi celah pada daerah dibawah batas air seperti ditunjukkan pada gambar 3.5: Dari kedua gambar tersebut dapat disimpulkan bahwa daerah dibawah produk korosi akan kekurangan oksigen, sehingga menjadi anodik dan terkorosi.
- 7) Perbedaan temperatur. Sel yang terdiri dari elektroda logam yang sama, tetapi satu diceiupkan dalam elektrolit dengan komposisi yang sama pada awalnya, tetapi beda temperaturnya. Dalam larutan  $PbSO_4$  elektroda Pb pada temperatur yang lebih rendah adalah anodik. Jika dihubungkan Pb akan terlarut dari elektroda yang dingin dan diendapkan pada elektroda yang panas. Logam tembaga akan berperilaku seperti Pb, tetapi perak polaritasnya adalah kebalikan. Untuk logam besi yang dicelupkan pada larutan encer yang

mengandung oksigen terlarut dalam larutan NaCl, elektroda yang panas adalah anodik terhadap logam yang dingin pada komposisi yang sama. Tetapi setelah beberapa saat tergantung pada aerasi, laju pengadukan dan apakah dua logam dihubungkan atau tidak, polaritasnya mungkin kebalikan.



Gb.3.3. Sel dengan konsentrasi oksigen yang berbeda



Gb.3.4. Sel dengan perbedaan konsentrasi oksigen yang terbentuk dibawah daerah yang tertutup oleh produk korosi

### C. Prinsip Dasar Termodinamika Korosi.

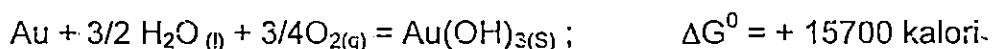
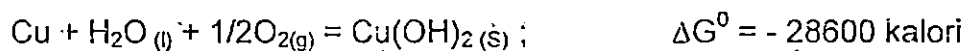
Telah diketahui bahwa logam yang berbeda mempunyai kecenderungan

korosi yang berbeda pada lingkungan korosif. Kecenderungan tersebut tergantung pada energi yang berhubungan dengan reaksi kimia yang terjadi selama proses korosi.

Dengan menghitung jumlah energi yang timbul oleh reaksi kimia dapat diindikasikan apakah korosi dapat terjadi dalam lingkungan tersebut yang diberikan. Korosi terjadi dalam lingkungan karena ketidak stabilan termodinamika dari bahan dalam lingkungan tersebut. Pendekatan termodinamika telah luas digunakan untuk menjelaskan dan memahami masalah korosi, meskipun tidak memberikan informasi pada proses kinetika korosi.

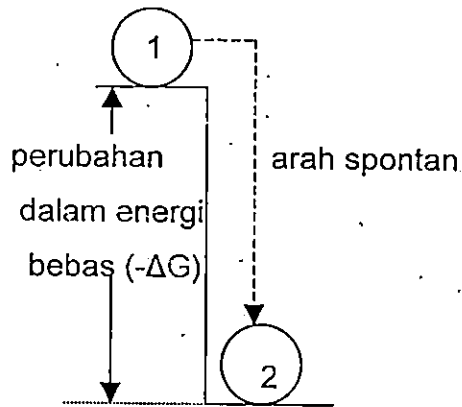
### 1. Energi Bebas

Energi bebas Gibbs ( $\Delta G$ ) adalah merupakan ukuran kecenderungan pada setiap reaksi kimia termasuk berlangsungnya reaksi bahan dengan lingkungannya. Energi bebas dengan harga negatif yang besar mengindikasikan bahwa reaksi cenderung berlangsung, oleh karenanya untuk harga energi bebas positif mengindikasikan bahwa tidak ada kecenderungan terjadinya reaksi kimia dan logam tidak terkorosi. Jika  $\Delta G = 0$ , berarti sistem dalam keadaan kesetimbangan. Contoh berikut ini menunjukkan harga  $\Delta G$  untuk beberapa reaksi kimia yang terjadi pada temperatur  $25^{\circ}\text{C}$  :



Harga-harga  $\Delta G^0$  untuk reaksi-reaksi tersebut mengindikasikan bahwa kecenderungan dari magnesium terkorosi dengan adanya air dan oksigen adalah lebih besar dibandingkan dengan tembaga, dan emas merupakan logam yang tidak mempunyai kecenderungan untuk terkorosi pada lingkungan tersebut.

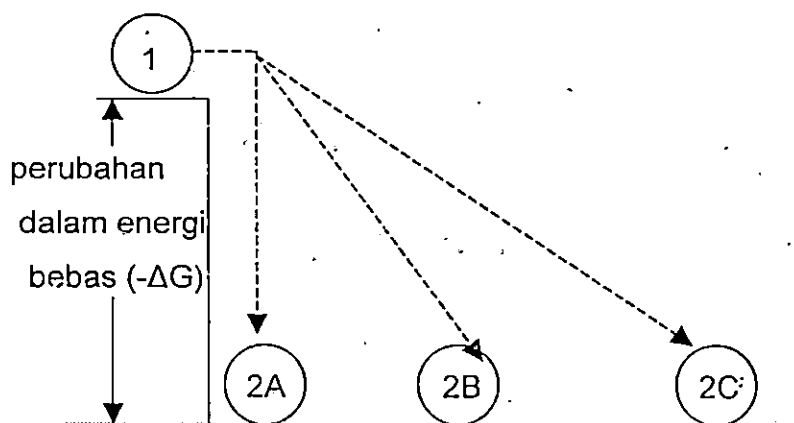
Prinsip tersebut bisa dianalogkan secara mekanik seperti digambarkan pada gambar 3.5.



Gb. 3.5. Analogi mekanik dari perubahan energi bebas

Prinsip tersebut dapat dijelaskan bahwa jika bola bergerak dari posisi 1 ke posisi 2 akan merepresentasikan adanya penurunan energi bebas. Transisi dari posisi 1 ke posisi 2 adalah arahnya spontan untuk sistem tersebut. Kebalikan dari perpindahan dari posisi 2 ke posisi 1 tidak berlangsung secara spontan, dan akan memerlukan energi luar untuk bisa berlangsung.

Perlu ditegaskan bahwa perubahan dalam energi bebas Gibbs adalah merupakan ukuran kecenderungan reaksi kimia untuk pergerakan kedepan kearah kesetimbangan atau bahan untuk terkorosi. Hal ini tidak memberikan informasi tentang waktu dalam mana kesetimbangan akan terjadi, atau dengan kata lain tidak memberikan ide tentang laju korosi bahan. Perubahan energi bebas adalah merupakan fungsi keadaan dan tidak tergantung pada jalannya reaksi. Hal ini bisa ditunjukkan pada gambar berikut di mana terdapat kemungkinan terjadinya 3 reaksi, yaitu melalui jalan A, B, dan C. Untuk semua jalan tersebut, perubahan energi bebas untuk perpindahan dari posisi 1 ke posisi 2A, 2B dan 2C adalah sama. Secara jelas karenanya perpindahan dari posisi 1 ke posisi 2C adalah yang paling lambat.



Gb.3.6. Pengaruh jalan reaksi pada laju reaksi

Pertimbangan secara termodinamika memberikan kecenderungan untuk reaksi berlangsung, sementara ini pertimbangan kinetika memberikan beberapa gagasan atau ide tentang laju reaksi dan waktu untuk berlangsungnya korosi. Dengan demikian prediksi tentang laju korosi adalah salah jika dalam memprediksikannya hanya menggunakan pertimbangan termodinamika

Logam adalah bahan konduktor listrik yang baik dan korosinya biasanya adalah secara elektrokimia sifatnya, maka reaksi korosi dari logam dapat dipertimbangkan sebagai suatu sel elektrokimia, yang mana menghasilkan energi listrik karena adanya reaksi elektrokimia. Jumlah kerja yang dilakukan oleh sel adalah sama dengan jumlah energi listrik yang dibangkitkan dalam kondisi tekanan, temperatur, dan reaktan yang tetap. Energi listrik yang tersedia adalah sama terhadap produk perbedaan potensial ( $E$ ) dan kuantitas dari kelistrikannya ( $Q$ ). Oleh karenanya:

$$\text{Kerja oleh sel} = Q \times E \quad (3.9)$$

Kita tahu bahwa  $Q$  adalah sama dengan 1 Faraday untuk setiap gram ekuivalen dari reaktan. Jika  $n$  ada;aj sa,a dengan jumlah elektron yang terlibat dalam reaksi kimia, maka  $Q = nF$ . Untuk setiap kerja yang dihasilkan oleh sel dapat diselesaikan hanya pada pengeluaran dari penurunan energi bebas dari reaksi sel. Jadi:

$$\Delta G = - nFE \quad (3.10)$$

di mana:

- $\Delta G$  = energi bebas perubahan dalam Joule
- $N$  = jumlah elektron yang terlibat dalam reaksi
- $E$  = emf dari sel dalam volt
- $F$  = konstanta Faraday.

Jika semua substan adalah dalam keadaan standar, maka:

$$\Delta G^0 = - nFE^0 \quad (3.11)$$

di mana  $E^0$  adalah emf standar dari reaksi, dan harga konstanta Faraday adalah 96485,9 coulomb/g equivalen, atau untuk lebih sederhana harga konstanta Faraday dibuta 96500 coulomb/gram equivalen. Harga energi bebas perubahan ( $\Delta G$ ) dapat dikonversikan dari kalori ke Joule dengan menggunakan besaran 1 kalori = 4,184 joule absolut.

Contoh menghitung potensial standar dari suatu reaksi sel diberikan sebagai berikut:

Jika energi bebas standar reaksi  $\text{Na}^+_{\text{aq}}$  dan  $\text{Pb}^{+4}_{\text{aq}}$  adalah +62,6 dan 197,0 kcal/mol. Hitunglah  $E^0$  untuk reaksi  $\text{Na}/\text{Na}^+$  dan  $\text{Pb}/\text{Pb}^{+4}$

Penyelesaian: Selama  $\Delta G^0 = - nFE^0$ , untuk reaksi  $\text{Na}/\text{Na}^+$ , di mana  $n = 1$ , maka:

$$\Delta G^0 \text{ untuk } \text{Na}/\text{Na}^+ = 62,6 \times 1000 \times 4,184 \text{ joule}$$

dan

$$62,6 \times 1000 \times 4,184 = - E^0 \times 1 \times 96500, \text{ maka}$$

$$E^0 = - 62,6 \times 1000 \times 4,184 / 96500$$

$$= - 62,6 \times 1000 \times 0,0434 \times 10^{-3}$$

$$= - 62,6 \times 0,0434$$

$$= - 3,72 \text{ volt.}$$

Dengan cara yang sama untuk reaksi  $\text{Pb}/\text{Pb}^{+4}$ , di mana  $n = 4$ , maka:

$$E^0 = - 197 \times 1000 / 4 \times 0,0434 \times 10^{-3}$$

$$= - 2,14 \text{ volt.}$$

## 2. Electrical Double Layer

Jika suatu logam dicelupkan dalam larutan/elektrolit, atom logam

tersebut terionisasi, menurut :



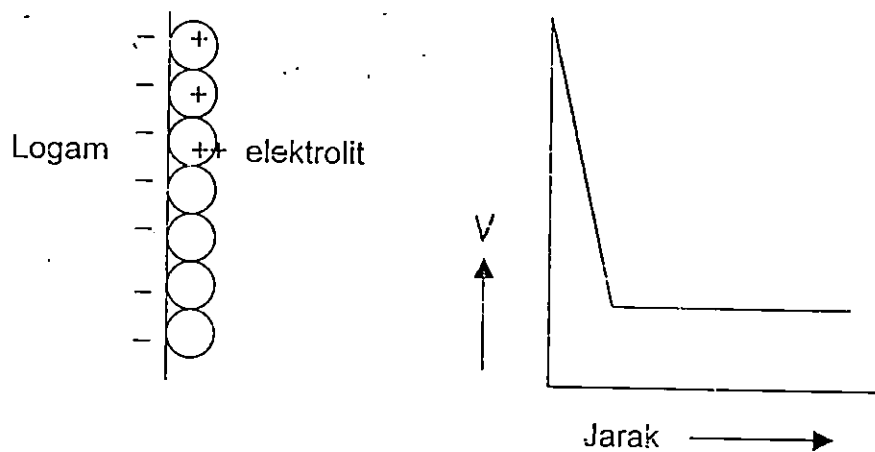
di mana  $n$  adalah jumlah elektron yang ikut dalam reaksi. Ion-ion  $M^{+n}$  berkombinasi kembali dengan elektron membenruk atom-atom logam, menurut reaksi:



Kesetimbangan biasanya diperoleh dalam waktu 1 detik, diantara kedua reaksi di atas.



Pada saat kesetimbangan laju reaksi keduanya adalah sama. Laju reaksi tersebut akan dijaga tetap sama dengan adanya perbedaan potensial pada batas fasa logam-elektrolit. Helmholtz mengajukan bahwa untuk mengembangkan perbedaan potensial satu fasa harus membawa muatan positif dan fasa lainnya bermuatan negatif pada batas fasanya. Pada batas fasa lapisan bermuatan positif dan muatan negatif nampak pada jarak tertentu dari masing-masingnya, secara bersama membentuk electrical "double layer", yang dapat digambarkan pada gambar 3.7



Gb. 3.7. Distribusi muatan dan potensial muatan dalam double layer

## BAB IV MEMPREDIKSI REAKSI KOROSI

### A. Pendahuluan

Pada bab ini akan dibahas tentang cara memprediksi reaksi korosi yang akan terjadi (reaksi oksidasi-reduksi), bagaimana melakukan pengukuran terhadap potensial elektroda, dan elektroda pembanding yang banyak digunakan pada pengukuran potensial suatu elektroda/logam. Di samping itu juga akan dibahas secara singkat diagram kestabilan logam-air pada temperatur 250C, atau yang lebih dikenal dengan diagram Pourbaix.

Setelah mempelajari materi kuliah bab ini mahasiswa diharapkan dapat:

1. Memprediksi reaksi korosi yang terjadi apabila suatu logam ditempatkan pada suatu lingkungan tertentu, dan jika suatu logam tersebut terkorosi seberapa cepat laju korosinya.
2. Mengukur besar potensial suatu logam pada lingkungan tertentu dengan menggunakan bantuan elektroda pembanding yang sesuai.
3. Menggunakan diagram Pourbaix untuk memprediksi terjadinya korosi suatu logam, dan dapat menjelaskan cara melakukan perlindungan korosi dengan menggunakan diagram tersebut.

### B. Memperkirakan Reaksi Korosi

Telah dijelaskan di muka bagaimana korosi metalik dapat terjadi karena adanya anoda dan katoda. Oleh karenanya kita mengetahui bahwa baja terkorosi dalam atmosfer, tetapi tembaga atau baja tahan karat secara umum tidak terkorosi dalam atmosfer.

Ahli korosi perlu mengetahui mengapa logam-logam tertentu terkorosi atau yang lebih penting bagaimana menghentikan logam-logam tersebut dari serangan korosi. Untuk mengetahui sifat-sifat utama dari logam-logam tersebut ada 2 hal utama yang harus dipelajari, yaitu memahami korosi secara termodinamika, yaitu apakah logam dapat terkorosi atau tidak secara kimia pada lingkungan yang diberikan, dan yang kedua adalah tentang kinetika korosi, yaitu seberapa cepat atau berapa laju korosi pada suatu logam. Kedua hal



tersebut merupakan dasar utama untuk memahami perilaku korosi dari logam.

### 1. Reaksi Oksidasi dan Reduksi

Telah dibahas sebelumnya bahwa korosi metalik melibatkan konversi dari logam dan ion-ionnya yang menghasilkan elektron. Sebagai contoh korosi pada besi (Fe) di mana besi akan terurai menjadi ion-ion ferrous ( $\text{Fe}^{2+}$ ) melalui reaksi:



Reaksi ini terjadi di daerah anoda, dan pada saat yang bersamaan terjadi pengambilan elektron di katoda. Dengan demikian ada sejumlah reaksi yang terjadi di katoda, seperti reaksi pembentukan gas hidrogen:



Dengan demikian reaksi keseluruhan yang terjadi adalah:



Jenis reaksi di atas disebut dengan reaksi redox (oksidasi-reduksi). Besi diubah menjadi ion-ion positif dan menghasilkan elektron dengan proses yang dikenal dengan oksidasi. Meskipun atom-atom atau ion-ion kehilangan elektron, reaksinya tetap disebut dengan reaksi oksidasi. Hal ini juga sama jika logam bereaksi dengan oksigen. Contoh jika logam ditempatkan dalam udara maka akan terjadi reaksi oksidasi, meskipun oksigen tidak terlibat secara langsung dalam reaksi oksidasi. Jadi setiap reaksi dimana ion-ion memperoleh elektron disebut dengan reaksi reduksi.

Reaksi (4.2) di atas adalah reaksi antara ion hidrogen dengan elektron membentuk gas hidrogen. Jika ion-ion logam dalam larutan mengambil elektron membentuk atom logam (yang merupakan kebalikan dari reaksi korosi, dan contohnya terjadi pada proses elektroplating), maka ion logam direduksi.

Setiap reaksi dimana atom atau ion memperoleh elektron disebut dengan reaksi reduksi. Jadi dalam reaksi keseluruhan (4.3) di atas besi

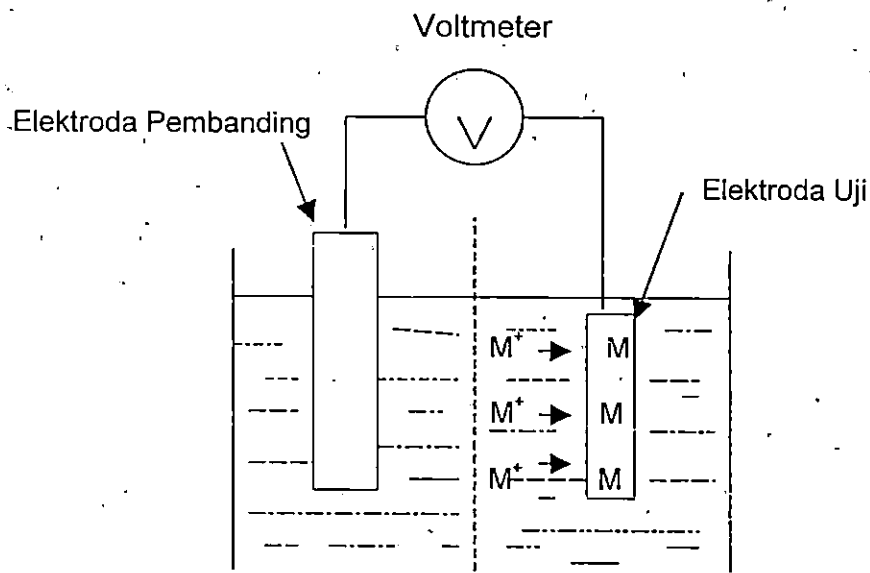
teroksidasi dan ion-ion hidrogen tereduksi. Ion-ion hidrogen mengoksidasi besi, jadi larutan yang mengandung ion-ion hidrogen atau setiap senyawa lain yang dapat direduksi disebut sebagai agent pengoksidasi. Dalam sel korosi oksidasi terjadi di anoda dan reduksi di katoda.

## 2. Potensial Elektroda

Dari sudut pandang korosi, adalah sangat penting untuk mengetahui bagaimana mudahnya logam dapat teroksidasi atau logam mudah kehilangan elektron. Pengalaman mengajarkan kepada kita bahwa logam-logam seperti emas dan platina adalah sangat sulit atau sukar untuk teroksidasi, sementara logam-logam lain seperti besi dan seng adalah sangat mudah untuk teroksidasi. Untuk itu kita memerlukan suatu ukuran tentang kemampuan relatif dari logam untuk teroksidasi. Contoh tembaga tidak akan terkorosi dalam asam HCl (hydrochloric acid), tetapi tembaga akan dapat terkorosi dalam asam nitrat. Dengan demikian asam nitrat mempunyai daya pengoksidasi yang lebih kuat dibandingkan dengan asam HCl. Jika suatu logam ditempatkan dalam larutan akan cenderung berubah apakah ia menjadi lemah atau kuat, artinya atom-atom logam berubah menjadi ion-ion dan masuk kedalam larutan. Kecenderungan tersebut akan menyebabkan terjadinya perbedaan potensial (voltage) pada permukaan logam diantara logam dan larutan. Jadi disamping kita mengukur potensial relatif terhadap elektroda reference atau pembanding yang secara definisi potensialnya adalah nol. Jika kita hubungkan satu logam dengan voltmeter (terminal yang satu) dan terminal satu lagi dari voltmeter dihubungkan dengan elektroda reference, maka potensial logam dapat diukur, yaitu potensial oksidasi logam ( $M$ ) menjadi ion-ionnya ( $M^+$ ), seperti ditunjukkan pada gambar 4.1 di bawah.

- Dengan cara pengukuran yang sama untuk berbagai jenis logam akan diperoleh harga potensial seperti yang ditunjukkan pada tabel seri emf (electromotive force). Emf adalah jumlah perbedaan potensial yang melewati elektroda pembanding ditambah potensial yang melewati antarmuka logam dan larutan. Selama perbedaan potensial yang melewati elektroda pembanding ditetapkan dengan nol, pengukuran dapat dilaporkan sebagai potensial

elektroda tunggal untuk reaksi :



Gb. 4.1. Pengukuran potensial pada elektroda tunggal

Hasil pengukuran beberapa logam dengan menggunakan bantuan elektroda pembanding dapat diberikan pada tabel emf seperti pada tabel 1. Tabel 1 tersebut disebut sebagai tabel seri emf dimana menunjukkan kemampuan relatif suatu logam untuk terionisasi, di mana potensial setengah sel atau potensial oksidasi-reduksi (potensial redok), menggambarkan suatu seri yang dibatasi oleh reaksi reduksi hidrogen yang berharga nol. Konsentrasi ion-ion logam dalam larutan akan mempengaruhi potensialnya, maka konsentrasi ion dalam logam harus dalam keadaan tetap seperti temperatur pengukuran juga harus tetap. Hasil pengukuran pada kondisi demikian disebut dengan standar potensial reduksi dan diberi simbol  $E^0$ .

Tabel 1. Seri Elektromotive Force (emf) untuk beberapa logam

No	Reaksi Elektroda	Standar Potensial Reduksi $E^0$ (volt)
<b><i>Katodik atau Nöbel</i></b>		
1	$\text{Au}^+ + e^- = \text{Au}$	+1,70
2	$\text{Cl}_2 + 2e^- = 2\text{Cl}^-$	+1,36
3	$1/2\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2e^- = \text{H}_2\text{O}$	+1,23
4	$\text{Pt}^{2+} + 2e^- = \text{Pt}$	+1,12
5	$\text{Hg}^{2+} + 2e^- = \text{Hg}$	+0,85
6	$\text{Ag}^+ + e^- = \text{Ag}$	+0,80
7	$\text{Fe}^{3+} + 3e^- = \text{Fe}$	+0,77
8	$1/2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2e^- = 2\text{OH}^-$	+0,40
9	$\text{Cu}^{2+} + 2e^- = \text{Cu}$	+0,34
10	$2\text{H}^+ + 2e^- = \text{H}_2$	0,00 (difinisi)
11	$\text{Pb}^{2+} + 2e^- = \text{Pb}$	-0,13
12	$\text{Ni}^{2+} + 2e^- = \text{Ni}$	-0,26
13	$\text{Cd}^{2+} + 2e^- = \text{Cd}$	-0,40
14	$\text{Fe}^{2+} + 2e^- = \text{Fe}$	-0,44
15	$\text{Cr}^{3+} + 3e^- = \text{Cr}$	-0,74
16	$\text{Zn}^{2+} + 2e^- = \text{Zn}$	-0,76
17	$\text{Ti}^{2+} + 2e^- = \text{Ti}$	-1,63
18	$\text{Al}^{3+} + 3e^- = \text{Al}$	-1,66
19	$\text{Mg}^{2+} + 2e^- = \text{Mg}$	-2,37
20	$\text{Na}^+ + e^- = \text{Na}$	-2,71
<b><i>Anodik atau Aktif</i></b>		

Potensial yang lebih negatif maka kecenderungan ion logam akan mudah teroksidasi atau masuk kedalam larutan dan reaksi menjadi terbalik dari yang ditunjukkan dalam tabel di atas. Logam-logam yang mempunyai

potensial standar negatif tersebut disebut aktif atau anodik. Logam yang mempunyai potensial lebih positif mempunyai kecenderungan yang besar untuk tetap stabil atau reaksi berlangsung dalam arah maju/ke depan seperti yang ditunjukkan dalam tabel, dan logam-logam dengan potensial lebih positif disebut dengan logam yang lebih nobel atau katodik. Contoh magnesium (Mg) potensial reduksinya - 2,37 volts, maka ia sangat aktif dan sangat mudah terkorosi, sementara emas potensial reduksinya + 1,70 volt, maka ia nobel artinya sangat kecil kemungkinan untuk terkorosi.

Oksidasi dari ion ferrous ( $\text{Fe}^{2+}$ ) menjadi ion-ion ferric ( $\text{Fe}^{3+}$ ). Jadi dalam lingkungan oksidasi yang kuat besi akan teroksidasi, pertama menjadi ion-ion ferrous, dan kemudian menjadi ion-ion ferric. Proses ini berlangsung dalam atmosfer yang korosif, dan reaksi tersebut juga melibatkan gas hidrogen dan oksigen. Setiap logam yang berada dibawah reaksi hidrogen (lihat tabel) akan teroksidasi oleh ion-ion hidrogen, artinya logam-logam tersebut akan terlarut jika ditempatkan dalam larutan asam. Sebagai hasilnya, reaksi katodik akan mereduksi ion-ion hidrogen (reaksi yang dituliskan dalam tabel) dan reaksi anodik adalah reaksi dari logam (reaksinya adalah kebalikan dari reaksi yang dituliskan dalam tabel). Reaksi lain adalah reaksi reduksi gas oksigen, reaksi ini mempunyai potensial sangat positif dalam larutan asam dan potensialnya kurang positif dalam larutan basa. Gas klor dalam air adalah juga nampak merupakan pengoksidasi kuat dalam air.

### 3. Aplikasi Dari Seri Elektrokimia

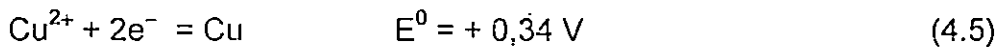
Elektrokimia memberikan informasi yang bermanfaat terhadap proses korosi, yaitu dapat digunakan untuk menentukan reaksi korosi yang akan terjadi dan potensial korosi diantara reaksi anodik dan katodik.

Dalam setiap reaksi elektrokimia, logam yang paling negatif cenderung teroksidasi dan yang paling positif potensialnya atau nobel cenderung akan tereduksi. Kenyataan ini dapat digunakan untuk memprediksi reaksi di elektroda dan beberapa fungsi berikut ini.

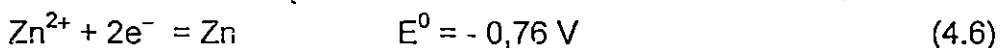
a. Penggantian hidrogen. Logam-logam yang nobel (diatas hidrogen) dalam tabel emf seperti emas, platina, dan lainnya tidak mampu membebaskan

hidrogen pada waktu logam ditempatkan pada asam yang oksigen terlarutnya kurang (de-aerated). Hanya logam-logam dasar (base metallic) yang berada di bawah hidrogen (tabel emf) akan membebaskan hidrogen dan oleh karenanya logam tersebut akan terkorosi pada larutan asam. Jadi seng atau besi sebagai contoh akan terlarut dalam asam yang oksigen terlarutnya kecil, sementara tembaga dan perak tidak akan terlarut. Larutan asam yang mengandung oksigen terlarut (aerated) merupakan larutan pengoksidasi yang kuat dan akan melarutkan tembaga dan perak.

- b. Penggantian logam. Satu logam akan diganti dengan logam lain yang lebih nobel, maka driving force meningkat dengan meningkatnya pemisahan logam-logam dalam seri elektrokimia. Contoh suatu batang seng dicelupkan dalam larutan tembaga sulfat, menjadikan terbentuknya ion-ion seng dan tembaga akan terlapisi. Untuk sistem tembaga-seng, maka ada 2 reaksi yang berlangsung, yaitu:



dan



Reaksi yang lebih positif berlangsung kearam muka dan yang lebih negatif reaksinya arahnya kebalikan, sehingga reaksi keseluruhan diatas dapat dituliskan sebagai berikut:



Oleh karenanya tidak terjadi reaksi jika batang tembaga ditempatkan dalam larutan yang mengandung ion-ion seng.

- c. Elektrolisis. Dengan elektrolisis ini dapat diprediksikan logam mana yang akan dilapisi dari larutan yang mengandung campuran ion-ion. Logam yang lebih nobel akan dilapisi lebih dahulu. Contoh dalam larutan asam yang mengandung ion-ion  $\text{H}^{+}$  dan  $\text{Cu}^{++}$ , tembaga dibebaskan terlebih dahulu,

tetapi dalam larutan yang mengandung  $\text{Na}^+$  dan  $\text{H}^+$  hanya hidrogen yang dibebaskan.

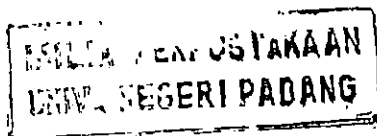
Dari penjelasan di atas terdapat beberapa keterbatasan pada elektrokimia, yaitu:

- a. Dalam elektrokimia diasumsikan kebalikan dari kondisi kesetimbangan yang berarti reaksi diinginkan terjadi pada kondisi tetap, tidak ada masalah seberapa lama reaksi tersebut. Hal ini jarang terjadi dalam praktek secara tertentu tidak dalam kondisi terkorosi.
- b. Dalam tabel atau seri hanya logam-logam murni yang dicantumkan, karena tidak mungkin mendapatkan potensial reversibel untuk logam paduan yang terdiri dari dua atau lebih unsur yang reaktif. Oleh karenanya dalam rekayasa kebanyakan menggunakan logam paduan dibandingkan dengan menggunakan logam murni.
- c. Terbentuknya film dipermukaan logam pada kondisi yang bervariasi. Contoh pada aluminium, krom, dan titanium adalah lebih aktif dibandingkan besi dan dalam tabel emf diharapkan lebih mudah terkorosi. Tetapi telah diketahui dengan baik bahwa unsur-unsur tersebut adalah lebih tahan korosi dibandingkan dengan besi. Hal ini dikarenakan lapisan film yang terbentuk adalah bersifat protektif.
- d. Dalam seri emf tersebut tidak memperhitungkan pengaruh dari pH. pH hanya diperhitungkan dalam kesetimbangan elektrokimia yang melibatkan logam-logam dan ion-ion sederhana, sedangkan banyak reaksi yang mungkin dapat terjadi akibat pengaruh pH, misalnya reaksi:



yang terjadi pada pH yang tinggi dan membentuk film protektif.

- e. Pada seri elektrokimia memerlukan logam yang berhubungan dengan ion-ion pada konsentrasi yang diberikan (ada). Dalam praktek konsentrasi ion sangat luas variasinya.
- f. Temperatur adalah variabel yang penting. Seri emf didasarkan pada temperatur  $25^\circ\text{C}$ . Dengan adanya perubahan temperatur dapat mengakibatkan naik atau turunnya potensial normal elektroda.



#### 4. Seri Elektrokimia VS Seri Galvanik

Dengan memperhatikan seri elektrokimia dan seri galvanik ditunjukkan bahwa kedua tabulasi tersebut menunjukkan beberapa kesamaan. Keduanya dapat digunakan untuk menentukan perilaku korosi, meskipun seri galvanik adalah lebih praktis dalam penggunaannya. Perbedaan diantara keduanya adalah:

- a. Seri elektrokimia dapat digunakan untuk memprediksikan apakah korosi pada logam tunggal yang diberikan akan berlangsung atau tidak. Kebalikannya seri galvanik digunakan untuk memperkirakan apakah akan terjadi korosi galvanik jika dua logam digabungkan bersama dan jika terjadi korosi galvanik logam mana yang menunjukkan peningkatan korosinya.
- b. Pada seri galvanik mentabulasikan logam-logam dan paduannya, sedangkan pada seri elektrokimia hanya mentabulasikan logam-logam murni.
- c. Seri galvanik menunjukkan logam-logam mampu pasif, seperti aluminium dan baja tahan karat, perilaku elektrokimianya adalah didasarkan pada film pasif dibandingkan dengan sifat logam aktif
- d. Seri galvanik adalah ditentukan dalam elektrolit yang diberikan, seperti air laut, sedangkan pada seri elektrokimia menggunakan larutan dari ion-ion logam yang konsentrasinya ditetapkan.

#### 5. Elektroda Pembanding

Elektroda pembanding (reference electrode) adalah sel elektrokimia yang mempunyai potensial yang stabil dan dapat direproduksi, sehingga dapat digunakan sebagai titik acuan untuk pengukuran potensial. Elektroda pembanding ini digunakan dalam hubungan elektrokimia untuk mengukur potensial elektrokimia di antarmuka logam-elektrolit. Suatu voltmeter dengan impedansi yang tinggi atau potensiometer dibutuhkan untuk menyakinkan bahwasanya arus yang mengalir sangat kecil (bisa diabaikan) sehingga tidak mempengaruhi hasil pembacaan/pengukuran potensial. Pemasangan dalam



pengukuran adalah kutup negatif dihubungkan dengan elektroda pembanding, sedangkan kutup positif disambungkan ke logam dan selanjutnya dilakukan pembacaan besaran potensial yang diukur.

Telah dikemukakan bahwa potensial standar untuk reaksi :

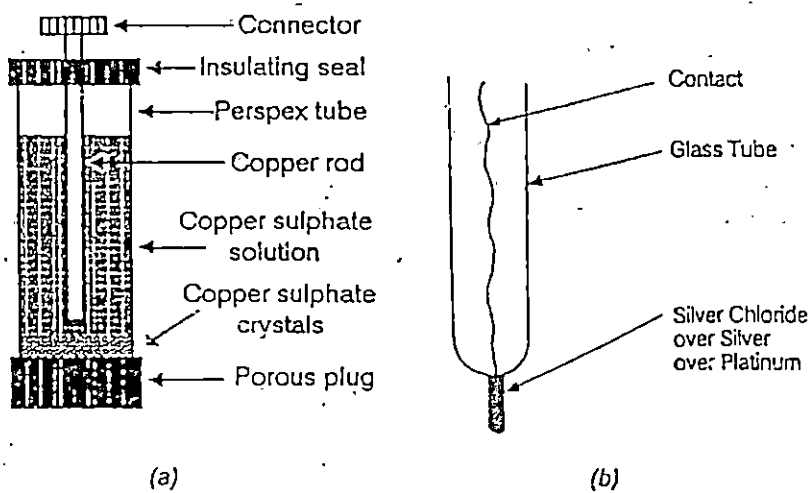
$2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$  adalah diasumsikan sama dengan nol (0) pada kondisi standar. Elektroda hidrogen dibuat dari elektroda platina yang inert dengan gas hidrogen pada tekanan 1 atmosfer. Jenis-jenis elektroda pembanding yang banyak digunakan adalah:

a. Elektroda Pembanding (Reference) Calomel

Elektroda calomel ini banyak digunakan dalam laboratorium, terdiri dari kawat platina yang dihubungkan dengan mercury dengan lapisan mercurious chlorida (calomel) dan dicelupkan dalam larutan potasium klorida (K Cl) yang bertindak sebagai elektrolit. Penutup bagian ujungnya dari bahan yang berpori untuk memudahkan lewatnya ion-ion tanpa menyebabkan terjadinya kontaminasi dari potesium klorida dan elektrolit pada sel uji. Potensial tergantung dari konsentrasi potasium klorida yang besarnya 1 M K Cl. Elektroda ini sangat banyak di-unakan.

b. Copper-Copper Sulphate Electrode ( $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$ )

Terdiri dari kawat platina yang ditutup dengan perak dan perak klorida yang ditempatkan pada tabung gelas tertutup. Elektroda ini banyak digunakan untuk pengukuran potensial dari struktur logam yang dibenam. Elektroda pembanding ini kurang akurat dibandingkan dengan elektroda pembanding Calomel , maka tidak digunakan dalam laboratorium. Elektroda pembanding ini terdiri dari batang tembaga yang dicelupkan dalam larutan tembaga sulfat jenuh, dalam kontainer yang berpori atau ujungnya berpori, seperti ditunjukkan pada gambar dibawah.



Gb. 4.2. Elektroda pembading (a) Cu/CuSO<sub>4</sub>, (b) Ag/Ag Cl

### c. Elektroda Pembading Ag/Ag Cl

Elektroda ini terdiri dari kawat yang ditutup dengan perak dan perak klorida dalam suatu tabung gas (gambar b). Potensial tergantung pada konsentrasi klorida dan elektroda ini sangat banyak digunakan dalam lingkungan air laut, sehingga banyak digunakan untuk sistem proteksi katodik.

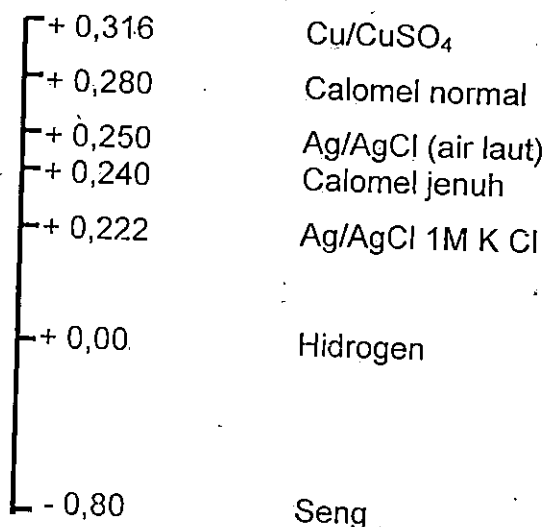
Potensial acuan beberapa elektroda pembading yang biasa digunakan ditunjukkan pada tabel 2.

Tabel 2. Elektroda Pembading

No	Elektroda	Elektrolit	Potensial (V)
1	Calomel (SCE)	K Cl jenuh	+ 0,242
2	Normal Calomel (NCE)	1 M K Cl	+ 0,280
3	Ag/Ag Cl 1 M K Cl	1 M K Cl	+ 0,222
4	Ag/Ag Cl dalam air laut	Air laut	+ 0,25
5	Cu/CuSO <sub>4</sub> (CSE)	Air laut	+ 0,316
6	Seng	Air laut	- 0,80
7	Standar Hidrogen		0,00

Untuk menentukan ukuran potensial dengan menggunakan elektroda

pem-banding selain dengan standar hidrogen, adalah mudah yaitu dengan menggunakan gambar berikut ini.



Gb.4.3. Diagram untuk konversi potensial elektroda

Contoh:

Hitung perbedaan potensial sel jika diukur dengan dengan elektroda pembanding Calomel, dimana hasil pengukuran standar potensial setengah sel besi ( $E^0 = -0,44$  vs SHE)

Dengan menggunakan gambar 3 plotkan harga potensial setengah sel besi. Dengan melihat hasil pengeplotan harga potensial setengah sel besi, maka dapat dihitung perbedaannya, yaitu:

$$\begin{aligned}
 E_{\text{sel}} &= E_2 - E_1 \\
 &= (-0,44) - (+0,242) \\
 &= -0,44 - 0,242 \\
 &= -0,682 \text{ Volt}
 \end{aligned}$$

Contoh 2:

Potensial pipa relatif terhadap elektroda pembanding Cu/CuSO<sub>4</sub> adalah -0,700 volt (potensial pipa lebih rendah dari potensial standar elektroda pembanding). Berapa potensial pipa relatif terhadap SHE?

Standar potensial elektroda pembanding Cu/CuSO<sub>4</sub> adalah + 0,316 lebih positif dibandingkan dengan SHE. Oleh karenanya potensial pipa relatif

terhadap SHE akan lebih positif dengan 0,316 volt dibandingkan terhadap elektroda pembanding Cu/CuSO<sub>4</sub>. Dengan demikian potensial relatif pipa terhadap SHE dapat dihitung melalui gambar 4.3, sebagai berikut:

$$E_{\text{pipa}} = -0,700 + 0,316 \text{ volt}$$

$$= +0,384 \text{ volt.}$$

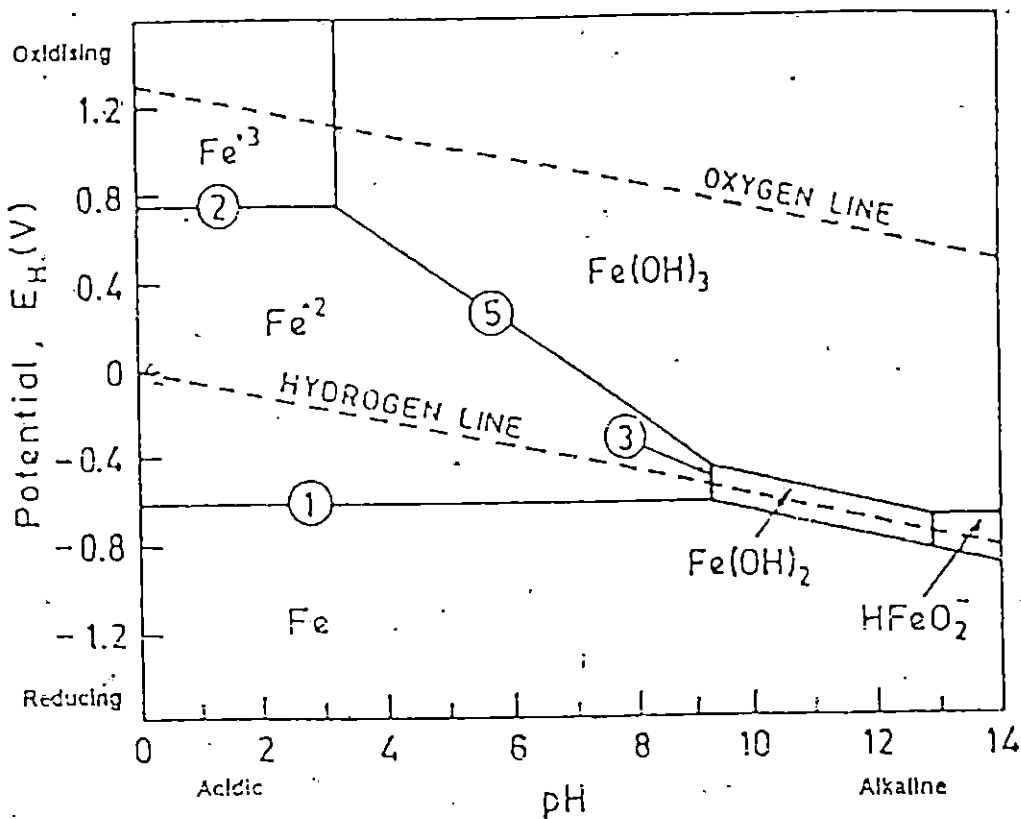
## 6. Diagram Pourbaix

Seri elektrokimia adalah sangat berguna untuk memprediksikan reaksi, tetapi mempunyai beberapa kelemahan/kekurangan. Sebagai contoh emf (electromotive force) dari suatu sel tergantung pada keasaman dan konsentrasi ionnya. Lebih lanjut produk korosi mungkin terjadi pada permukaan logam dan menahan/menghalangi reaksi. Contoh aluminium dan titanium, keduanya adalah tahan terhadap korosi karena terbentuknya lapisan film oksida protektif dipermukaan logam.

Diagram Pourbaix mengkombinasikan informasi dalam electrochemical series dengan pengaruh pH dan pembentukan oksida dan hidroksida dari logam. Sebagaimana telah dijelaskan di muka pH adalah alat yang sederhana untuk mengukur keasaman dan kebasaan (bersifat basa) dari suatu larutan, dengan pH 7 artinya larutan dalam keadaan netral, pH yang kurang dari 7 disebut bersifat asam dan pH lebih dari 7 disebut bersifat basa. Diagram Pourbaix mengindikasikan suatu senyawa yang stabil pada berbagai harga pH dan berbagai harga potensial. Skala potensial dapat dipakai sebagai acuan ukuran daya oksidasi dari suatu lingkungan. Untuk potensial yang lebih positif mengindikasikan bahwa lingkungan tersebut memiliki kondisi lebih oksidatif. Sebaliknya pada kondisi reduksi, seperti tidak adanya oksigen terlarut atau berhubungan dengan logam yang lebih aktif, akan membawa potensial ke arah negatif.

Gambar 4.4. adalah diagram Pourbaix untuk kestabilan besi dalam air, di mana ditunjukkan beberapa spesi yang stabil dibawah kondisi yang berbeda. Pada daerah dengan kondisi reduksi yang tinggi, pada semua harga pH, besi dalam keadaan stabil artinya tidak terkorosi. Daerah ini disebut

dengan daerah "immune". Pada daerah asam, besi relatif mudah teroksidasi menjadi ion ferrous atau dengan pengoksidasi kuat atau disebut dengan oksidan yang lebih kuat menjadi ion-ion ferric. Daerah ini disebut daerah korosi. Besi juga akan terkorosi pada kondisi sangat basa, di mana akan terbentuk  $\text{HFeO}_2^-$ .



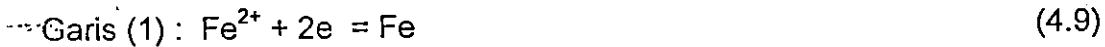
Gb. 4.4. Diagram kestabilan Fe-H<sub>2</sub>O pada 25<sup>0</sup>C

Di daerah dengan lingkungan atau kondisi basa hidroksida besi  $\text{Fe(OH)}_2$  atau  $\text{Fe(OH)}_3$  adalah spesi yang stabil, sehingga pada daerah ini besi tidak immun dari korosi, tetapi pada besi terbentuk film protektif, sehingga besi tidak terkorosi. Daerah ini disebut dengan daerah pasif.

Pada potensial di atas garis kestabilan oksigen, air akan direduksi dan akan melepaskan gas oksigen. Potensial dibawah garis kestabilan hidrogen, ion-ion hidrogen akan mengoksidasi logam, dan gas hidrogen akan dilepaskan. Diagram Pourbaix terdiri dari 3 jenis garis lurus dan masing-

masing mewakili keadaan kesetimbangannya. Perhatikan gambar 4.4:

a. Garis Horizontal atau garis paralel terhadap sumbu pH, garis (1) dan (2) mewakili kesetimbangan pada  $25^{\circ}\text{C}$ .



$$E = E^{\circ}_{\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}} + \frac{2,303 RT}{2F} \log (a_{\text{Fe}^{2+}})$$

$$= -0,44 + 0,029 \log (a_{\text{Fe}^{2+}})$$



$$E = E^{\circ}_{\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}} + \frac{2,303 RT}{2F} \log \frac{(a_{\text{Fe}^{+3}})}{(a_{\text{Fe}^{+2}})}$$

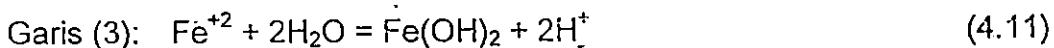
$$= 0,77 + 0,059 \log \frac{(a_{\text{Fe}^{+3}})}{(a_{\text{Fe}^{+2}})}$$

Kedua reaksi di atas tidak melibatkan ion  $\text{H}^+$  dan oleh karenanya tidak tergantung pada pH. Keduanya menunjukkan sebagai garis horizontal pada diagram Pourbaix, dan keduanya mengikuti persamaan Nerst.

Garis (1) dan (2) jika diperpanjang akan memotong diagram sampai pH cukup tinggi untuk mereduksi  $a_{\text{Fe}^{2+}}$  dan  $a_{\text{Fe}^{+3}}$  menjadi kurang dari  $10^{-6}$  gram ion/liter dengan pembentukan  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  dan  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  secara berturutan. Kesetimbangan yang sesuai diberikan oleh garis 3 dan 4.

b. Garis Vertikal atau Garis Sejajar terhadap Sumbu Potensial

Perhatikan garis (3) dalam gambar 4, yang menggambarkan kesetimbangan:



Di sini tidak melibatkan oksidasi sehingga tidak elektron dibutuhkan untuk mengimbangi atau membalance persamaan reaksi. Disamping konsentrasi ion mengikuti kaidah produk keterlarutan:

$$(\text{Fe}^{+2})(\text{OH})_2 = K_{\text{Fe}(\text{OH})_2} = 10^{-14,71},$$

di mana  $K_{\text{Fe}(\text{OH})_2}$  adalah produk kelarutan dari hidroksida besi. Karenanya

kita tahu bahwa :

$$\log (\text{OH}^-) = \text{pH} - 14$$

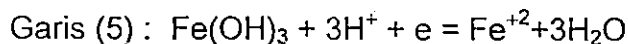
Dengan pengaturankembali setelah dilogaritma diperoleh:

$$\begin{aligned} \text{Log}(a_{\text{Fe}^{+2}}) &= -14,71 - 2(\text{pH} - 14) \\ &= 13,29 - 2 \text{pH} \end{aligned}$$

Hal ini tergantung hanya pada pH, dan oleh karenanya digambarkan dengan garis vertikal pada  $\text{pH} = 13,29/2 = 6,65$  untuk  $a_{\text{Fe}^{+2}} = 10^{-6}$ . Garis tersebut dapat digeser kekiri atau ke kanan dengan 0,5 pH untuk setiap peningkatan atau penurunan 1/10 (ten-fold) secara berurutan dalam konsentrasi ion  $\text{Fe}^{+2}$ .

c. Garis Slop.

Garis ini menggambarkan kesetimbangan yang melibatkan oksidasi (elektron) dan pH (ion hidrogen). Perhatikan garis (5) yang mewakili kesetimbangan sebagai berikut:



$$E_{\text{Fe}(\text{OH})_3/\text{Fe}^{+2}} = 1,060 - 0,177 \text{pH} - 0,059 \log a_{\text{Fe}^{+2}}$$

d. Garis-garis yang Mewakili Kestimbangan Oksigen dan Hidrogen

Pada diagram potensial-pH yang lengkap terdapat dua garis yang mewakili kesetimbangan oksigen dan hidrogen sebagai berikut:



$$E_{\text{O}_2/\text{OH}^-} = 1,23 - 0,059 \text{pH}$$

dan



$$E_{\text{H}^+/\text{H}_2} = 0,00 - 0,059 \text{pH}$$

telah digambarkan untuk tekanan 1 atmosfer oksigen dan hidrogen secara berurutan.

Pada potensial diatas garis kesetimbangan oksigen, oksigen akan berevolusi dari air, meskipun pada potensial di bawah garis kesetimbangan hidrogen, gas hidrogen akan berevolusi.

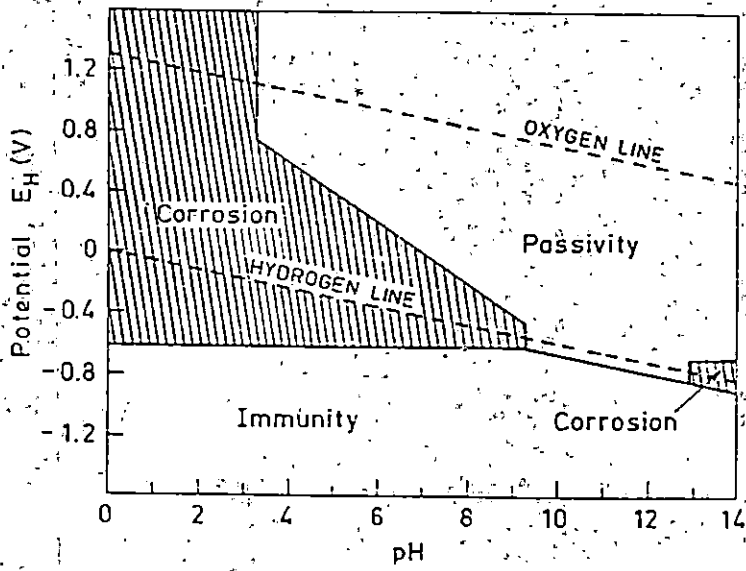
Konsentrasi ion logam  $10^{-6}\text{M}$ , contoh  $\text{Fe}^{+2}$  dan  $\text{Fe}^{+3}$  digunakan untuk mengkonstruksi diagram yang digambarkan pada gambar 4. Pada

konsentrasi yang rendah ini, diasumsikan bahwa tidak akan terjadi korosi. Pada konsentrasi yang lain (lebih besar atau lebih kecil dari  $10^{-6}M$ ), garisnya akan paralel terhadap garis yang telah digambarkan. Garis horizontal, vertikal, dan garis slop dalam diagram membentuk tiga daerah atau domain, yaitu:

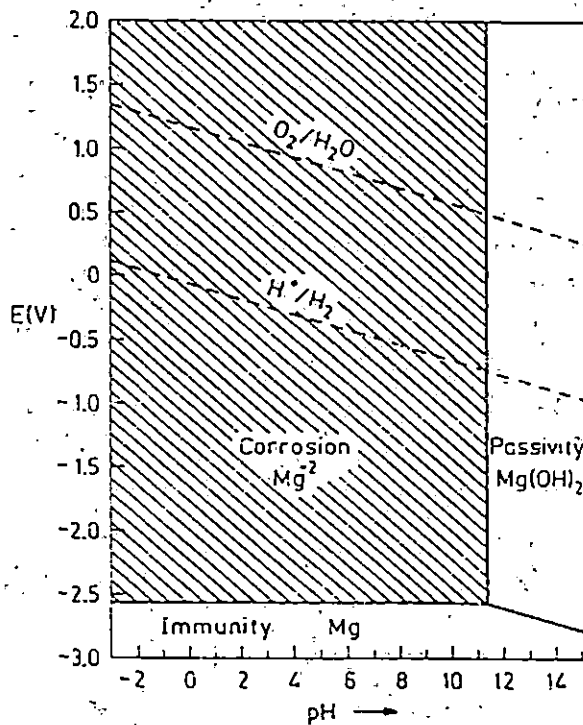
- 1) Daerah yang imun (kebal terhadap korosi). Pada daerah ini menggambarkan atau mewakili keadaan dimana korosi secara termodinamika tidak mungkin akan terjadi korosi. Pada daerah ini aktivitas ion-ion logam tidak melebihi  $10^{-6}$  gram ion/liter.
- 2) Daerah pasif. Pada daerah ini menggambarkan keadaan di mana logam secara termodinamika adalah tidak stabil dalam lingkungan utama, tetapi korosi dicegah dengan memodifikasi permukaan logam akibat pembentukan lapisan oksida. Pada daerah ini senyawa logam padat secara termodinamika stabil dan berkesetimbangan dengan aktivitas ion-ion logam sebesar  $10^{-6}$  gram ion/liter.
- 3) Daerah terkorosi. Pada daerah ini secara termodinamika logam terkorosi. Daerah ini dipisahkan dari daerah imun dengan garis yang menggambarkan kelarutan yang sama pada  $10^{-6}$  gram ion/liter (0,06 mg besi per liter).

Contoh dari 3 daerah utama pada diagram potensial-pH dapat dilihat pada diagram kesetimbangan Fe - H<sub>2</sub>O, Mg - H<sub>2</sub>O, dan Al - H<sub>2</sub>O seperti yang ditunjukkan pada gambar gambar 4.5, 4.6, dan 4.7 di bawah ini.

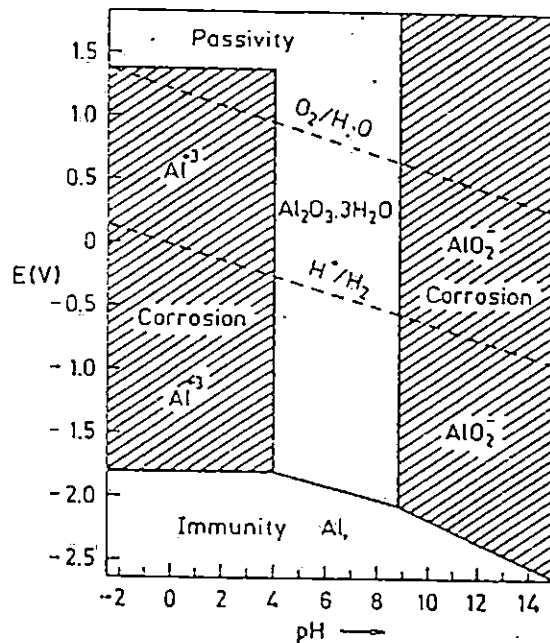




Gb.4.5. Diagram potensial sistem Fe-H<sub>2</sub>O yang menggambarkan daerah perilaku korosi



Gb.4.6. Diagram potensial-pH untuk logam magnesium



Gb. 4. 7. Diagram potensial-pH untuk logam aluminium

Gambar 4.7 di atas adalah gambar diagram Pourbaix untuk kestabilan aluminium di air. Di sini ditunjukkan bahwa aluminium akan terkorosi pada harga pH yang lebih rendah dari 4, dan lebih tinggi dari kira-kira 8,5, pada daerah potensial yang luas. Diantara batas tersebut akan terbentuk oksida film pasif. Pada diagram ini juga ditunjukkan bahwa di bawah kondisi oksidasi yang sangat kuat, aluminium adalah pasif meskipun pada lingkungan atau kondisi asam. Keadaan ini menjadi dasar dari proses anodisasi, di mana film oksida protektif tumbuh pada permukaan logam dengan mengaplikasikan potensial positif dalam larutan asam sulfat ( $H_2SO_4$ ).

Diagram potensial-pH sangat bermanfaat dalam ilmu elektrometalurgi, dan diagram ini sangat penting untuk mempelajari korosi logam dalam media aqueous dan elektrodposisi dari logam dan oksida. Diagram ini digunakan untuk memper-kirakan atau memprediksi:

- Arah spontan dari suatu reaksi
- Kestabilan dan komposisi dari produk korosi.
- Perubahan lingkungan di mana akan mencegah atau menurunkan serangan korosi.

Menurut diagram potensial-pH (gambar 4.4 untuk Fe) metoda berikut dapat digunakan untuk menurunkan korosi, yaitu:

- a. Dengan menurunkan potensial elektroda sampai daerah imun, yaitu dengan sistem proteksi katodik.
- b. Dengan menaikkan potensial elektroda sampai memasuki daerah pasif, yaitu dengan cara proteksi anodik.
- c. Dengan menaikkan pH larutan atau menjadikan larutan bersifat basa, sehingga akan terbentuk lapisan pasif pada permukaan logam.

Sebagaimana telah dikemukakan dimuka bahwasanya diagram potensial-pH (Pourbaix) mempunyai kelemahan. Secara teoritis diagram potensial-pH adalah efisien artinya untuk mengumpulkan dan menggambarkan secara termodinamika data untuk sistem korosi, tetapi mempunyai keterbatasan, di mana selalu harus selalu berhati-hati jika menggunakan diagram ini. Keterbatasan tersebut antara lain:

- a. Diagram ini tidak memberikan informasi tentang laju korosi, selama diagram ini hanya mendasarkannya pada data termodinamika bukan pada data kinetika.
- b. Terminologi tentang pasif dalam diagram ini digunakan terhadap bidang atau daerah yang mempunyai lapisan oksida, hidroksida, yang berlawanan dengan sifat protektifnya. Contoh pengendapan hidroksida mungkin terbentuk diper-mukaan dan oleh karenanya mungkin tidak protektif.
- c. Hanya memperhatikan masalah kesetimbangan antara logam dengan air untuk mengkonstruksi diagram potensial-pH ini, kecuali untuk beberapa kasus khusus, jadi hanya ion hidroksil ( $\text{OH}^-$ ) yang dipertimbangkan sebagai pengendapan atau ion kompleksnya. Dalam prakteknya korosi bisa mengendapkan berbagai jenis ion-ion seperti ion klorida ( $\text{Cl}^-$ ), sulfat ( $\text{SO}_4^{-2}$ ), fosfat ( $\text{PO}_4^{-2}$ ), dan lainnya.
- d. Banyak reaksi yang berkesetimbangan adalah merupakan dasar dari diagram kesetimbangan potensial-pH melibatkan produksi ion-ion hidrogen ( $\text{H}^+$ ) atau ion-ion hidroksil ( $\text{OH}^-$ ), dimana dapat mengakibatkan perubahan pH setempat yang sangat tinggi pada permukaan elektroda.

- e. Pengaruh bahan pengotor dalam larutan sulit untuk dipertimbangkan.
- f. Pengaruh unsur pepadu atau adanya bahan pengotor dalam logam tidak dipertimbangkan.
- g. Umumnya diagram-diagram digambar untuk kondisi temperatur kamar, walaupun pada temperatur tinggi diagram juga dapat dikonstruksi/dibuat, hal ini yang kurang representatif untuk menggambarkan kondisi yang nyata dalam penelitian.
- h. Dalam banyak kasus perhitungan secara termodinamika dan pengukuran potensial mungkin berbeda dan penggunaan diagram potensial-pH tanpa memberikan pertimbangan terhadap kenyataan yang ada mungkin bisa menyebabkan terjadinya kesalahan perhitungan akhirnya.
- i. Dalam hampir banyak kasus pengukuran potensial elektroda bervariasi dengan waktu dan mungkin membutuhkan waktu yang lama untuk memperoleh harga yang konstan.

## 7. Penggunaan Persamaan Nernst:

Persamaan Nernst dapat digunakan untuk menghitung:

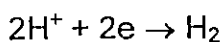
- a. Potensial elektroda (potensial setengah reaksi) dalam kondisi yang diberikan.
- b. emf dan polaritas dari elektroda dalam sel elektrokimia
- c. Kecenderungan korosi dari logam-logam dalam kondisi lingkungan yang diberikan.

Contoh 1:

Tunjukkan bagaimana potensial elektroda dari elektroda hidrogen akan bervariasi dengan pH pada tekanan 1 atmosfer

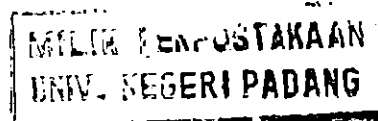
Penyelesaian:

Untuk elektroda hidrogen:



Potensial elektroda menurut persamaan Nernst:

$$E = E^0 + \frac{0,059}{2} \log \frac{a_{(\text{H}^+)^2}}{p\text{H}_2}$$



$$= E^0 - \frac{0,059}{2} \times 2 \times \text{pH}, \text{ selama } \text{pH} = -\log a_{(\text{H}^+)} \text{ dan } \text{pH}_2 = 1$$

$$= -0,059 \times \text{pH}, \text{ atau lebih enak } E^0 = 0$$

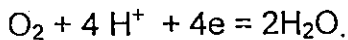
Persamaan di atas dapat digunakan untuk menghitung potensial elektroda dari elektroda hidrogen pada tekanan 1 atmosfer pada sembarang pH.

Contoh 2:

Tunjukkan bagaimana potensial elektroda hidrogen akan bervariasi dengan pH pada tekanan 1 atmosfer.

Penyelesaian:

Untuk elektroda oksigen reaksinya dapat dituliskan :



dimana  $\Delta G^0$  untuk  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}^+$  secara berurutan sama dengan 0,0 dan - 56,7 kcal/mole. Standar potensial elektrodanya akan menjadi:

$$E^0 = - \frac{\Delta G^0 (\text{reaksi})}{nF} = - \frac{2 \times (-56700) \times 4,18}{4 \times 96500} = 1,23 \text{ V}$$

Menggunakan persamaan Nernst:

$$E = E^0 + \frac{0,059}{4} \log \frac{(P_{\text{O}_2}) (a_{\text{H}^+})^4}{(a_{\text{H}_2\text{O}})^4}$$

$$= 1,23 + \frac{0,059}{4} 4 \log(a_{\text{H}^+}), \text{ selama } a_{\text{H}_2\text{O}} = 1, \text{ dan } P_{\text{O}_2} = 1$$

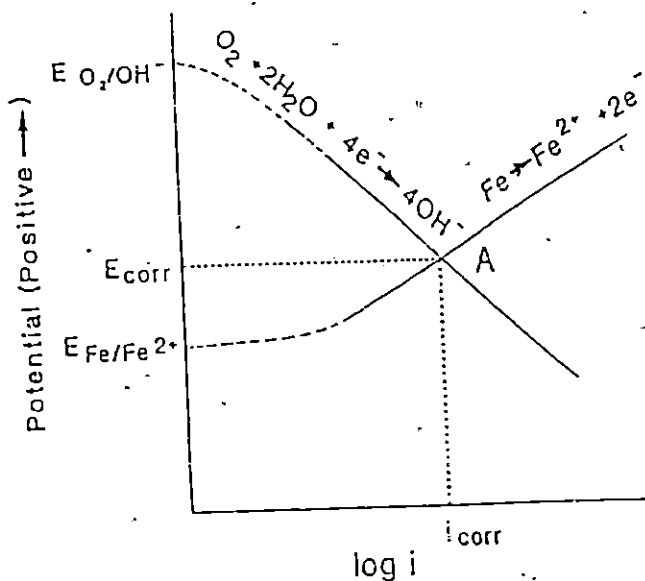
$$= 1,23 - 0,059 \times \text{pH} \text{ selama } \log(a_{\text{H}^+}) = -\text{pH}$$

Persamaan di atas memberikan variasi potensial elektroda oksigen dengan pH pada tekanan 1 atmosfer.

## 8. Polarisasi

Jika kita mempunyai sel korosi dengan tahanan yang besar antara anoda dan katoda, maka akan ada perbedaan potensial antara dua elektroda, dengan mengabaikan adanya arus yang mengalir di dalam sel tersebut. Dengan menggunakan elektroda pembanding (reference) seperti Calomiel potensial

anoda dan katoda dapat ditentukan secara terpisah. Potensial di mana arus yang mengalir dapat diabaikan dikenal dengan potensial "reversible". Anoda akan mempunyai potensial lebih negatif dibandingkan potensial di katoda. Pada waktu arus mengalir, maka sistem tidak lagi berkeimbangan dan potensial reaksi anoda dan katoda akan berbeda dari potensial reversibelnya. Hasilnya arus akan mengalir, dan potensial katodanya menjadi kurang positif (lebih negatif) sedangkan potensial anodanya menjadi kurang negatif (lebih positif). Dengan demikian reaksi anodik dan katodiknya disebut dengan dipolarisasi:



Gb. 4.8. Kurva polarisasi katoda dan anoda untuk sel korosi

Gambar 4.8 adalah kurva polarisasi katoda dan anoda dari suatu sel korosi dengan besi terkorosi pada anoda dan reduksi oksigen terjadi di katoda. Dengan tahanan yang kecil antara anoda dan katoda, masing-masing mempunyai potensial yang sama terhadap potensial reversibel. Dengan adanya arus yang mengalir, maka potensinya akan bergerak kedepan. Jika tahanan internal pada sel adalah dapat diabaikan, maka kasus reaksi korosi dapat terjadi pada daerah yang berdekatan satu dengan lainnya pada sebatang baja. Arus sel dalam kasus ini disebut dengan arus korosi ( $i_{\text{korosi}}$ ) atau ( $i_{\text{corr}}$ ) dan terjadi pada titik perpotongan A pada kurva polarisasi anoda dan

katoda. Pada kurva diatas pada titik A, anoda dan katoda potensialnya sama yaitu  $E_{corr}$  yang disebut dengan potensial korosi. Jika bentuk polarisasi anoda dan katoda diketahui, dimungkinkan untuk memprediksi arus korosi dan karenanya laju korosi pada situasi yang diberikan juga dapat diprediksi. Diagram polarisasi seperti yang digambarkan di atas dikenal dengan "**Diagram Evans**"

Penyimpangan dari potensial reversibel dikenal sebagai "*overpotensial*" atau "*overvoltage*" Ada tiga sumber yang berkontribusi terjadinya polarisasi dari reaksi elektroda, yaitu aktivasi, konsentrasi dan tahanan polarisasi.

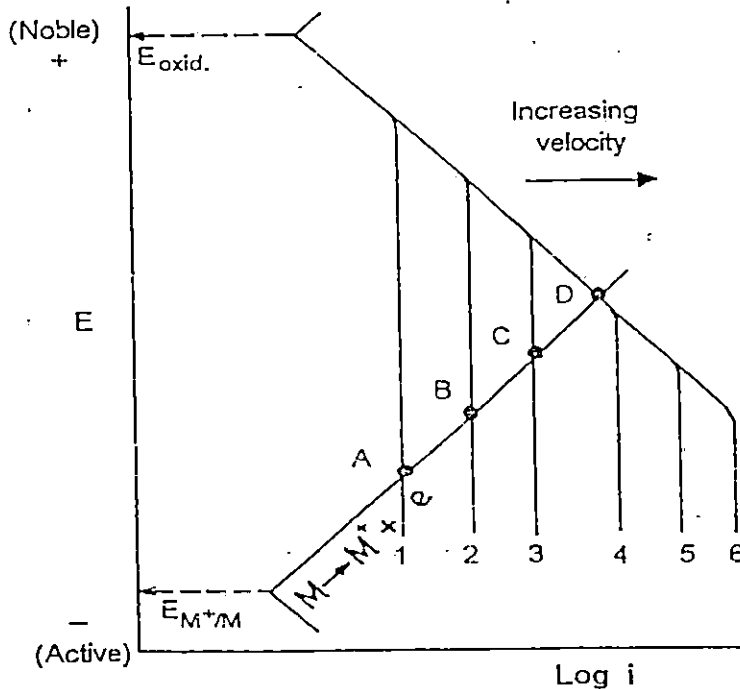
#### a. Polarisasi Aktivasi

Polarisasi aktivasi adalah merupakan hasil dari kenyataan bahwa reaksi di elektroda tidak terjadi secara instant, tetapi memerlukan waktu untuk terjadinya suatu reaksi. Polarisasi logam yang dilarutkan dalam asam adalah merupakan contoh dari polarisasi aktivasi. Kejadian ini dapat dijelaskan secara teoritis dan dapat diobservasi dalam praktek, bahwa polarisasi aktivasi dihasilkan dalam hubungan linier antara overpotensial dan logaritma dari rapat arus. Hubungan tersebut disebut dengan "**Hukum Tafel**!" dan perilakunya disebut dengan "**perilaku Tafel**". Dalam gambar 4.8 di atas reaksi anodik dan katodik menunjukkan hubungan linier antara polarisasi dan logaritma rapat arus ( $i_{corr}$ ), jadi keduanya merupakan contoh dari perilaku Tafel. Dalam korosi logam sebenarnya polarisasi anodik biasanya menggambarkan perilaku Tafel, tetapi polarisasi katodik biasanya menunjukkan polarisasi konsentrasi, karenanya tidak bisa diprediksi dengan hukum Tafel.

#### b. Polarisasi Konsentrasi

Polarisasi konsentrasi merupakan hasil dari lambatnya difusi reaksi spesi dalam larutan. Sebagai hasilnya konsentrasi reaktan pada elektroda berbeda dengan konsentrasi pada larutan ruahnya. Bentuk polarisasi ini umum jika terjadi reduksi oksigen. Polarisasi konsentrasi menghasilkan arus yang lebih kecil dari harga yang diprediksi dengan hubungan Tafel. Dalam lingkungan mendekati netral reaksi katoda umumnya adalah reaksi

reduksi oksigen. Selama kelarutan oksigen dalam air rendah, laju reduksi oksigen adalah terbatas oleh laju difusi ke daerah katoda. Hal ini secara jelas ditunjukkan dengan observasi pada pengarus aliran elektrolit pada laju korosi seperti ditunjukkan pada gambar 4.9.



Gb. 4.9. Pengaruh aliran elektrolit pada perilaku elektrokimia dari logam yang terkorosi

Pada aliran elektrolit yang lambat, ketersediaan oksigen adalah rendah dan logam terkorosi lajunya ditunjukkan pada A. Dengan naiknya aliran elektrolit maka ketersediaan oksigen juga meningkat, maka laju korosinya juga meningkat. Pada laju alirankritis (titik D), di mana korosi menjadi dikontrol oleh aktivasi dari pada oleh proses difusi. Diatas titik D aliran elektrolit tidak berpengaruh pada laju korosi.

### c. Tahanan Polarisasi

Tahanan polarisasi diakibatkan oleh tahanan listrik atau dikenal dengan  $IR_{drop}$  terjadi pada antarmuka logam-elektrolit, dan sering sebagai hasil adanya film atau lapisan pada permukaan logam. Bentuk dari polarisasi juga menghasilkan arus yang lebih rendah dibandingkan dengan yang



diprediksikan oleh hubungan Tafel, dan hal ini sangat bagus digambarkan dalam pembentukan film pasif pada logam, seperti pada logam aluminium, kromium, titanium dan baja. Polarisasi mempunyai pengaruh yang signifikan terhadap korosi, yaitu memengaruhi laju reaksi korosi. Jika kita bisa mencegah oksigen mencapai permukaan logam yang terkorosi yaitu dikontrol dengan polarisasi konsentrasi, atau dengan terbentuknya film pasif dipermukaan logam, maka korosi akan dapat diperlambat. Jika ada proses yang membantu oksigen secara cepat mencapai permukaan logam yang terkorosi, seperti aliran elektrolit yang dipercepat, atau adanya proses yang membantu reduksi hidrogen dipermukaan logam, maka laju korosi akan menjadi lebih cepat. Proses ini dikenal dengan sebagai "*depolarisasi*".

#### 9. Pasivasi

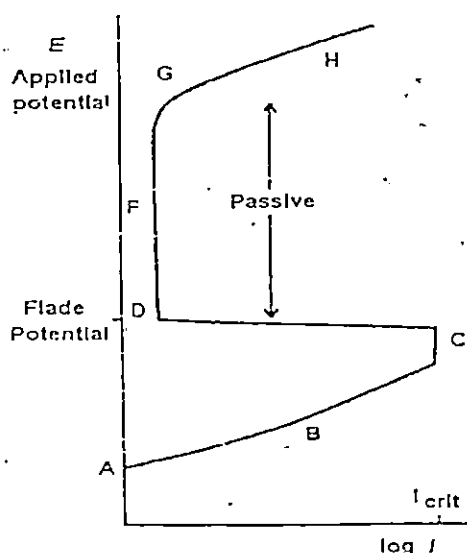
Pembentukan lapisan/film pasif pada logam seperti aluminium, krom, titanium dan baja mungkin dapat dipertimbangkan sebagai bentuk khusus tahanan polarisasi. Pada kondisi lingkungan tertentu, oksida atau lapisan protektif lain terbentuk pada beberapa logam sehingga bisa dimungkinkan penurunan laju korosinya. Kejadian ini mengakibatkan hilangnya sifat reaktivitas kimia dari logam dan biasanya disebut dengan sifat pasif (pasivasi). Contoh logam aluminium adalah logam yang sangat reaktif dan akan terkorosi pada banyak lingkungan, tetapi dengan terbentuknya lapisan protektif pada permukaannya maka aluminium tidak terkorosi. Contoh lain baha tahan karat tidak terkorosi karena terbentuknya lapisan krom oksida dipermukaannya yang mempunyai sifat tahan karat.

Lapisan pasif dapat menjadi masalah karena ia hanya stabil hanya pada lingkungan tertentu. Contoh aluminium dan baja tahan karat akan menderita korosi sumuran yang sangat hebat pada lingkungan yang mengandung klorida. Untuk itu harus dijaga jika perlindungan korosi hanya mengandalkan film atau lapisan pasif.

Sifat pasif dapat digambarkan dengan mengobservasi perilaku besi dalam larutan asam nitrat. Jika sepotong besi ditempatkan pada larutan asam

nitran jenuh, ternyata dari hasil observasi tidak terjadi reaksi. Jika larutan diencerkan dengan perbandingan 1:1, hasil observasi tetap tidak terjadi reaksi. Tetapi jika besi tersebut digores, maka akan terjadi reaksi secara cepat, meskipun goresan tersebut tidak berpengaruh pada sample dalam larutan nitrat yang jenuh. Jika spesimen dicelupkan atau dibenamkan dalam larutan yang lebih encer maka akan terjadi reaksi yang sangat cepat meskipun pada spesimen tidak digores. Jadi dapat disimpulkan bahwa logam tersebut reaktif (aktif) pada larutan asam encer dan inert (pasif) pada larutan asam jenuh.

Fenomena dari pasivasi telah diteliti, artinya dengan melakukan pengukuran potensiostatik dalam mana potensial yang diaplikasikan ke logam dalam larutan atau elektrolit aqueous dapat dikontrol dan arus dapat diatur dengan sendirinya untuk menjaga potensialnya. Jika potensial (E) potensial yang diaplikasikan diplot dengan log rapat arus (i), dimana (i) adalah rapat arus pada permukaan logam, dan kurva polarisasi anodik dapat diperoleh seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.10.



Gb.4.10. Potensiostatik kurva polarisasi anodik untuk logam yang menunjukkan sifat pasif

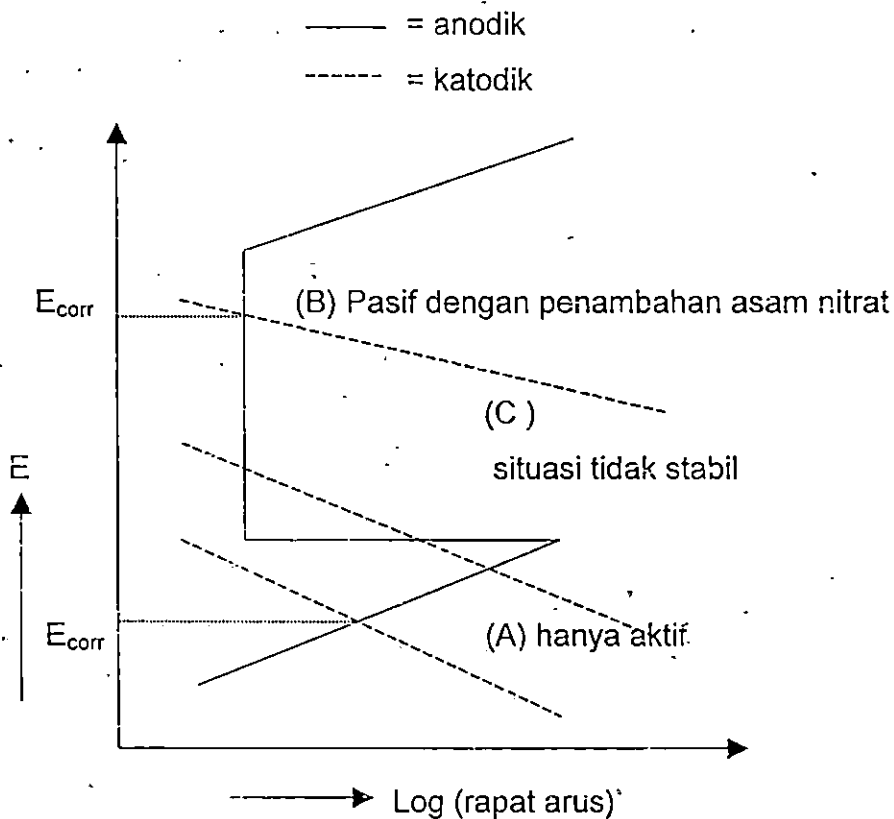
Kurva polarisasi katodik juga dapat diperoleh, tetapi perilaku anodik secara umum adalah yang paling menarik bagi para ahli korosi.

Perhatikan pada awalnya logam menunjukkan potensialnya adalah reversibel pada A, dan pelarutan dapat diharapkan dengan perilaku normal anodik dan mengabaikan hukum Tafel pada titik B. Kejadian ini disebut dengan batas aktif. Kemudian rapat arus kritis ( $i_{crit}$ ) dicapai pada titik C dan laju pelarutan menurun sampai kondisi yang paling minimum (daerah D) dan tidak bergantung pada potensial diatas batas potensial yang dipertimbangkan. Keadaan ini disebut dengan daerah pasif. Disini logam ditutupi permukaannya dengan lapisan yang "impervious", oksida koheren atau hidroksida. Akhirnya pada potensial yang sangat nobel (G) laju pelarutan mungkin meningkat kembali, dan perilaku ini disebut dengan "perilaku transpasif, atau oksigen mungkin dilepaskan pada potensial yang tinggi. Untuk aluminium, terjadi proses anodizing pada potensial yang tinggi dengan dengan tumbuhnya lapisan/film oksida protektif.

Terdapat banyak kriteria yang diinginkan untuk pemilihan logam yang menunjukkan sifat atau perilaku pasif. Potensial pada mana sifat pasif (pasivasi) terjadi atau disebut dengan potensial Flade harus serendah mungkin. Contoh logam titanium mempunyai potensial Flade - 0,42 volt (vs SHE) jadi dapat dipasivasi dalam asam non pengoksidasi. Sekarang kita perhatikan baja dimana baja mempunyai potensial Flade positif, jadi baja memerlukan asam pengoksidasi seperti asam nitrat untuk bisa bersifat pasif. Rapat arus kritis untuk pasivasi ( $i_{crit}$ ) harus sedapat mungkin juga serendah laju korosi dalam keadaan pasif. Lebih lanjut daerah potensial di mana logam menunjukkan sifat pasif harus sedapat mungkin lebar, sehingga sifat pasif logam tersebut tetap pada daerah yang lebar pada kondisi lingkungannya.

Bentuk S pada kurva polarisasi anodik dari logam sering merupakan bentuk yang tidak lazim jika kita mempertimbangkan perilaku korosi dari logam aktif-pasif. Perhatikan gambar 4.11, di mana didalam gambar tersebut ditunjukkan tiga kemungkinan terjadinya 3 kasus, jika logam aktif-pasif ditempatkan pada lingkungan yang korosif seperti pada larutan asam, dengan cara melakukan observasi kurva perilaku polarisasi katodik. Dengan tidak adanya oksigen atau dalam asam klor (HCl) kurva polarisasi katodik berpo-

tongan kurva oksidasi logam dalam daerah aktif jadi logam secara cepat terserang korosi yang diperlihatkan pada laju korosi (A). Oleh karenanya dibawah kondisi pengoksidasi seperti dalam asam  $\text{HNO}_3$ , kurva polarisasi katodik akan berpotongan dalam daerah pasif (B), dengan arus korosi yang sangat rendah. Dalam situasi ketiga (C) dimana kurva reduksi katoda tidak pada puncak aktif-pasif dari kurva oksidasi logam, kondisi tidak stabil mungkin ada, di mana logam mungkin terkorosi dalam keadaan aktif, diproteksi pada keadaan pasif atau berfluktuasi diantara keduanya. Untuk itu dari sudut rekayasa, keadaan yang tidak stabil harus dihindarkan.



Gb.4.11. Perilaku dari logam aktif-pasif dibawah kondisi pengoksidasi yang berbeda

## BAB V

### ASPEK METALURGI DALAM KOROSI

#### A. Pendahuluan

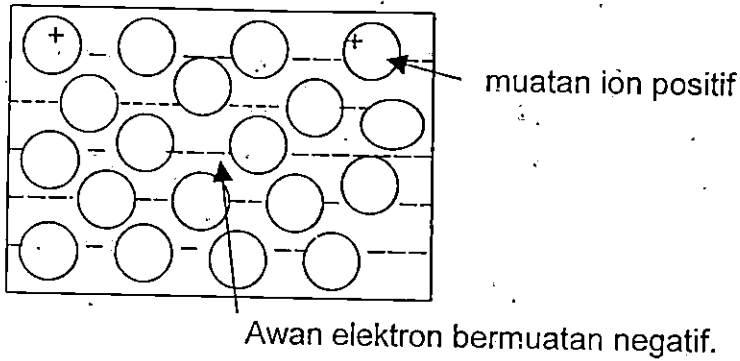
Membicarakan masalah korosi akan banyak berkaitan dengan logam, sebab pada dasarnya kebanyakan korosi terjadi pada logam. Dalam banyak korosi, inisiasi korosi, laju serangan korosi dan tingkat pengontrolan korosi berkaitan dengan masalah metalurgi. Untuk memahami masalah korosi, maka dalam bab ini akan dibahas beberapa hal mengenai dasar-dasar metalurgi yang sesuai dengan peristiwa korosi.

Tujuan dari materi pengajaran ini ialah agar mahasiswa dapat:

1. Menyebutkan jenis ikatan atom dan menyebutkan cacat-cacat dalam kristal yang banyak berpengaruh pada proses korosi.
2. Menjelaskan proses pembekuan/pembentukan kristal dalam logam dan proses deformasi plastik yang bisa mempengaruhi proses korosi pada logam.
3. Menjelaskan tentang diagram besi-karbon dan kaitannya dengan peristiwa korosi pada baja dan besi tuang, serta dengan diagram besi-karbon ini mahasiswa dapat melakukan perlakuan permukaan untuk meningkatkan ketahanan korosi logam (besi tuang dan baja), pada berbagai lingkungan.

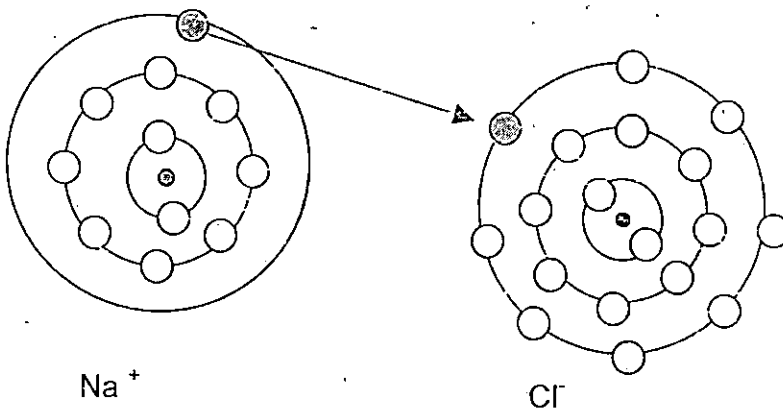
#### B. Struktur Logam Murni

Beberapa logam mempunyai titik lebur dan titik didih yang relatif tinggi, dan mempunyai sifat konduktor panas dan listrik serta mempunyai sifat keuletan (ductility) yang baik. Sifat ini sangat erat hubungannya dengan deformasi permanen (tetap) tanpa terjadi perpatahan, sebelum sampai pada batas perpatahannya. Sifat keuletan ini berhubungan dengan sifat ikatan logam, yaitu bahwasanya logam terdiri dari ion-ion positif yang disusun dalam pengulangan yang teratur dengan elektron valensinya membentuk awan elektron bebas, seperti digambarkan di bawah ini.



Gb. 5.1. Ikatan logam

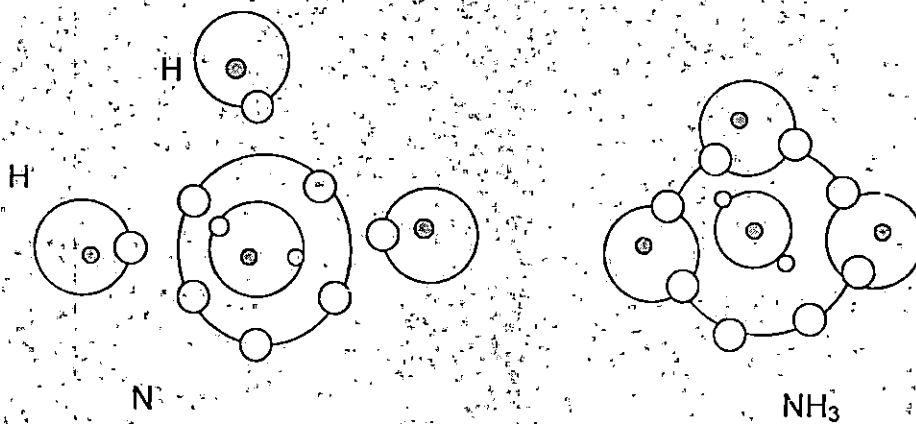
Dalam ikatan atom kita mengenal adanya ikatan ionik dan ikatan kovalen, dimana ikatan ionik dapat didefinisikan bahwa ikatan ionik terjadi karena adanya saling memberi elektron antara suatu unsur dengan unsur lainnya sehingga terjadi ikatan yang kuat. Contoh ikatan ionik ialah ikatan antara unsur Na dan Cl, di mana pada unsur Na pada sel terluarnya kelebihan satu elektron, sedangkan pada Cl kekurangan satu elektron, sehingga Na memberikan satu elektron kepada Cl, sehingga terjadi ikatan antara Na dan Cl seperti digambarkan di bawah ini.



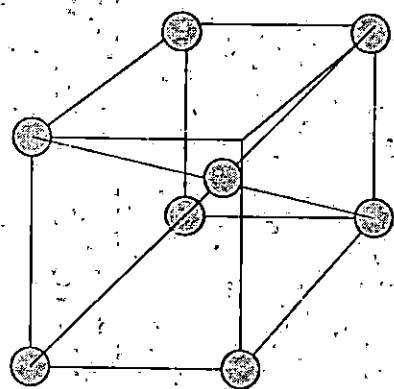
Gb. 5.2. Ikatan ionik

Ikatan kovalen adalah ikatan yang terjadi karena terjadinya penggunaan elektron secara bersamaan oleh kedua unsur. Contoh ikatan kovalen adalah pada NH<sub>3</sub> di mana H yang mempunyai satu elektron dipakai secara bersama dengan N, sehingga terjadi ikatan yang kuat, seperti ditunjukkan pada gambar di

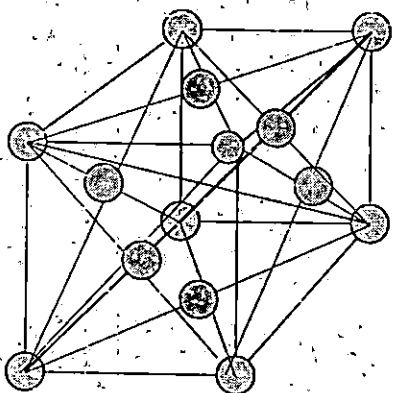
bawah ini:



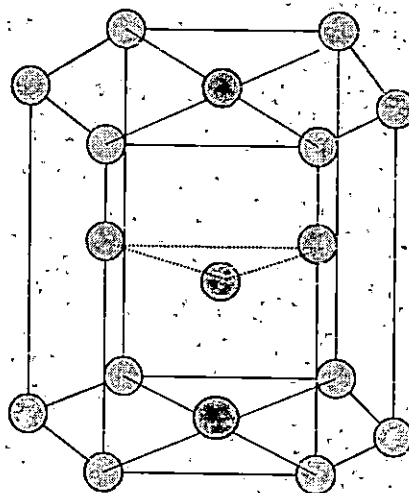
Gb. 5.3. Ikatan kovalen



BCC



FCC



HCP

Gb. 5.4. Unit sel

420C	0,30	12,5			Kekerasan mencapai 420 HBN, untuk peralatan potong, pisau bedah dll.
431	0,18	16	2,0		Baja yang dapat dikeraskan dengan ketahanan korosinya sama AISI 302. Digunakan untuk poros pompa. Setelah proses tempering harus dilakukan double temper.
440C	1,10	17		0,40 Mo	Kekerasannya sangat tinggi (RC 60) dan tahan abrasi dari semua baja tahan karat. Ketahanan korosinya sama dengan baja AISI 410

### c. Baja Tahan Karat Austenitik

Baja tahan karat austenitik merupakan baja tahan karat yang sangat banyak digunakan untuk keperluan rekayasa permesinan dan konstruksi. Baja ini adalah non magnetik dan tidak dapat dikeraskan dengan proses perlakuan panas. Baja tahan karat austenitik mempunyai kandungan 18% krom, 8% nikel sampai 26% krom dan 22% nikel. Penambahan molibdenum akan meningkatkan ketahanan terhadap korosi merata dan korosi sumuran dan meningkatkan kekuatan pada temperatur tinggi. Nitrogen kadang-kadang ditambahkan untuk meningkatkan ketahanan terhadap korosi sumuran. Jenis, komposisi, dan pemakaian baja tahan karat austenitik dapat dilihat pada tabel dibawah ini.

Tabel 3. Jenis, komposisi, dan pemakaian baja tahan karat austenitik.

AISI	Komposisi (%)				Penggunaan
	C	Cr	Ni	Lainnya	
301	0,08	17,0	7,0		Keperluan umum dengan ketahanan korosi yang baik untuk semua aplikasi. Banyak digunakan untuk keperluan konstruksi seperti gerbong kereta api.
302	0,08	18,0	9,0		Sedikit lebih baik dari baja 301. Digunakan untuk keperluan industri makanan dan keperluan arsitektur dan barang dengan aplikasi deep drawing.
303	0,12	18,0	9,0	0,25 S	Keperluan permesinan dan ketahanan korosinya dan kemampuan untuk dilas kurang baik dibandingkan baja jenis 302



304	0,06	18,5	9,0		Ketahanan korosinya sama dengan baja 302. Digunakan untuk keperluan jika ketahanan eld decay tinggi.
304L	0,03	18,5	9,5		Kandungan karbonnya rendah. Digunakan untuk industri kimia dan peralatan prosesing pada industri makanan, di mana bebas dari sensitisasi.
305	0,08	18,0	12,0		Digunakan untuk kepala baut dengan pengerjaan dingin
309	0,15	23,0	13,5		Untuk peralatan dengan ketahanan temperatur tinggi dan ketahanan oksidasi. Banyak digunakan untuk komponen dapur pemanas.
310	0,12	25,0	20,0		Untuk komponen dapur pemanas, Tahan temperatur 900°C - 1100°C
316	0,06	17,0	12,0	2,25 Mo	Digunakan jika ketahanan korosinya tinggi, seperti peralatan pada kapal laut, industri kimia. Dapat dilas samapi 3 mm tanpa perlu pemanasan awal.
316L	0,03	17,0	12,0	2,25 Mo	Modifikasi dari baja 316 dengan kandungan karbon rendah, di mana pengelasan diperlukan tanpa resiko terjadinya korosi intergranular.
317	0,07	19,0	13,0	3,25 Mo	Untuk industri kimia, mempunyai ketahanan korosi yang lebih tinggi dari baja 316 pada aplikasi tertentu yaitu yang berhubungan dengan brines dan garam-garam halogen. Tersedia juga dalam jenis L (low carbon)
321	0,06	18,0	10,0	0,05 Ti	Untuk keperluan industri kimia dan industri lainnya dengan pengelasan pada fabrikasinya. Sesuai untuk aplikasi yang tahan panas sampai 800°C. Tidak sesuai untuk bright polishing.
904L	0,02	20,0	25,0	4,2 Mo dan 0,15 Cu	Digunakan pada lingkungan yang sangat berbahaya. Ketahanan korosi surnuran, celah, dan korosi retak tegang sangat tinggi.
201	0,12	17,0	4,5	6,5 Mn & 0,15 N	Harganya murah, sama dengan baja 301 tetapi Ni nya lebih rendah.
202	0,08	18,0	5,0	9,0 Mn & 0,15 N	Harganya murah, sama dengan baja 302 tetapi Ni nya lebih rendah.

Baja tahan karat austenitik mempunyai sifat ulet, kekuatan, mudah dibentuk, dan ketahanan korosi yang baik, tetapi rentan terhadap korosi

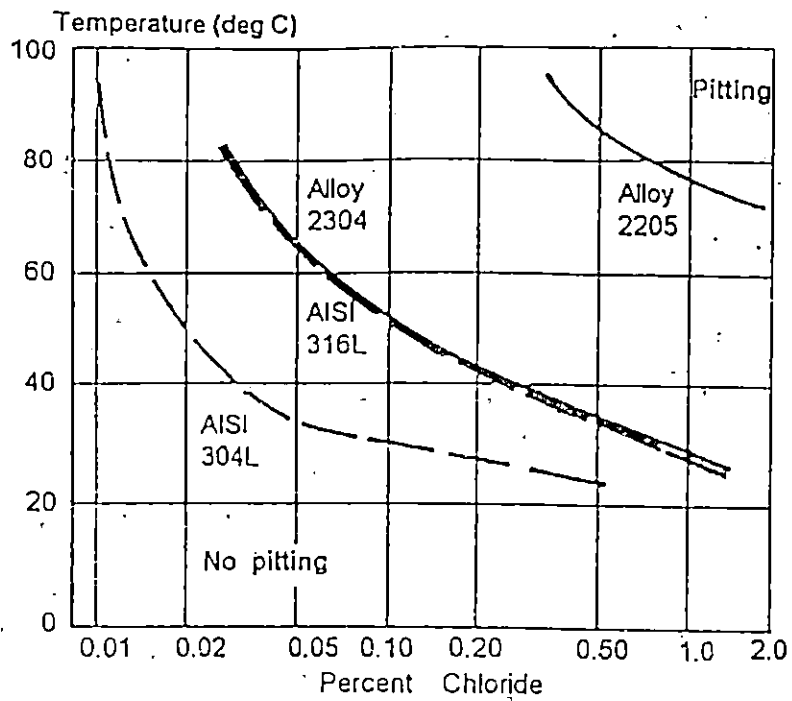
retak tegang (stress corrosion cracking). Pengendapan karbida krom dapat dicegah dengan cara menurunkan kandungan karbon dalam baja austenitik sampai 0,03% (L grade) atau dengan penambahan niobium dan titanium.

Jenis baja 304 (18/8) adalah jenis dasar dari baja tahan karat austenitik. Baja jenis ini banyak digunakan untuk pipa, tabung, vesel untuk proses kimia dan makanan. Jenis baja 316 mengandung 2-3% molibdenum sangat banyak digunakan pada daerah yang sangat korosif seperti untuk peralatan pada industri kimia dan makanan atau bisa digunakan pada daerah pantai. Untuk keperluan yang memerlukan pengelasan maka kandungan karbon harus dibuat rendah, maka dihasilkan baja tahan karat austenitik jenis 316L. Kenaikan kandungan krom, nikel dan molibdenum, misalnya jenis 904L akan meningkatkan ketahanan korosi merata, korosi sumuran, korosi celah, dan korosi retak tegang. Dengan penambahan tembaga 1-2% dalam baja tahan karat ini (904L) akan meningkatkan ketahanan korosi dalam larutan asam

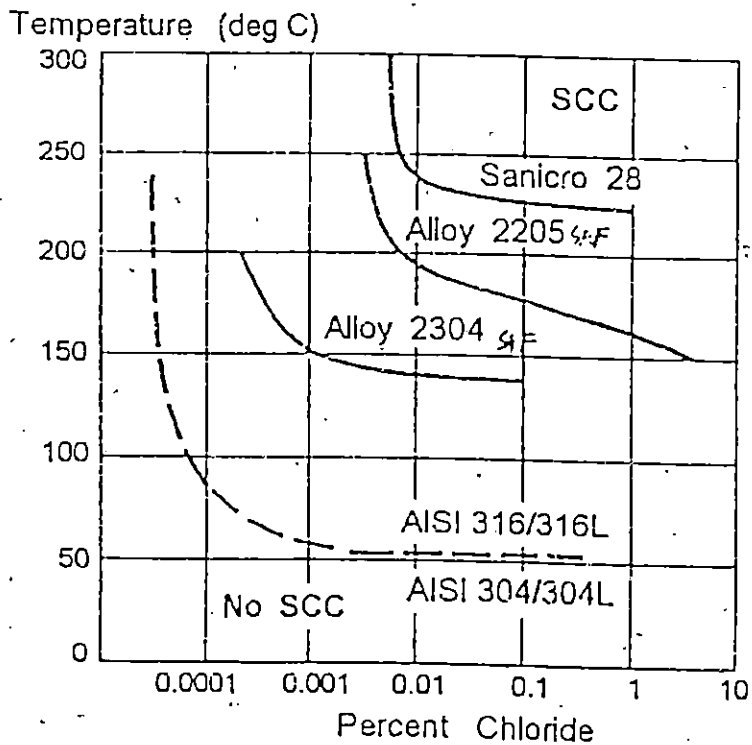
#### d. Baja Tahan Karat Duplex (Austenitik-Feritik)

Baja tahan karat jenis ini merupakan kombinasi terbaik dari baja feritik dan austenitik. Baja tahan karat ini mempunyai sifat ketangguhan, mampu las dengan baik, ketahanan korosi yang baik (austenitik) dikombinasikan dengan ketahanan terhadap korosi retak tegang serta mempunyai kekuatan yang baik (feritik stainless steel). Sifat dari baja tahan karat duplex ditunjukkan pada gambar 8.2 dan 8.3.

Baja tahan karat ini mempunyai kandungan krom yang tinggi, nikel yang kecil dan kandungan karbonnya rendah dan umumnya mengandung molibdenum. Baja ini akan menjadi getas diatas temperatur 300°C dan tidak direkomendasikan untuk keperluan di atas temperatur tersebut.



Gb. 8.2. Ketahanan baja tahan karat duplek terhadap korosi sumuran.



-Gb. 8.3. Ketahanan korosi retak tegang baja tahan karat duplek

e. Precipitation (Ageing) Hardening atau PH Stainless Steel

Baja tahan karat jenis ini mempunyai kekuatan yang paling tinggi dari seluruh jenis baja tahan karat. Unsur-unsur seperti tembaga atau aluminium ditambahkan sehingga terbentuk endapan yang kuat pada waktu bahan dipanaskan pada temperatur aging. Baja tahan karat jenis ini cenderung digunakan untuk keperluan khusus, di mana kombinasi kekuatan yang tinggi dan ketahanan korosi sangat diperlukan.

Baja ini tidak dapat digunakan untuk temperatur tinggi, sehingga baja ini tidak dapat dilas pada proses pembentukannya. Jenis baja, komposisi, dan pemakaian baja tahan karat jenis ini dapat dilihat pada tabel 4 di bawah ini.

Tabel 4 Jenis, komposisi, dan pemakaian baja tahan karat precipitation hardening.

Ref. No.	Komposisi (%)				Penggunaan
	C	Cr	Ni	Lainnya	
Duplex					
329	0,8	26,0	4,5		Ketahan korosi sumuran dan celah sangat bagus, Kemampuan lasnya jelek. Banyak digunakan untuk poros pada kapal laut.
2304	0,03	23,0	4		Kekuatannya dan ketahanan erosinya baik. Ketahanan korosi retak tegang lebih baik dari baja tahan karat austenitik. Banyak digunakan pada industri kimia dan industri kertas, pompa-pompa, katup-katup, dan lainnya.
2205	0,03	22,0	5,5	0,15 N	Ketahanan korosi retak tegang, korosi sumuran dan celah sangat bagus. Banyak digunakan pada peralatan pada industri kimia, gas, dan minyak.
Precipitation hardening					
630	0,05	16,0	4,0	0,25 Nb	Sifat mekanisnya sangat baik. Cocok untuk bahan pada komponen untuk keperluan ruang angkasa dan peralatan pada lingkungan air laut, seperti poros-poros pompa katup uap, baut-baut, dll.
PH1 3 – 8 Mo	0,05	13,0	8,0	2,5 Mo & 1,0 Al	SDA

Pengelasan dan pemotongan baja tahan karat dapat dipengaruhi oleh lapisan film oksida protektif dan pembersihan dan pasivasi diperlukan setelah proses fabrikasi. Jika ketahanan korosi optimum diperlukan maka weld spatter, flux scale, heat discolouration, dan lainnya harus dihilangkan dengan proses penggerindaan, menggunakan sikat baja atau dengan larutan penghilang kerak. Setelah pembersihan harus dipasivasi kembali dengan menggunakan 15-30% asam nitrat yang dapat menimbulkan lapisan pasif kembali. Pickling dan pasivasi harus segera dibersihkan dengan jalan mencuci dengan air dan seterusnya dikeringkan.

Pemilihan bahan baja tahan karat yang akan digunakan untuk keperluan pembuatan komponen atau konstruksi memerlukan pengetahuan tentang lingkungan atau kondisi di mana komponen yang dibuat akan dioperasikan. Beberapa sifat dari baja tahan karat dapat dilihat pada tabel 5 di bawah ini.

Tabel 5: Sifat dari beberapa jenis baja tahan karat.

Sifat	Baja Tahan Karat				
	Feritik	Martensitik	Austenitik	Duplek	Precipitation Hardening
Kekuatan	+	+++	-	++	+++
Kemampuan dibentuk	++	-	+++	++	+
Kemampuan dilas	-	-	++	++	-
<b>Ketahanan:</b>					
Keausan		++		+	++
Korosi Merata	+	-	++	++	+
Korosi Sumuran	+	-	++	++	+
Korosi Retak Tegang (klorida)	++	-	-	++	-

Catatan : + = sifatnya sangat bagus

- = sifatnya kurang

#### 4. Tembaga dan Paduannya.

Tembaga dan paduannya banyak digunakan dalam banyak situasi, karena sifat ketahanan korosinya dan dikombinasikan dengan sifat-sifat lain yang diinginkan seperti sifat konduktivitas panas dan listriknya, mudah dibentuk dan disambung, serta sifat-sifat mekanis lainnya. Tembaga dan paduannya adalah immune terhadap korosi dalam udara/atmosfir yang tidak terpolusi, air, dan asam bukan pengoksidasi, sebaik pada banyak larutan alkalin dan saline, serta bahan kimia organik.

Tembaga dan paduannya akan terkena serangan korosi pada asam pengoksidasi seperti asam nitrat, senyawa belerang. Di samping itu tembaga dan paduannya bisa terserang korosi erosi dan beberapa paduan logam akan menderita cukup parah oleh korosi retak tegang dengan adanya senyawa yang berbasis amonia. Kuningan (paduan tembaga dengan seng) akan terkena dezinsifikasi sehingga pemilihan logam paduan harus dilakukan secara hati-hati. Jenis, komposisi dan pemakaian dari tembaga dan paduannya dapat dilihat pada tabel 6 di bawah ini.

Tabel 6: Jenis, komposisi, dan penggunaan tembaga dan paduannya.

No	Nama Produk	Komposisi	Sifat dan Penggunaannya
1	Oxygen-free copper	>99,95 Cu	Konduktivitas listriknya paling tinggi
2	Tough pitch copper	99,9 Cu	Digunakan untuk keperluan kelistrikan dan panas
3	Deoxidizer copper	99,9 Cu & 0,02 P	Dapat dilas, untuk keperluan yang berkaitan dengan panas seperti radiator, ketel uap, dll
4	Cadmium copper	99 Cu & 1 Cd	Digunakan untuk kabel tilpun, kekuatannya meningkat.
5	Cap copper	97 Cu & 3 Zn	Sangat lunak dan ulet
6	Gilding brass	80-95 Cu & 5-20 Zn	Ulet, digunakan untuk dekorasi, dan peralatan jam.
7	Cartridge brass	70 Cu & 30 Zn	Cukup kuat dan ulet, untuk aplikasi deep drawing.
8	Common brass	65 Cu & 35 Zn	Keperluan umum, paduan untuk pengerjaan dingin.
9	Muntz metal (60/40)	60 Cu & 40 Zn	Paduan dengan pengerjaan panas, untuk pelat dirol panas
10	Leaded 60:40 brass	59 Cu, 37 Zn & 0,5 Pb	Pb meningkatkan sifat mampu mesin tetapi keuletannya rendah.
11	Naval brass	62 Cu, 37 Zn & 1 Sn	Sn meningkatkan ketahanan korosi, untuk bahan konstruksi dan tempa.

12	High tensile brass	58Cu+Al,Fe,Sn, rem. Zn	Sampai 7% Al, Fe,Sn dan Pb jika dikombinasikan akan meningkatkan kekuatannya digunakan untuk batang pompa, dan marine casting.
13	Aluminium brass	76 Cu, 22 Zn & 2 Al	Ketahanan korosi erosi sangat baik, digunakan untuk peralatan pendingin dan condensor.
14	Phosphor bronze	94 Cu, 5 Sn & 0,2 P  89 Cu, 10 Sn & 0,05-0,5 P	Sifat elastis dan ketahanan korosinya baik, digunakan untuk pegas, sudu turbin. Jika dituang dapat menghasilkan bahan yang keras dan tangguh, banyak digunakan untuk bearing.
15	Gun metal	88 Cu, 10 Sn & 2 Zn	Ketahanan korosinya baik, banyak digunakan sebagai peralatan pada lingkungan air laut seperti pompa, katup-katup, dll.
16	$\alpha$ -Aluminium bronze	95 Cu & 5 Al	Ketahanan korosi dan ketahanan oksidasinya baik, digunakan untuk keperluan dekorasi dan tabung.
17	Duplex Al bronze	80 Cu, 9 Al, 4 Ni & 4 Fe	Untuk komponen yang diperlukan aplikasi lingkungan laut dan kimia, seperti untuk roda gigi, katup-katup, dll
18	90/10 Copper nikel	90 Cu & 10 Ni	Ketahanan korosinya dan keuletannya baik.
19	70/30 Copper nikel	70 Cu & 30 Ni	Ketahanan korosinya tinggi, digunakan untuk peralatan pendingin dan condenser.
20	Nikel silver	60 Cu, 18 Ni & 22 Zn	Keuletannya baik dan banyak digunakan sebagai piring karenanya mendekati warna putih.

a. Tembaga dan paduan tembaga tinggi.

Jenis logam ini mempunyai ketahanan korosi yang sangat tinggi terhadap korosi atmosferik, heat and cold fresh water, air laut dan biofouling, tetapi rentan terhadap korosi erosi pada kecepatan aliran yang tinggi. Penggunaan tembaga dan paduan tembaga tinggi untuk komponen yang memerlukan konduktifitas panas dan listrik yang baik serta mudah dibentuk.

b. Kuningan

Kuningan merupakan logam paduan tembaga dan seng dan kuningan sangat luas penggunaannya karena kuningan mempunyai sifat mekanis yang lebih baik dari tembaga-murni. Kuningan tahan korosi erosi, tetapi ia

sangat rentan terhadap dezincifikasi. Serangan dezincifikasi dalam kuningan akan meningkat dengan meningkatnya temperatur operasi (pada temperatur tinggi), meningkatnya kandungan klorida pada lingkungan, laju aliran oksigen yang rendah, sehingga menimbulkan perbedaan aerasi. Penambahan 1% timah putih dan  $\pm 0,4\%$  arsenik, fosfor atau antimoni akan menghambat proses dezinsifikasi.

c. Kuningan-Aluminium (Aluminium Brass)

Jenis logam ini mengandung sedikit aluminium yang akan membentuk lapisan film tahan korosi yang mengandung oksida aluminium, di mana akan meningkatkan ketahanan korosi impingement. Kerentanan terhadap korosi retak tegang tergantung pada kandungan seng, dan ketahanan korosi retak tegang meningkat dengan menurunnya kandungan seng dari 15% menjadi 0%. Unsur-unsur seperti timah hitam, tellurium, kromium, fosfor dan mangan mungkin ditambahkan untuk meningkatkan sifat mekanik atau sifat mampu dikerjakan dengan mesin, tetapi tidak ada pengaruhnya terhadap ketahanan korosi.

d. Bronze

Bronze adalah logam paduan antara tembaga dengan timah putih, aluminium dan silikon. Sifatnya lebih keras dibandingkan dengan kuningan dan mempunyai ketahanan korosi pada air laut yang mengalir. Paduan yang mengandung 8-12% timah putih sedikit rentan terhadap korosi retak tegang dan mempunyai ketahanan yang sangat baik terhadap korosi impingement dan air yang mengandung asam. Silikon bronze adalah paduan tembaga silikon yang mempunyai ketahanan korosi yang sama dengan tembaga, tetapi ia mempunyai sifat mekanis yang lebih baik dan sangat baik untuk sifat mampu lasnya.

e. Aluminium Bronze

Aluminium bronze mempunyai ketahanan terhadap serangan korosi impingemen yang sangat baik dan oksidasi temperatur tinggi yang baik karena tumbuhnya film oksida, tetapi hal ini akan menurunkan laju pelarutan tembaga dan membuatnya kurang efektif daya tahannya terhadap



biofouling. Ada dua jenis aluminium-bronze yaitu alpha ( $\alpha$ ) aluminium bronze yang mengandung  $< 7,5\%$  aluminium dan duplek aluminium bronze yang mengandung aluminium  $> 8,5\%$ . Alpha ( $\alpha$ ) aluminium bronze lebih ulet (ductile), mudah dibentuk dan mempunyai ketahanan korosi yang baik, sementara duplek aluminium bronze lebih keras, dan lebih kuat, meskipun ketahanan korosinya kurang baik. Dalam lingkungan laut duplek aluminium bronze dipadukan dengan nikel dan besi untuk mencegah dealuminisasi dan memberikan kompleks aluminium bronze.

#### f. Paduan Tembaga Nikel

Logam ini banyak digunakan untuk pipa-pipa atau tabung kondenser dan tabung-tabung pada alat penukar panas yang mensirkulasikan uap dan pada industri kimia. Paduan ini paling tahan terhadap larutan asam, korosi retak tegang, korosi sumuran, dan korosi impingement dibandingkan logam paduan tembaga lainnya. Paduan Cu-30 Ni adalah yang paling tahan terhadap korosi aqueous dari semua jenis logam paduan tembaga, tetapi Cu-10 Ni sering dipilih karena pertimbangan biaya.

#### g. Paduan Nikel-Perak

Paduan ini tidak mengandung perak, tetapi merupakan paduan antara tembaga, nikel dan seng. Disebut paduan nikel-perak karena paduan ini penampakannya seperti warna perak. Paduan ini tahan terhadap korosi pada fresh water dan air laut, serta tahan terhadap dezinsifikasi

### 5. Nikel dan Paduan Nikel

Nikel dan paduan nikel mempunyai ketahanan korosi pada banyak lingkungan korosif, artinya ia mempunyai ketahanan korosi yang lebih baik dibandingkan logam paduan lain, tetapi harganya sangat mahal. Logam nikel dan paduannya dipilih jika alternatif logam lain dan logam paduan lainnya tidak dapat diperoleh (dengan memperhatikan sifat mekanis dan sifat ketahanan korosinya). Nikel mempunyai ketahanan korosi atmosfer sampai pada temperatur  $800^{\circ}\text{C}$  dalam lingkungan asam non pengoksidasi, dalam natural fresh water dan dalam soda abu panas dan dingin.

Paduan nikel dengan unsur seperti tembaga, krom dan besi akan meningkatkan ketahanan korosinya. Nikel dan paduannya immune terhadap korosi retak tegang kecuali dalam beberapa lingkungan seperti yang mengandung halida dalam batas prosentase tertentu dan pada temperatur tinggi. Nikel dan paduannya tidak tahan terhadap larutan pengoksidasi kuat seperti asam nitrat dan amonia dan logam ini akan terkena penggetasan oleh belerang-bearing gases pada temperatur tinggi (yang ditinggikan).

Jenis nikel dan paduannya (menurut INCO), komposisi dan penggunaannya dapat dilihat pada tabel 7 di bawah ini.

Tabel 7: Jenis nikel dan paduannya, komposisi dan penggunaannya.

No	Nama Produk (INCO)	Komposisi (%)	Sifat dan Penggunaannya
1	Nikel 200	99,5 Ni	Sifat mekanisnya baik, ketahanan korosinya sangat baik. Digunakan untuk pemrosesan makanan dan bahan kimia, dll
2	Monel 400	66Ni, 31Cu, 1Fe	Sifat mekanisnya baik, ketahanan korosinya sangat baik. Digunakan pada industri kimia, pompa, katup, dll.
3	Monel K-500	66Ni, 29Cu, 3Al, 1Fe	Pengerasan aging dilakukan untuk meningkatkan kekuatannya. Digunakan untuk baling-baling, poros, pegas, dan komponen katup.
4	Inconel 600	76Ni, 15Cr, 8Fe	Digunakan pada lingkungan korosif dan pada temperatur meningkat dukup tinggi., seperti komponen furnace, proses kimia, dan peralatan pada perlakuan panas.
5	Inconel 625	61Ni, 21Cr, 9Mo, 2,5Fe	Kekuatan, ketangguhan tinggi, ketahanan korosi dan oksidasi baik. Digunakan untuk reaktor nuklir, peralatan pengontrol polusi, dll.
6	Incoloy 800	32Ni, 46Fe, 21Cr	Ketahanan terhadap temperatur tinggi dan kekuatannya baik. Digunakan pada peralatan penukar panas.
7	Incoloy 825	42Ni, 30Fe, 21Cr, 3Mo	Tahan terhadap korosi sumuran, intergranular dan korosi retak tegang. Digunakan sebagai tangki pada industri kimia, tangki pickling, dan peralatan pengontrol polusi.

a. Nikel murni

Nikel murni digunakan sebagai komponen atau peralatan pada industri makanan dan kimia. Logam ini mempunyai sifat mekanis yang baik dan ketahanan korosinya sangat bagus pada banyak lingkungan korosif, oleh karenanya nikel murni banyak digunakan pada daerah yang atmosfernya mengandung awan belerang dan kelembabannya relatif tinggi, yang dapat merusak warna dari logam..

b. Paduan Nikel-Tembaga

Paduan nikel-tembaga ini mempunyai sifat ketahanan korosi yang lebih baik dibandingkan nikel murni, terutama terhadap serangan korosi sumuran. Paduan 70/30 (monel) tahan terhadap korosi sumuran dan pada lingkungan laut yang tenang (stagnant) dan menunjukkan perilaku yang baik pada air laut yang mengalir, kondisi aerated, sehingga logam monel ini banyak digunakan untuk katup dan komponen pompa yang mengalirkan air laut. Monel yang dipadu dengan 2-4% aluminium mampu untuk dikeraskan dan disebut dengan K-monel, sedangkan paduan monel untuk tuangan mengandung sampai 2% silisium.

c. Paduan Nikel-Krom

Paduan nikel-krom disebut dengan paduan "inconel" yang mengandung nikel, krom dan besi. Logam ini tahan terhadap serangan asam nitrat, ion-ion pengoksidasi, senyawa organik dan inorganik dan oksidasi temperatur tinggi. Logam inconel banyak digunakan untuk komponen industri makanan dan industri kimia serta komponen untuk peralatan perlakuan panas dan turbin uap. Dengan penambahan sejumlah kecil titanium dan aluminium akan meningkatkan kekuatan dan ketahanan pada temperatur tinggi, sementara dengan penambahan molibdenum akan meningkatkan ketahanan terhadap asam non pengoksidasi sebaik ketahanan terhadap korosi sumuran dan korosi celah.

e. Paduan Nikel-Besi-Krom (Incoloy)

Incoloy mengandung lebih dari 30% besi, di mana besi tidak menjadikan bahan tahan korosi, tetapi untuk menurunkan biaya. Sifat incoloy sama

dengan baja tahan karat austenitik, tetapi ia lebih tahan terhadap serangan klorida, korosi retak tegang dan oksidasi pada temperatur tinggi.

## 6. Aluminium dan Paduan Aluminium

Aluminium adalah logam ringan yang mempunyai ketahanan korosi atmosfer dan di banyak lingkungan aqueous serta mempunyai konduktivitas listrik dan panas yang baik. Aluminium termasuk logam reaktif, tetapi ia dapat membentuk film oksida aluminium yang dapat memproteksi serangan korosi. Film oksida yang terbentuk cukup stabil dalam larutan netral dan larutan asam dan dapat ditingkatkan ketebalannya dengan proses anodisasi. Aluminium murni lunak dan lemah (kurang kuat), tetapi bila dilaku panaskan dan dipadukan dengan logam lain untuk meningkatkan sifat mekanisnya. Permasalahannya pada proses penguatan aluminium biasanya akan menurunkan ketahanan korosinya. Untuk itu untuk keperluan pembuatan konstruksi/struktur dilakukan penutupan kembali dengan lapisan tipis aluminium murni (disebut dengan proses alclad). Beberapa paduan aluminium, komposisi dan penggunaannya ditunjukkan pada tabel 8 di bawah ini.

Tabel 8: Jenis paduan aluminium, komposisi dan penggunaannya.

No.	Kode Produk	Komposisi (%)	Sifat dan Penggunaannya
1	1200	99,0 Al	Secara komersial adalah murni, diguna-kan untuk sendok dan komponen yang dibuat dengan jalan ditarik, dan peralatan penukar kalor.
2	2024	93Al, 4, 3Cu, 1,5Mg, 0,6 Mn	Paduan dengan kekuatan yang tinggi, cocok untuk konstruksi pesawat terbang, ketahanan korosinya rendah.
3	3003	98Al, 1,3Mn, 0,6Si	Untuk konstruksi bangunan dan keperluan outdoor.
4	5083	94Al, 4,5Mg, 0,7Mn, 0,2Cr	Ketahanan korosinya dan kekuatan mekaniknya sangat bagus, dan banyak digunakan dilingkungan air laut.
5	5251	97Al, 2Mg, 0,3Mn	Kekuatan tinggi, ketahanan korosinya sangat baik, dapat dilas, banyak digunakan untuk boat kecil, kapal penangkap ikan, dll.
6	6063	99Al, 0,6Mg, 0,4Si	Kekuatannya medium, dan banyak digunakan pada bidang arsitektur.
7	7075	90Al, 5,6Zn, 2,5 Mg, 1,6 Cu	Kekerasan dan kekuatannya sangat tinggi, banyak digunakan pada konstruksi pesawat terbang, ketahanan korosinya jelek.

Ketahanan korosi untuk komposisi 1XXX adalah sangat tinggi, tetapi akan menurun ketahanan korosinya dengan meningkatnya unsur pepadu. Untuk seri 2XXX (paduan tuang) tembaga adalah unsur pepadu utama sehingga menjadikan logam ini kuat dan logam ini telah banyak digunakan sejak beberapa tahun lalu untuk pembuatan konstruksi pesawat terbang dan pesawat ruang angkasa, tetapi ia kurang ketahanan korosinya dibandingkan paduan lainnya. Cladding biasa dilakukan pada seri 2XXX ini, tetapi tidak digunakan untuk konstruksi yang digunakan dalam tanah, ditanamkan dalam air yang ditambah dengan proteksi. Seri 2XXX ini tahan terhadap korosi retak tegang. Logam paduan aluminium seri 3XXX (Al-Mn-dan Al-Mn-Mg) mempunyai ketahanan korosi yang tinggi dan paduan ini banyak digunakan untuk peralatan masak, proses pengolahan makanan pada industri makanan, dan peralatan kimia, dan produk arsitektur yang memerlukan perlindungan korosi.

Logam seri 4XXX mengandung silisium, tetapi pengaruhnya terhadap ketahanan korosinya sangat kecil. Seri 5XXX (Al-Mg-Mn; Al-Mg-Cr; Al-Mg-Mn-Cr) dan paduan tuangan seri 5XXX mempunyai ketahanan korosi yang tinggi, dan banyak digunakan untuk konstruksi bangunan dan peralatan pembawa untuk bahan pangan dan kimia serta peralatan lain yang selalu terekspose oleh lingkungan air laut. Paduan dengan kandungan >3% magnesium kemungkinan akan rentan terhadap korosi retak tegang.

Paduan seri 6XXX (Al-Mg-Si) mempunyai kekuatan yang cukup tinggi dan ketahanan korosinya yang sangat bagus. Penggunaan paduan ini banyak untuk keperluan struktur bangunan kapal dan permesinan.

Paduan seri 7XXX (Al-Zn-Mg) mempunyai ketahanan korosi yang baik, tetapi dengan penambahan tembaga akan menurunkan ketahanan korosinya meskipun tidak sejelek seri 2XXX.

Paduan aluminium yang diperkuat dengan komposit seperti silikon karbida, grafit atau boron akan meningkat kekuatannya dan modulus elastisitasnya, tetapi akan terjadi perilaku galvanik antara matrik aluminium dan

material penguatnya sehingga akan mempercepat laju korosi aluminium jika diekspose pada lingkungan atmosfer korosif.

Kebanyakan aluminium menderita cukup serius pada tahun pertama dan berangsur-angsur menurun seringan korosinya setelah terbentuk lapisan dipermukaannya (kecuali seri 2XXX). Hampir semua paduan aluminium (kecuali yang mengandung tembaga) menunjukkan ketahanan yang baik terhadap fresh water, tetapi akan terbentuk korosi sumuran dalam air laut yang terpolusi, khususnya yang mengandung ion-ion logam berat.

Beberapa paduan aluminium akan mengalami korosi retak tegang pada prose perlakuan panas khusus. Seri 2XXX dan 7XXX yang mengandung tembaga, magnesium, silisium dan seng mempunyai resiko pada daerah penampang lintang yang tebal yaitu terjadinya retak intergranular. Adanya klorida atau halida akan mempercepat terbentuknya retakan. Untuk menurunkan resiko terjadinya korosi retak tegang, maka pada paduan aluminium kekuatan tinggi adalah melakukan proses cladding dengan menggunakan aluminium murni.

## BAB IX

### PENGONTROLAN/PENGENDALIAN KOROSI

#### A. Pendahuluan

Pengontrolan/pengendalian korosi merupakan hal yang sangat penting agar komponen atau struktur yang direncanakan dan dibuat dapat tahan pada umur tertentu sesuai dengan yang direncanakan. Berbagai hal tentang permasalahan korosi terhadap logam telah dibicarakan pada bab-bab terdahulu, maka dalam bab ini akan dibahas masalah pengendalian dimulai dari perencanaan dan bagaimana melakukan perlindungan korosi dengan memberikan proteksi terhadap struktur atau benda supaya tidak terkorosi atau menjaga agar laju korosinya serendah mungkin.

Tujuan pengajaran ini ialah agar mahasiswa mampu:

1. Merencanakan suatu konstruksi yang dipasang pada lingkungan tertentu, sehingga umur konstruksi tersebut dapat tahan sesuai dengan umur perencanaan.
2. Menghitung kebutuhan anoda korban dan arus listrik untuk pengendalian atau untuk proteksi korosi dengan metoda anoda korban dan arus paksa atau impressed current.
3. Mampu memasang sistem pengendalian korosi dengan metoda proteksi anodik.

#### B. Pengontrolan/Pengendalian Korosi.

##### 1. Pengendalian Korosi dengan Memperbaiki Perencanaan

Metoda paling murah dan efektif dalam pengendalian korosi adalah pada tahap perencanaan. Dalam perencanaan faktor-faktor fabrikasi, kekuatan material dan permasalahan korosi dibahas secara mendalam dan dihitung secara cermat, agar struktur yang dibuat sesuai dengan spesifikasi yang telah ditetapkan. Faktor pencegahan korosi harus dimulai dari tahap perencanaan. Pemilihan bahan, metoda proteksi terhadap korosi akan tergantung pada kebutuhan dasar dari komponen, seperti:

- a. Lingkungan apa kompinen yang dibuat akan dioperasikan.
- b. Jenis lingkungan korosif apa yang paling berbahaya dilingkungan tersebut.
- c. Berapa lama umur konstruksi diharapkan.
- d. Apakah konstruksi tersebut mempunyai akses untuk perawatan dan pencegahan.
- e. Bagaimana kondisi operasinya (temperatur, tekanan, aliran, dan lainnya). Apakah kondisi tersebut secara signifikan berubah selama tidak operasi, pembersihan, dan lainnya.
- f. Jenis korosi apa yang diharapkan. Apakah ada resiko terjadi SCC, hydrogen embrittlement atau korosi fatik.
- g. Apakah ada resiko tercemarnya produk akibat terjadinya korosi atau karena adanya produk korosi. Sampai batas mana pencemaran tersebut dapat ditoleransi.

Dalam perencanaan suatu konstruksi maka diperlukan adanya penambahan ukuran (allowance) yang disediakan untuk korosi, sehingga umur konstruksi dapat diharapkan dapat bertahan sesuai dengan perencanaan.

#### a. Umur Konstruksi dan Keionggaran (Allowance) untuk Korosi

Adalah tidak ekonomis jika beberapa komponen suatu instalasi pabrik mempunyai umur yang panjang dibandingkan umur pabrik itu sendiri. Contoh sebuah saluran buang (knalpot) sebuah kendaraan dibuat dari baja tahan karat, sehingga knalpot tersebut belum rusak sampai kendaraannya sendiri telah hancur. Hal ini ditinjau dari segi ekonomis adalah tidak efektif.

Selama korosi menembus suatu logam maka perlu memberikan allowance sehingga dalam perencanaan sudah harus diperhitungkan. Contoh untuk suatu pipa yang ditanam dalam tanah diperhitungkan untuk umur 10 tahun dan dari perhitungan diperoleh bahwa laju korosinya 0,1 mm per tahun, maka ketebalan pipa yang harus digunakan adalah 2 mm, supaya pipa tersebut tahan selama 10 tahun. Kelebihan tebal tersebut digunakan sebagai allowance terhadap penetrasi korosi. Untuk itu dalam



perencanaan sudah harus diketahui lingkungan dimana pipa akan dipasang, jenis fluida yang akan dialirkan, kecepatan aliran dan laju korosinya dan fabrikasinya.

b. Pentingnya Bentuk Komponen

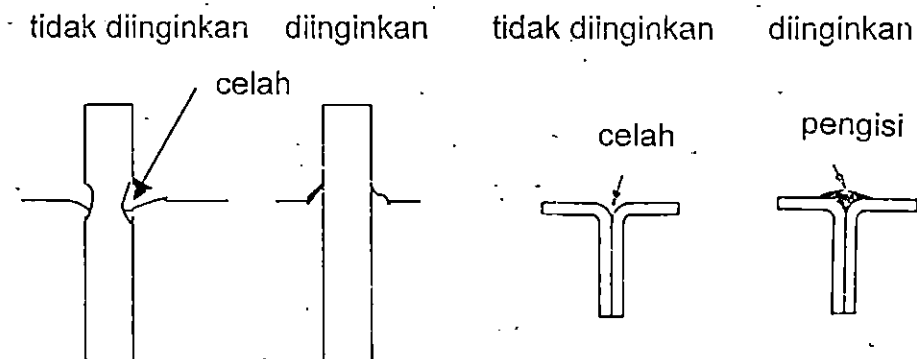
Bentuk atau geometris dari struktur memberikan pengaruh terhadap jenis koros. yang akan terjadi seperti korosi celah, korosi erosi dan lainnya. Berapa hal penting yang mesti dipertimbangkan pada masalah bentuk yaitu:

1) Bentuk harus sederhana

Seperti untuk tabung-tabung, bentuknya harus mudah diproteksi. Bentuk yang mempunyai banyak sudut, tepi atau pinggiran dan internal surface akan memperbesar daerah yang kontak dengan lingkungan korosif, sehingga laju korosi menjadi besar, dan terjadi korosi celah, yang menjadi sulit untuk penanggulangannya seperti penggunaan coating.

2) Mencegah terbentuknya celah

Adanya celah pada suatu konstruksi sehingga terjadi akumulasi cairan yang menggenang, atau kotoran dan mungkin akan mempercepat korosi akibat perbedaan kandungan oksigen (aerasi), juga sulit untuk melakukan coating pada daerah celah tersebut. Untuk itu jika tidak mungkin menghindari terjadinya celah, maka celah tersebut harus ditutup dengan las misalnya, seperti yang ditunjukkan pada gambar di bawah ini.



Gb.9.1. Cara pencegahan korosi dengan mencegah adanya celah

### 3) Mencegah tersisnya larutan atau uap air.

Korosi tidak akan terjadi tanpa adanya moisture (uap air). Oleh karena itu struktur yang akan dibuat harus dirancang sedemikian rupa sehingga tidak ada larutan yang tersisa/tinggal. Profilprofil harus dirancang agar uap condensat dapat dialirkan keluar seperti ditunjukkan pada gambar di bawah ini.

Struktur yang tidak diharapkan



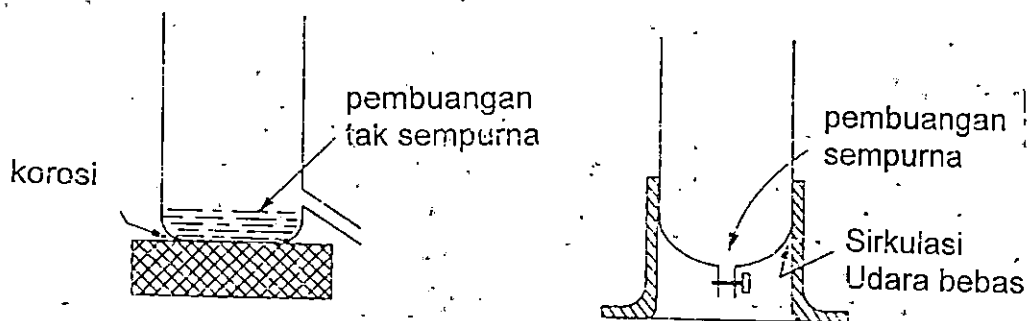
tumpukan cairan/moisture

(a)

struktur yang diinginkan



lobang pembuangan



(b)

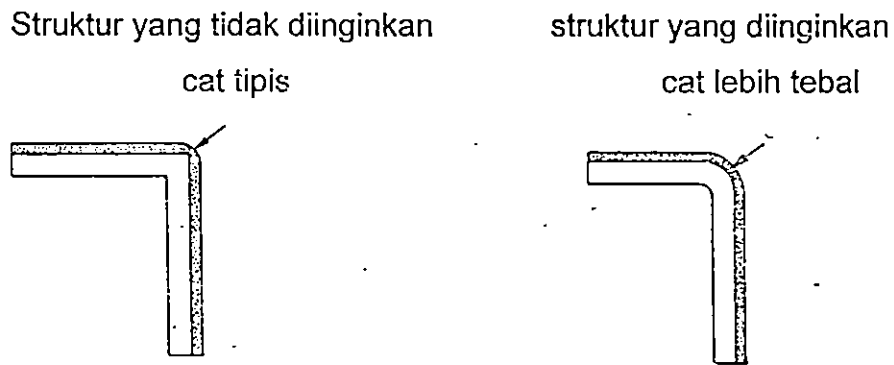
Gb.9.2. Rancangan struktur untuk mencegah penumpukan uap air

Pada struktur yang tertutup, ventilasi adalah sangat penting. Untuk bak penampungan harus ditempatkan di atas tanah agar dapat dilakukan pengeringan dan moisture tidak dapat terkumpul dibagian bawah seperti digambarkan di atas. Lebih lanjut untuk struktur tertentu

harus dapat dicat secara sempurna dan mudah untuk pemeliharannya. Untuk atap harus mempunyai kemiringan (slop) tertentu untuk mengalirkan air secara sempurna. Isolasi panas kadangkala diperlukan untuk mengatasi kondensasi.

4) Mencegah adanya sudut yang tajam.

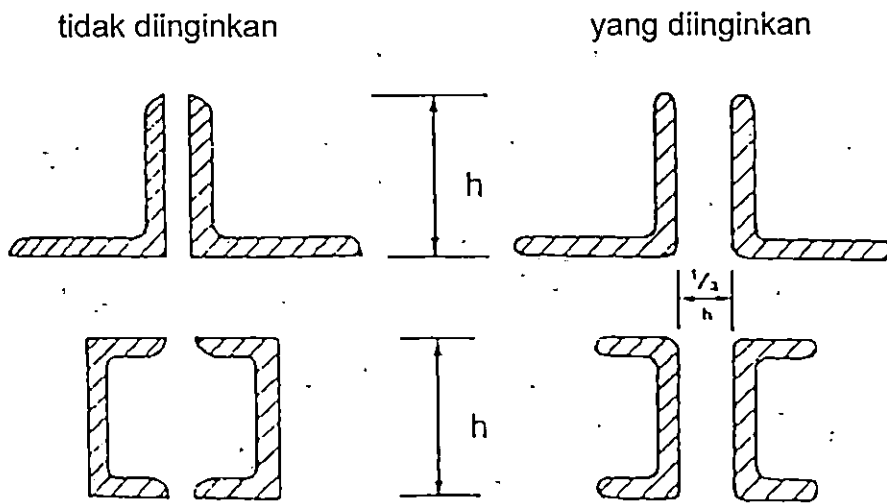
Sudut yang tajam menghasilkan lapisan cat yang tipis (tidak merata), untuk itu sebaiknya dicegah pembuatan struktur dengan sudut yang tajam. Jika struktur tersebut akan dilapisi (cat misalnya) lebih lanjut sebaiknya dibuat bentuk radius sehingga mudah untuk dibersihkan dan lapisan coatingnya bisa tebal dan lebih merata.



Gb.9.3. Sudut yang tajam sehingga lapisan cat tipis

5) Mempertimbangkan akses dan dapat di cat

Coating, pemeriksaan dan perawatan diperlukan untuk semua komponen pada konstruksi. Jeleknya akses untuk dapat melakukan coating, pemeriksaan dan perawatan menyebabkan timbulnya korosi pada bagianbagian yang tidak terlapsi. Sebagai pedoman jarak antara dua item harus  $1/3$  dari tinggi item tersebut, dengan minimum 45 mm seperti yang ditunjukkan pada gambar di bawah ini.



Gb.9.4. Rancangan struktur yang dapat di cat/coating

### c. Kompatibilitas Bahan

Logam mungkin tidak kompatibel satu dengan lainnya, juga dengan lingkungannya, sehingga jika digabungkan akan mengakibatkan terjadinya korosi galvanik.

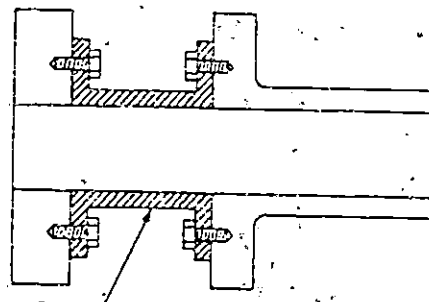
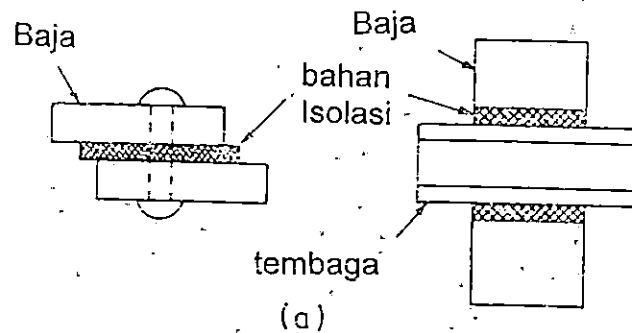
#### 1) Mencegah terjadinya korosi galvanik

Logam atau paduan logam yang berbeda harus tidak berhubungan secara kelistrikan jika pada daerah tersebut terdapat uap air, khususnya jika logam-logam tersebut mempunyai perbedaan potensial yang sangat jauh. Daerah relatif dari dua logam yang berhubungan secara kelistrikan akan mempengaruhi laju korosi dan utamnya korosi galvanik. Korosi galvanik akan lebih serius jika logam yang lebih anodik mempunyai luas yang lebih besar dari luas daerah katodik. Jika tidak mungkin atau dapat dihindarkan untuk menggabungkan dua logam tersebut, maka langkah-langkah berikut dapat dilakukan untuk meminimumkan kerusakan.

##### (a) Usahakan daerah anoda sebesar mungkin

Gunakan bahan isolator listrik diantara kedua logam. Yakinkan bahan isolator tidak berpori atau kemungkinan terjadinya korosi celah. Penggunaan lem/perekat untuk penggabungan dua logam adalah sangat membantu dalam meminimumkan kerusakan.

- (b) Pemakaian isolator hendaknya dilakukan secara menyeluruh, sebab jika hanya sebagian yang diisolasi malahan akan menjadikan kerusakan makin parah dibandingkan tanpa menggunakan isolator.
- (c) Menggunakan logam yang mudah terkorosi dan mudah menggangunya yang dapat memproteksi logam pasangannya.
- (d) Menggunakan proteksi katodik dengan sistem anoda korban atau dengan sistem arus yang dipaksakan (impressed current).
- (e) Menggunakan cat (coating), baik dengan pengecatan secara keseluruhan atau hanya pada bagianbagian logam yang noble.



Dapat ditukar

Gb.9. 5. Penggunaan bahan isolasi untuk penggabungan dalam rangka pencegahan korosi galvanik

## 2) Mempertimbangkan lingkungan

Perancang akan selalu mempertimbangkan faktor lingkungan di mana struktur akan dipasang dan akan selalu menggunakan bahan yang

sesuai dengan lingkungan tersebut atau menggunakan metoda pencegahan korosi yang sesuai.

3) Logam yang sangat aktif tidak digunakan bersama dengan logam yang lebih noble. Contoh sejumlah kecil garam tembaga yang timbul dari korosi tembaga dalam air di mana secara serius mengkorosi aluminium dan paduannya serta seng.

4) Mempertimbangkan bahan lain

Harus diperhatikan dengan baik jika logam berhubungan dengan plastik, kayu, beton dan lainnya. Material organik seperti kayu, plastik, cat mungkin memberikan vaporasi yang agresif, di mana dapat menginisiasi dan berkontribusi terhadap kerusakan akibat korosi pada daerah yang dekat dengan permukaan. Plastik umumnya tidak liable untuk terlibat dalam korosi akibat vaporisasi dan tidak berbahaya jika kontak dengan logam.

#### d. Faktor Mekanik

Jika tegangan mekanik terlibat, dan lingkungannya korosif maka akan terjadi korosif yang sangat merusak, seperti korosi retak tegang (SCC), korosi fatik, dan fretting orrosion. Korosikorosi tersebut terjadi karena adanya faktor tegangan. Aiiiran fluida akan meningkatkan laju korosi atau dapat menghasilkan korosi erosi atau korosi kavitasi.

1). Mencegah adanya /timbulnya tegangan mekanik

Tegangan baik tegangan aplikasi atau tegangan sisa, tegangan statik atau tegangan bolak-balik harus tetap dijaga pada keadaan minimum guna mencegah kemungkinan terjadinya stress corrosion cracking. Untuk mencegah naiknya tegangan, maka bentuk dengan ujung-ujung yang tajam, banyaknya alur pasak, ulir, dil, adanya komponen dengan pendukung yang kurang baik dan jeleknya perakitan akan menyebabkan terjadinya tegangan, yang dapat mengakibatkan terjadinya korosi fretting, fatik, dan scc. Proses fabrikasi yang baik, prosedur pengoperasian dan permukaan benda kerja yang halus akan membantu menurunkan tegangan.

- 2) Mencegah kombinasi logam dan lingkungan yang dikenal dengan kegagalan SCC.

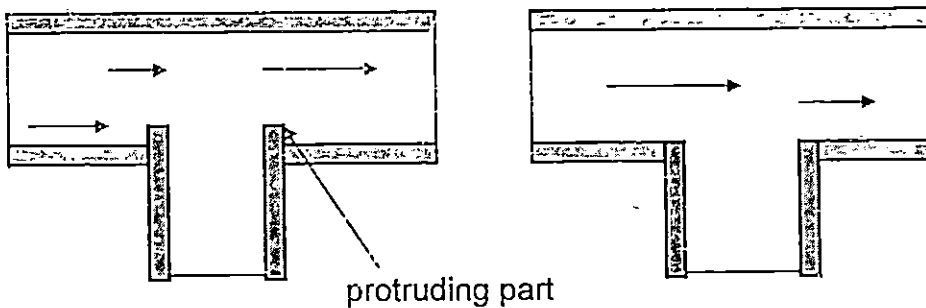
Logam yang berbeda dengan lingkungan yang berbeda akan dapat menyebabkan terjadinya korosi retak tegang. Baja tahan karat austenitik dalam lingkungan yang mengandung klor, paduan tembaga dalam lingkungan amonia atau amine dan baja dalam lingkungan caustic akan sangat menderita korosi.

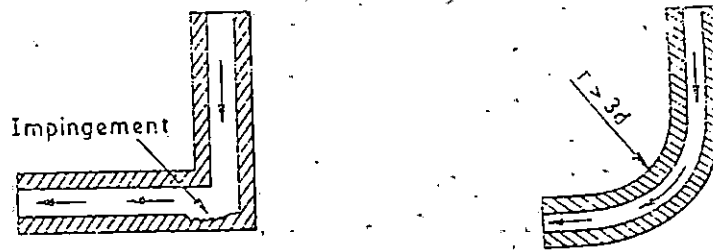
- 3) Aliran fluida

Adanya disturbance aliran seperti yang terjadi adanya bagian komponen yang menonjol (kesalahan konstruksi/lihat gambar), jeleknya pemasangan gasket, adanya permukaan yang kasar atau pengelasan dipermukaan dapat menyebabkan terjadinya turbolensi yang menghasilkan korosi erosi atau korosi kavitasi. Tikungan atau bengkokan yang tajam dan daerah yang lain di mana arah aliran cairan bertukar secara cepat sedapat mungkin dihindarkan. Profil dirancang untuk dapat mengalirkan cairan secara halus (smooth). Pada keadaan ini korosi fatik juga dapat terjadi akibat getaran pada tangki atau pipa yang dipasang berdekatan dengan mesin pompa. Untuk itu diperlukan klem penjepit pipa atau struktur dengan baik agar tidak bergetar.

struktur tidak diinginkan

struktur yang diinginkan





Gb.9.6. Konstruksi tanpa protruding section pada pipa, dan pembengkokan yang tajam

e. Temperatur Tinggi.

Temperatur yang tinggi dapat mempercepat laju korosi, meskipun dengan naiknya temperatur juga dapat memberikan keuntungan apabila kondisinya kering. Jika temperaturnya terlalu tinggi pada material akan terbentuk kerak. Masalah lain yang timbul karena temperatur tinggi adalah adanya kondensasi pada waktu gas menjadi dingin. Untuk menghindarkan terjadinya korosi pada temperatur tinggi, perlu dihindarkan beberapa keadaan, yaitu:

1) Cegah terjadinya pemanasan setempat (hot spot)

Peralatan penukar panas (heat exchanger) dan penukar panas lainnya harus dirancang agar gradient temperaturnya merata. Distribusi temperatur harus merata disemua tempat. Jika pada suatu tempat terjadi pemanasan berlebihan, maka laju korosi pada tempat tersebut meningkat, dan dengan adanya tegangan pada tempat tersebut maka akan menimbulkan stress corrosion cracking. Tambahan lagi dengan terbentuknya kerak, maka efisiensi perpindahan panasnya menjadi menurun.

2) Cegah adanya kondensasi

Uap air kondensasi jika berhubungan dengan gas panas dan dengan permukaan logam yang dingin merupakan masalah korosi yang besar, karena uap air tersebut bukan berupa air murni, tetapi lebih banyak



berupa uap larutan agresif seperti mengandung belerang dan asam belerang. Uap air tersebut mempunyai dew point yang lebih tinggi dibandingkan dengan air dan kondensat pada temperatur tinggi. Faktor untuk meminimalkan moisture sisa, maka bentuk peralatan harus dibuat supaya tidak ada kondensat yang tersisa.

3) Harus hati-hati terhadap permasalahan dengan penyekat.

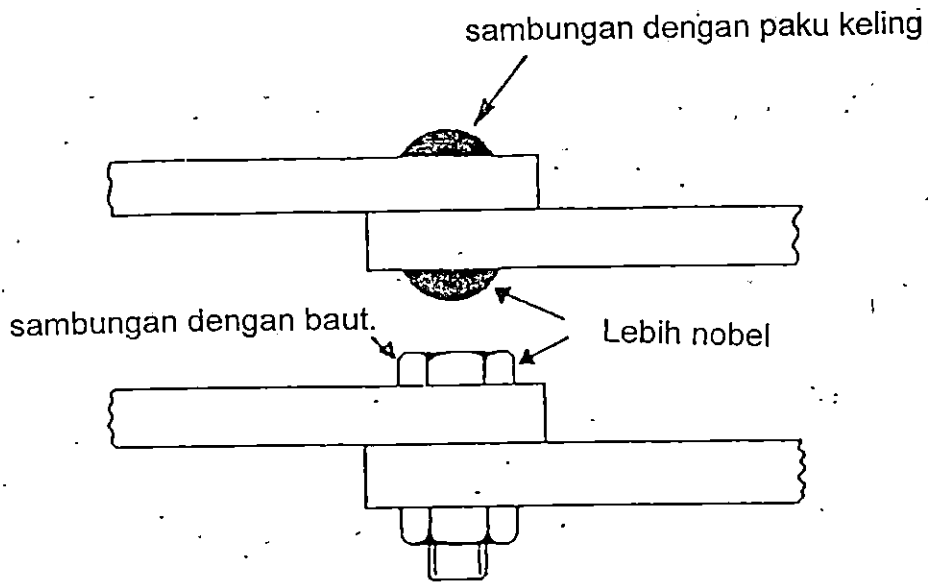
Banyak material penyekat panas mengandung garam terlarut, biasanya klorida dan sulfat. Uap air (kondensat) akan melarutkan garam dan mungkin garam-garam tersebut akan terdepositkan pada dinding dari objek yang diisolasi, yang mungkin akan menjadikan serangan yang cepat, meskipun pada baja tahan karat. Bahan absoban air harus dikurangi dari daerah yang mempunyai kelembaban yang tinggi, atau pada permukaan bagian luar harus diisolasi secara penuh untuk mencegah meresapnya air. Seng merupakan logam yang terkorosi oleh air pada temperatur sekitar  $60^{\circ}\text{C}$ , untuk itu galvanizing, atau cat yang kaya seng, atau coating dari bahan seng harus tidak digunakan di mana uap air akan terkondensasi pada temperatur tersebut.

f. Pengaruh Proses Pembuatan (Fabrikasi)

Berbagai jenis proses pengerjaan dalam fabrikasi suatu konstruksi/ struktur akan mempengaruhi sifat korosi dari struktur/konstruksi tersebut. Aktivitas tertentu seperti pemesinan, pemotongan, stamping, drilling (pengeboran) dan perlakuan panas akan mempunyai pengaruh meskipun kecil terhadap perilaku korosi. Tetapi pada proses penyambungan mempunyai pengaruh yang cukup signifikan terhadap ketahanan korosi dari konstruksi/struktur.

1) Pengikat/penyambung (Fastener) harus lebih nobel dari pada logam yang disambungannya.

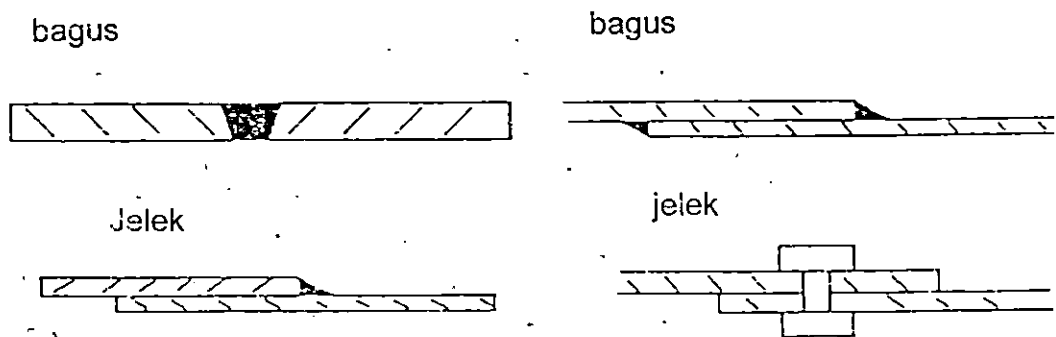
Pada penyambungan jenis ini kombinasi penyambungan yang disukai adalah daerah katodiknya lebih kecil dan daerah anodik lebih besar sehingga terjadi proteksi katodik pada penyambungan tersebut, seperti ditunjukkan pada gambar di bawah ini.



Gb. 9.7. Bahan yang lebih noble digunakan dalam penyambungan

## 2) Penggunaan las

Pada penyambungan dengan baut atau paku keling harus selalu diatur supaya bersih dan harus lurus. Penyambungan dengan pengelasan oleh karenanya lebih disukai dibandingkan penyambungan dengan paku keling atau baut, karena hasilnya lebih baik dan tidak terbentuk celah pada sambungan, seperti ditunjukkan pada gambar di bawah.



Gb. 9.8. Contoh metoda penyambungan

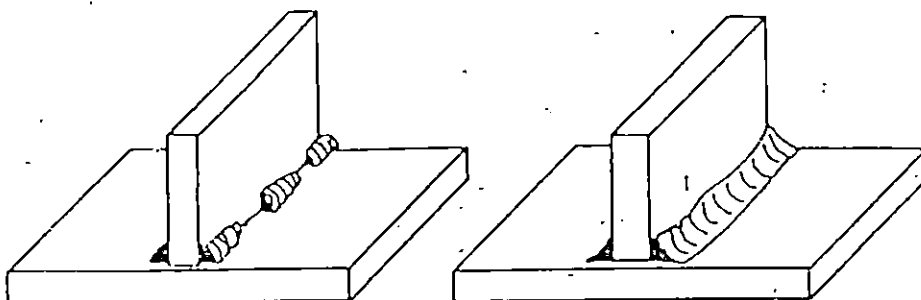
## 3) Penyambungan dengan las harus memenuhi standar dan tidak ada celah

Pengelasan dengan hasil lasan yang halus tanpa adanya lobang atau celah, serta mudah dicoating adalah penyambungan yang diinginkan.

Lasan harus bersih dan bebas dari terak dan spatter. Pengelasan yang kontinyu adalah lebih mahal dibandingkan dengan las-lasan yang terputus-putus tetapi hasilnya adalah lebih baik seperti diperlihatkan pada gambar di bawah ini.

tidak diinginkan

diinginkan



Gb.9.9. Pengelasan kontinyu lebih baik.

4) Logam las harus lebih katodik terhadap logam dasar

Untuk alasan mekanik dan metalurgi, logam pengisi pada pengelasan secara normal adalah lebih katodik dibandingkan dengan logam yang dilas (base metal), sehingga diperoleh daerah katoda yang lebih kecil diban-dingkan dengan daerah anoda (sambungan dengan katoda kecil dan anoda yang lebih besar). Masalah dalam penyambungan dengan pengelasan adalah galvanik, dan adanya tegangan akibat pengelasan juga akan berpengaruh terhadap sifat korosi.

5) Penyambungan dengan patri (solder) mempunyai beberapa masalah yang berhubungan dengan korosi.

Patri/solder biasanya adalah lebih noble dibandingkan dengan base metal, jadi penyambungan dengan solder mempunyai daerah katodik yang kecil dan daerah anodik yang besar. Solder mempunyai sifat mudah mengalir, sehingga celah dalam sambungan dapat terisi dengan baik/sepurna. Meskipun demikian bahan pembantu dalam penyolderan/pematrian adalah korosif, maka dianjurkan segera setelah selesai penyolderan sebaiknya bahan tersebut dihilangkan.

- 6) Sambungan dengan Ulir, Paku Keling mempunyai masalah pada potensialnya.

Sambungan-sambungan tertentu akan mempunyai celah dan sambungan tersebut biasanya dalam pembuatannya cukup susah dan akan cepat terkorosi dibandingkan logam disekelilingnya. Mur dan baut harus digalvanizing atau dilapisi/lindungi dengan logam lain. Untuk konstruksi yang akan dibuka kembali, harus diberi grease pelindung korosi.

- g. Penyambungan dengan lem mempunyai masalah terhadap korosi

Penyambungan dengan lem adalah memberikan keuntungan karena secara otomatis juga memberikan isolasi kelistrikan pada sambungan, artinya tidak termasuk korosi galvanik. Permasalahannya adalah sambungan dengan lem ini mempunyai keterbatasan penggunaan pada lingkungan korosif.

### C. Pengendalian Korosi dengan Lapis Lindung Organik (Cat)

#### 1. Pendahuluan

Cat merupakan bahan lapis lindung organik yang paling banyak digunakan untuk memproteksi korosi atau sebagai bahan anti korosi pada logam, karena penggunaannya yang mudah, harganya murah, dan mempunyai sifat proteksi yang cukup baik, serta memberikan warna dekoratif yang sangat baik. Jenis cat sangat bervariasi atau banyak sehingga mempunyai sifat-sifat yang bervariasi atau berbeda-beda dan dengan demikian dalam pemakaiannya juga berbeda baik cara pemakaiannya dan peruntukannya.

Tujuan pembelajaran atau materi lapis lindung organik ini adalah:

- a. Menjelaskan pentingnya persiapan permukaan dan metoda yang sesuai dalam melaksanakan persiapan permukaan.
- b. Menguji berbagai jenis cat dan komponennya.
- c. Menjelaskan bagaimana cat memberikan perlindungan terhadap korosi.
- d. Memberikan beberapa arahan tentang bagaimana menentukan sistem pengecatan yang paling baik untuk suatu komponen.
- e. Melihat pada sifat yang diperlukan dari lapis lindung organik.

- f. Menjelaskan tentang bahan utama untuk lapis lindung organik pada jaringan pipa.
- g. Menjelaskan secara rinci cara atau teknik pemeriksaan terhadap hasil pengecatan (penggunaan lapis lindung organik).

## 2. Persiapan Permukaan

Persiapan permukaan pada komponen yang akan diberi lapis lindung cat adalah langkah awal yang sangat menentukan dalam proses pengecatan (pemberian lapis lindung). Tujuan utama persiapan permukaan adalah untuk menghilangkan seluruh bahan pengotor dari permukaan yang mungkin dapat mencegah kerekatan atau adhesi lapis lindung (cat) atau dapat menyebabkan cat dapat retak atau pecah setelah proses pengecatan selesai. Lebih lanjut persiapan sering dibutuhkan untuk memperoleh permukaan yang kasar atau permukaan dengan bentuk profil tertentu sehingga lapis lindung dapat merekat secara kuat pada permukaan. Oleh karenanya pembersihan atau persiapan permukaan untuk bahan baja misalnya tidak hanya untuk menghilangkan bahan pengotor, tetapi juga untuk menghilangkan karat, kerak logam, dan bahan pengotor seperti grease, lemak atau minyak, tetapi diharapkan dengan persiapan permukaan ini dapat dihilangkan semua cacat permukaan pada baja. Guna memperoleh umur maksimum pada setiap pemakaian lapis lindung, tidak hanya semua kerak logam, karat, dan bahan pengotor yang harus dihilangkan tetapi semua cacat-cacat permukaan yang akan dapat menembus/merusak bahan lapis lindung dan cacat-cacat yang tidak dapat diisi dengan bahan lapis lindung harus dihilangkan.

Pelaksanaan persiapan permukaan dapat menggunakan pembersih udara bertekanan sehingga cacat-cacat permukaan akan nampak, dan jika cacat tersebut tidak dapat dihilangkan maka dapat digunakan peralatan gerinda dan peralatan pembersih lainnya. Untuk menghilangkan kotoran minyak, grease, dan lemak dapat dilakukan dengan jalan degreasing, sedangkan karat, kerak logam dapat dihilangkan dengan menggunakan udara bertekanan yang mengandung bahan abrasif.

### 3. Peralatan Khusus untuk Pembersihan Permukaan

#### a. Power Tool

Dengan peralatan pembersih, maka waktu untuk pembersihan menjadi lebih pendek dibandingkan dilakukan secara manual, sehingga efisiensi bisa tinggi. Needle gun adalah peralatan yang dapat digunakan untuk membersihkan permukaan logam yang akan diberi lapis lindung. Peralatan ini terdiri dari sejumlah batang dari bahan baja yang dikeraskan yang digetarkan. Getaran dari ujung-ujung batang baja tersebut diarahkan pada permukaan benda yang akan dikerjakan. Dengan adanya tumbukan antara batang-batang baja yang bergetar dengan permukaan logam, maka kerak logam dan karat yang menem-pel dipermukaan logam akan terlepas.

Penggunaan peralatan ini sebenarnya kurang baik, karena pada permukaan logam akan timbul bekas seperti terbakar, yang dapat mengurangi kerekatan cat (bahan lapis lindung organik). Kelemahan needle gun ini ialah kotoran atau karat yang ada didalam sumuran tidak dapat dibuang, tetapi peralatan ini sangat efektif untuk pembuangan kotoran pada alur ulir pada baut. Peralatan lain yang termasuk dalam kelas power tool ini antara lain; linishers, gerinda sudut, dan sanders.

#### b. Pembersih Udara Bertekanan

Pembersih ini memanfaatkan udara bertekanan yang mengandung bahan abrasif. Kegunaan abrasif disini adalah untuk membuang karat, kerak logam atau bahan pengotor yang terdapat dipermukaan logam. Dengan peralatan ini akan diperoleh kekasaran permukaan tertentu yang diperlukan. Kekasaran permukaan ini terbentuk akibat hantaman partikel-partikel kecil bahan abrasif yang ditembakkan oleh udara bertekanan tinggi.

Derajat kekasaran permukaan dan laju pembersihan tergantung utamanya pada sifat bahan abrasif yang digunakan. Ada banyak bahan abrasif yang dapat digunakan dalam pembersihan ini, tergantung dari

pertimbangan kekerasan, biaya, profil permukaan yang diinginkan, dan faktor keselamatan.

#### 1) Pasir

Pasir merupakan bahan abrasif yang banyak digunakan mengingat pasir adalah mudah didapat dan murah harganya. Kekurangan dari bahan abrasif ini ialah tidak dapat diperoleh profil kekasaran permukaan yang bagus atau sesuai untuk aplikasi lapis lindung (cat). Di samping itu pemakaian pasir dapat mengakibatkan silikosis, sehingga dianjurkan penggunaan pasir hanya untuk pekerjaan pada daerah yang terbuka.

#### 2) Butiran Besi dan Baja

Bahan abrasif dari butiran besi dan baja banyak digunakan, karena tersedianya berbagai ukuran dan mempunyai kekerasan dari yang paling lunak sampai yang paling keras. Bahan abrasif ini sangat baik untuk persiapan permukaan karena mempunyai densitas yang tinggi sehingga memberikan energi yang cukup dan laju pecahnya lambat serta mempunyai sisi potong yang tajam.

#### 3) Pecahan Terak

Pecahan terak dapat digunakan sebagai bahan abrasif untuk persiapan permukaan. Pecahan terak yang umum dipakai adalah pecahan terak tembaga dan seng, karena murah. Bahan abrasif ini banyak digunakan untuk pembersihan karena menghasilkan kekasaran permukaan yang baik untuk hampir semua aplikasi lapis lindung.

#### 4) Butiran Keramik

Bahan abrasif jenis ini relatif mahal, tetapi dengan pertimbangan tertentu seperti profil kekasaran permukaan yang diharapkan, maka bahan ini makin banyak digunakan. Bahan ini cukup tajam sehingga efektif untuk permukaan benda kerja yang keras, di mana tidak mungkin dapat dibersihkan dengan menggunakan bahan abrasif lain. Bahan abrasif ini banyak digunakan untuk permukaan logam yang tipis, baja tahan karat dan logam-logam non fero.

5) Peluru Baja.

Bahan ini berbentuk bulat dan sering disebut dengan bahan abrasif peluru, dan biasanya terbuat dari baja. Dalam penggunaannya sering disebut dengan "shot blasting". Penggunaan peluru baja untuk persiapan permukaan saat ini sudah mulai berkurang karena hasil kekasaran permukaan kurang sesuai untuk aplikasi lapis lindung, tetapi dengan peluru baja ini sangat baik untuk menghilangkan kerak logam. Penggunaan shot blasting ini sering juga dipadukan dengan bahan abrasif lain dengan butiran yang halus, sehingga diperoleh profil kekasaran permukaan yang sesuai dengan aplikasi lapis lindung.

6) Bahan abrasif yang lain

Bahan abrasif lain yang juga sering digunakan dalam persiapan permukaan antara lain ilmenite, batu kapur, dan bahan plastik. Penggunaannya adalah untuk keperluan khusus.

c. Pickling

Kerak logam dan karat dapat dihilangkan dengan merendam atau membenamkan baja dalam larutan asam hidroklor (HCl) atau asam belerang ( $H_2SO_4$ ). Baja kemudian diberikan inhibitor dengan cara membenamkannya dalam asam phosphor lunak dan kemudian dikeringkan (primed). Proses ini tidak memberikan profil kekasaran permukaan dan oleh karenanya tidak sesuai untuk pengecatan dengan unjuk kerja yang tinggi.

Pembersihan secara manual adalah lambat dan kurang memuaskan untuk persiapan permukaan. Cara pembersihan ini ialah dengan menggunakan palu terak dan kertas pasir dan yang paling banyak ialah dengan menggunakan sikat baja. Pembersihan dengan menggunakan sikat baja masih lambat dan tidak ekonomis dan memerlukan banyak tenaga yang hasilnya jauh dari memuaskan. Adalah sangat mustahil untuk menghilangkan semua karat dan kerak logam dengan cara tersebut.

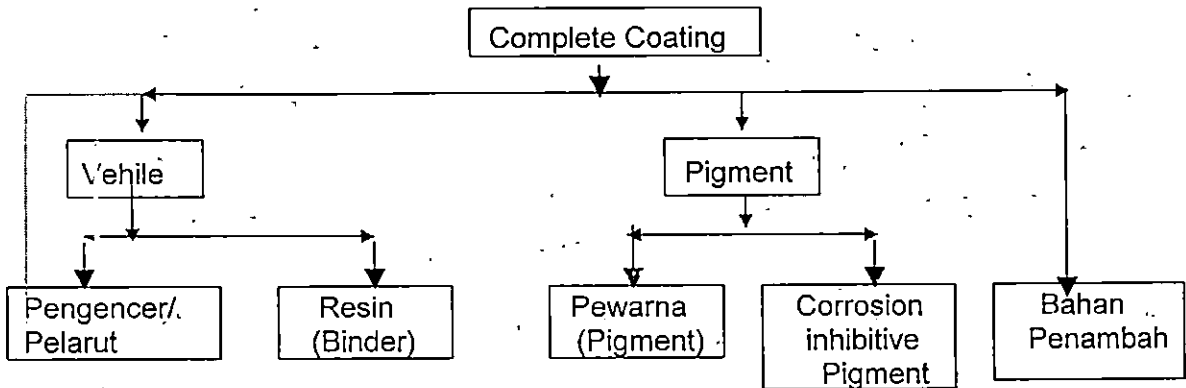


#### 4. Lapis Lindung Cair untuk Lingkungan Atmosfir

Pada dasarnya cat terdiri dari suspensi cairan yang mengandung butiran yang sangat halus dan jika digunakan pada permukaan kemudian akan mengering dan menempel yang berbentuk seperti film yang koheren. Hampir semua cat mengandung paling tidak dua komponen yaitu pigment dan "vehicle". Biasanya juga diberikan bahan tambah untuk menghasilkan mendapatkan fungsi khusus seperti mempercepat pengeringan, mencegah sttling out, dan lainnya. Lebih lanjut, pelarut/pengencer atau thinner adalah sering digunakan untuk mengatur konsistensi dari cat. Hubungan antara berbagai komponen di atas dapat digambarkan seperti gambar 9.10.

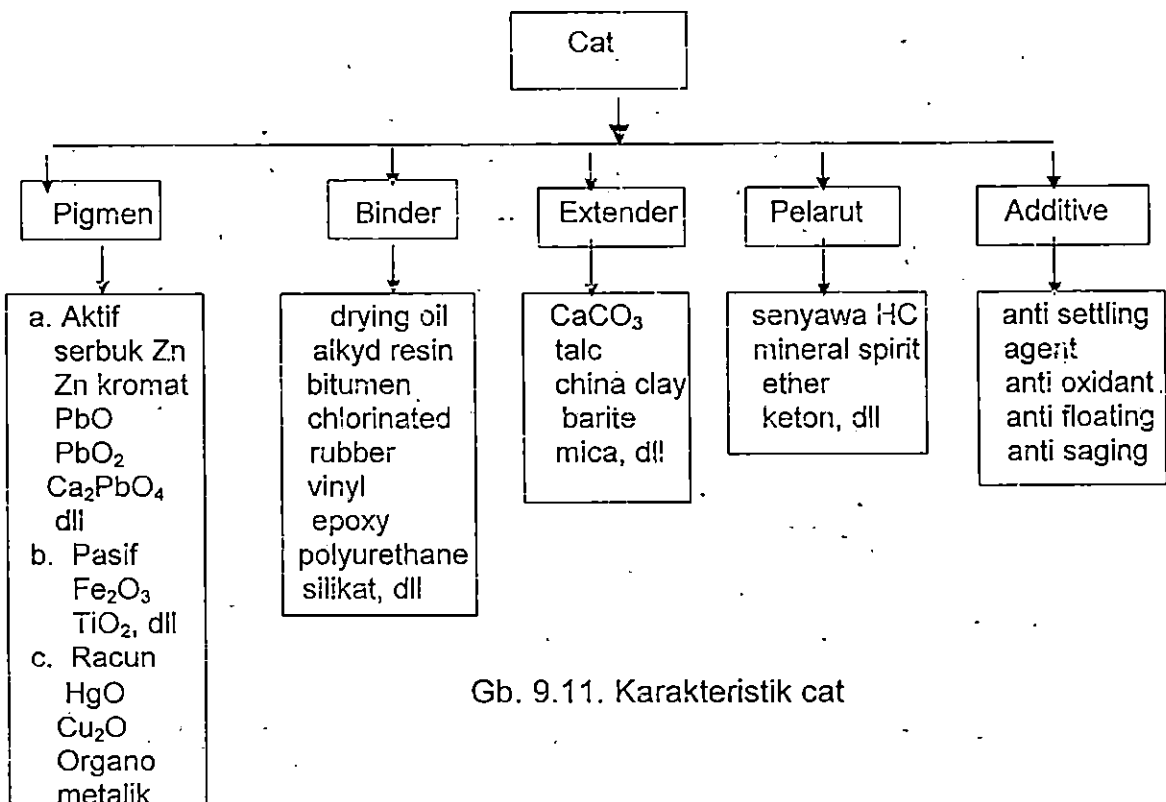
Sebelum kita melihat berbagai jenis komponen cat, lebih baik kita melihat terlebih dahulu sistem lapis lindung dan bagaimana proteksi korosi yang optimum yang diperoleh. Untuk memperoleh pembatas yang efektif terhadap korosi, sistem lapis lindung dapat menggunakan 3 mekanisme, yaitu:

- a. Pertama adalah pengaruh pembatas dimana sejumlah air dan oksigen dapat mencapai logam dan juga peningkatan tahanan listrik antara daerah anoda dan katoda.
- b. Mekanisme kedua adalah penggunaan inhibitive pigment untuk mencegah korosi dari baja. Metoda pengecatan mengandung bahan kimia dimana akan bereaksi dengan air dan oksigen membentuk film protektif, dibandingkan reaksi dengan baja membentuk karat.
- c. Sehubungan dengan mekanisme di atas, beberapa cat menggunakan bahan seng untuk memperoleh proteksi katodik untuk memproteksi korosi. Cara ini hampir sama dengan yang diperoleh pada besi galvanik.



Gb.9.10. Komponen lapis lindung/cat

Cat pada umumnya merupakan campuran antara pigmen dengan media pengikat (binder), digunakan sebagai lapis pelindung dan penghias permukaan, melalui proses pengeringan secara oksidasi, polimerisasi atau penguapan. Komponen-komponen utama dalam cat dapat dilihat dalam tabel 1. Jenis cat biasa disebut menurut jenis pengikatnya. Sedangkan komponen yang berperan dalam sifat anti korosi adalah pigmennya. Karakteristik umum dari cat dapat dilihat pada gambar 9.11 berikut ini



Gb. 9.11. Karakteristik cat

Beberapa sifat yang diinginkan dari cat adalah:

- a. Cat harus mudah dilapiskan dengan metoda yang dianjurkan oleh pabrik pembuat, misalnya dengan kuas, semprot, roller, atau lainnya.
- b. Cat harus mempunyai daya lekat yang baik terhadap benda kerja, tidak boleh terkelupas oleh pengaruh lingkungan.
- c. Lapisan cat harus kering dan menutup seluruh permukaan secara merata dan sempurna.
- d. Cat harus memiliki sifat yang konsisten, meliputi warna, viskositas, dan lainnya.
- e. Beberapa jenis cat diharapkan mempunyai sifat khusus seperti tahan cuaca, anti korosi, tahan air, atau tahan pada suhu tinggi.

Untuk memperoleh sifat perlindungan yang sempurna, perlu diperhatikan teknik pengecatannya. Bagian terpenting dari sistim pengecatan adalah pembersihan permukaan. Cara pembersihan permukaan dipilih berdasarkan bahan dasar yang akan di cat dan jenis cat yang akan dilapiskan. Cat-cat heavy duty memerlukan pembersihan permukaan yang lebih berat dari pada cat minyak atau jenis alkyd. Tujuan dari pembersihan permukaan antara lain:

- a. Untuk memperluas permukaan benda kerja dan
- b. Membuat permukaan menjadi kasar, agar cat dapat melekat dengan kuat.

Pada prinsipnya ada dua macam cara pembersihan permukaan, yaitu:

- a. Cara mekanik, meliputi, sand blasting, semprot air atau uap air, flame cleaning atau hand tool cleaning.
- b. Cara kimia, yaitu dengan menggunakan larutan basa (untuk menghilangkan lemak dan minyak), atau dengan larutan asam untuk membersihkan kerak dan oksida logam.

Asam-asam yang umum dipakai untuk pickling adalah  $H_2SO_4$ ,  $H_3PO_4$ ,  $HCl$  dan  $HF$ . Bersamaan dengan larutan asam harus ditambahkan inhibitor pasivasi agar permukaan logam yang sudah bersih tidak mudah terkorosi untuk beberapa saat. Setelah bersih, permukaan benda kerja harus segera dicat, agar tidak terkorosi oleh lingkungan.

Untuk cat pelindung korosi, sistem pengecatan umumnya terdiri dari 3 lapis, yaitu:

- a. Cat dasar (primer); yang mempunyai daya lekat yang baik pada logam, mampu menghalangi berlangsungnya proses korosi, dan mampu mengikat lapisan berikutnya.
- b. Cat intermediate, harus mampu mengikat primer dan topcoat serta memberikan lapisan yang cukup tebal dan kuat.
- c. Cat akhir (topcoat), selain harus kuat dan tahan cuaca, juga harus berpenampilan indah.

Sebagai lapis pelindung cat yang sudah terpasang harus diperiksa secara rutin apabila diketemukan cacat atau kerusakan cat harus segera diperbaiki, bahkan mungkin dilakukan pengecatan ulang. Beberapa jenis kerusakan cat yang sering dijumpai antara lain:

- a. Pelepuhan (blistering), karena ada gas atau air yang terjebak di bawah lapisan cat dan menyebabkan reaksi korosi.
- b. Retak (cracking), menyebabkan lapisan cat berbentuk seperti kulit buaya. Ini disebabkan oleh belum keringnya cat intermediate, tetapi telah dilakukan pengecatan topcoat.
- c. Berlubang (pinholing), berupa lubang-lubang halus akibat penguapan pelarut yang terlalu cepat.
- d. Pengelupasan (delamination), antar lapisan cat atau antara lapisan cat dengan logam, akibat daya lekat cat yang kurang baik.
- e. Keriput (wrinkling), disebabkan oleh penggunaan cat yang terlalu banyak, sehingga saat bagian terluar sudah kering bagian dalamnya masih basah.

#### **D. Pengendalian Korosi dengan Proteksi Katodik**

##### **1. Pendahuluan**

Proteksi katodik adalah suatu sistem untuk menurunkan laju korosi melalui pengendalian seluruh struktur menjadi katoda pada suatu sel korosi. Sistem proteksi katodik ini sangat luas penggunaannya untuk mencegah korosi pada struktur baja yang sangat besar yang berhubungan langsung

dengan lingkungan laut, tanah dan lingkungan air (fresh water). Contohnya jaringan pipa bawah tanah, haluan kapal, anjungan pengeboran lepas pantai, tiang pancang dermaga, jembatan baha bertulang, tangki-tangki bawah tanah, dan lainnya.

Sistem proteksi katodik biasanya diaplikasikan pada struktur atau konstruksi baja seperti yang akan dijelaskan dalam bab ini, tetapi juga logam-logam lain seperti kabel-kabel untuk telekomunikasi dapat juga diproteksi dengan cara yang sama

Pada bab ini terutama akan membahas penggunaan proteksi katodik untuk jaringan pipa bawah tanah, tetapi juga akan dibahas struktur-struktur lain dalam lingkungan yang lain.

Tujuan dari materi bab ini adalah agar mahasiswa dapat:

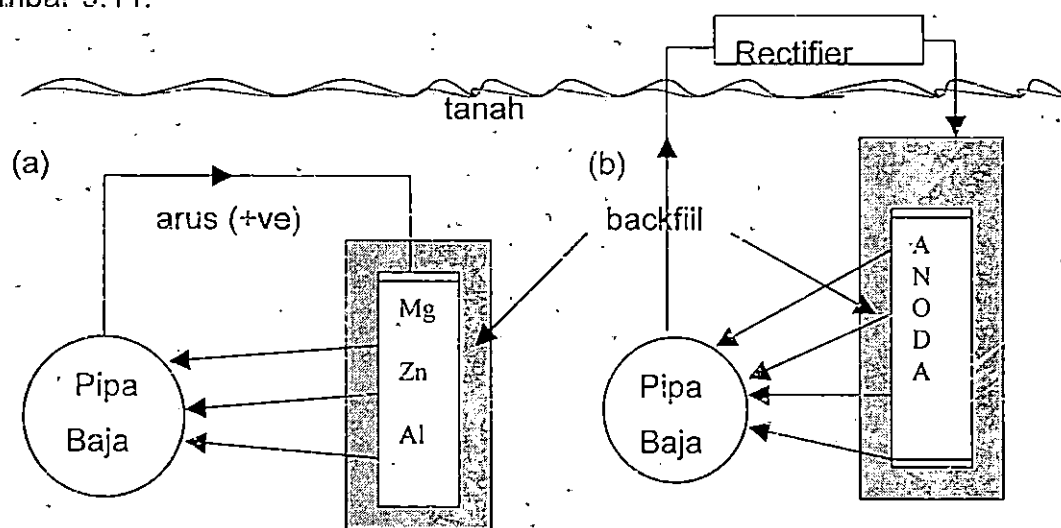
- a. Menjelaskan dasar-dasar elektrokimia dari proteksi katodik.
  - b. Membedakan antara metoda galvanik (anoda korban) dan arus paksa dalam sistem proteksi katodik.
  - c. Menjelaskan dan menghitung kebutuhan akan arus dan potensial untuk suatu sistem proteksi katodik.
  - d. Menjelaskan secara singkat dan jelas pengaruh dari arus sesat dan bagaimana cara menanggulangnya.
  - e. Menjelaskan bagaimana cara memonitor sistem proteksi katodik.
  - f. Menjelaskan secara singkat dan jelas prinsip dan aplikasi dari proteksi katodik.
2. Prinsip dari Proteksi Katodik

Ide dasar dari proteksi katodik adalah sangat sederhana, di mana dalam proteksi katodik terdapat daerah anodik dan katodik. Daerah anodik adalah daerah di mana arus yang bermuatan positif meninggalkan logam, dan daerah tersebut merupakan daerah di mana korosi dapat berlangsung. Pada daerah katodik, di mana arus konvensional masuk ke permukaan elektrolit, maka pada daerah tersebut tidak akan terjadi korosi. Oleh karenanya jika seluruh daerah pada logam dapat dibuat sebagai daerah katodik, maka

kemudian struktur tersebut tidak akan terkorosi. Inilah sebenarnya apa yang dikatakan sebagai proteksi katodik.

Arus searah dari suatu sistem jaringan luar yang dipaksakan untuk dapat mengalir kedalam struktur/konstruksi yang akan diproteksi disebut dengan proteksi katodik menggunakan sistem arus paksa (impressed current). Jika jumlah arus yang mengalir sesuai dengan yang dibutuhkan untuk proteksi, maka seluruh struktur yang diproteksi menjadi bersifat katodik, sehingga arus korosi akan dihentikan dan proteksi katodik dengan menggunakan metoda arus paksa dapat berlangsung dengan baik.

Driving voltage dari sistem proteksi katodik harus lebih besar dibandingkan dengan driving voltage dari sel korosi. Untuk konstruksi baja, harga potensial korosinya ( $E_{kor}$ ) kira-kira  $-0,5$  sampai  $-0,7$  volt vs elektroda pembanding (reference)  $Cu/CuSO_4$ . Potensial proteksinya sekitar  $-0,85$  volt vs elektroda pembanding (reference)  $Cu/CuSO_4$  atau lebih negatif. Dengan membuat potensial yang lebih negatif (over proteksi) akan menghamburkan arus (mengalami kerugian) dan juga dapat merusak lapis lindung (coating) dan yang lebih fatal akan mengarahkan terjadinya penggetasan hidrogen (hydrogen embrittlement) untuk beberapa jenis logam. Ada dua cara perubahan potensial yang bisa dicapai, yaitu seperti yang ditunjukkan pada gambar 9.11.



Gb. 9. 11. Proteksi katodik, (a) metoda anoda galvanik /korban, (b) arus paksa

Dari gambar tersebut dapat dijelaskan bahwa untuk sistem proteksi katodik dengan anoda korban ialah dengan jalan menghubungkan konstruksi/struktur yang akan diproteksi dengan logam yang lebih aktif (proteksi katodik dengan metoda anoda korban), dan untuk proteksi katodik dengan sistem arus paksa ialah dengan menghubungkan struktur atau konstruksi yang akan diproteksi dengan sumber arus luar (proteksi katodik dengan metoda arus paksa).

#### a. Proteksi Katodik dengan Anoda Korban

Proteksi katodik dengan menggunakan anoda korban ini struktur logam dibuat menjadi bersifat katodik dengan cara menghubungkan struktur logam tersebut dengan anoda (dari bahan logam) yang mempunyai potensial lebih negatif (elektronegatif) dibandingkan dengan potensial struktur yang diproteksi. Dari daftar seri emf menunjukkan bahwa logam-logam seperti magnesium, seng, dan aluminium akan sesuai sebagai anoda korban. Jadi anoda akan terkorosi, artinya ia akan mengorbankan dirinya untuk memproteksi struktur.

Keuntungan proteksi katodik dengan metoda anoda korban adalah:

- 1) Tidak membutuhkan sumber arus luar
- 2) Biaya instalasinya murah
- 3) Biaya perawatan dan kegiatan lainnya kecil
- 4) Sistem proteksi katodik dengan anoda korban ini jarang menyebabkan/ menimbulkan pengaruh terhadap struktur-struktur lainnya.

Keterbatasan sistem proteksi katodik dengan anoda korban adalah:

- 1) Driving voltagenya terbatas dan arus keluaran juga terbatas.
- 2) Sistem proteksi katodik ini tidak bisa digunakan atau umumnya kurang sesuai untuk struktur yang tidak diberi lapis lindung atau lapis lindungnya sangat jelek.
- 3) Sistem proteksi katodik ini tidak efektif untuk lingkungan yang mempunyai tahanan yang tinggi.
- 4) Umur dari anoda korban cenderung akan lebih pendek dari umur yang diperkirakan.

5) Sering lupa dalam perawatannya.

Pemilihan anoda korban didasarkan kepada pertimbangan ekonomis dari rekayasa, yaitu pertimbangan terhadap energi listrik yang dapat diperoleh atau kapasitas yang sangat jelas merupakan faktor yang sangat penting. Berapa jumlah amper per jam yang dapat disuplai oleh setiap kilogram bahan anoda korban. Jumlah energi listrik (amper-jam) yang dapat disuplai dapat dihitung dengan menggunakan hukum Faraday. Meskipun anoda korban akan mengalami korosi dengan sendirinya, tetapi efisiensinya dari logam seng dalam prakteknya adalah kurang dari 100%. Contoh logam seng secara teoritis mempunyai kapasitas 819 mper-jam (Ah) per kilogramnya. Artinya jika kita menggunakan logam seng untuk anoda korban dan energi yang dipakai untuk proteksinya sebesar 1 ampere secara kontinyu, maka satu kilogram seng akan dikonsumsi selama 819 jam. Dalam prakteknya kapasitas dari seng terukur hanya sebesar 780 Ah per kilogram, jadi efisiensinya adalah :

$$\frac{780}{819} \times 100 \% = 95\%$$

Cara lain untuk mengekspresikan kandungan energi dari anoda korban, khususnya dalam aplikasi pada daerah lepas pantai, adalah dengan menghitung laju konsumsi dalam kilogram per amper-tahun. Cara ini memberikan berat bahan anoda yang termakan atau hilang sebanyak 1 amper untuk periode satu tahun. Harga ini dihitung dengan membagi jumlah jam dalam satu tahun (8760) dengan kapasitasnya dalam Ah per kilogram. Cara ini sangat baik dalam menghitung umur yang diharapkan dari instalasi sistem proteksi katodik dengan metoda galvanik atau menggunakan anoda korban.

Untuk aplikasi pada daerah tanah, pemakaian anoda hendaknya ditutup atau ditempatkan pada "back fill", karena hal ini akan memberikan beberapa keuntungan, yaitu:

- 1) Dapat mencegah terjadinya pasivasi permukaan anoda



- 2) Dapat membantu penguapan anoda, dan
- 3) Dapat memberikan tahanan lingkungan yang rendah sehingga arus keluaran anoda dapat meningkat.

Back fill umumnya terdiri dari campuran bahan tanah bentonit dan gypsum (untuk mengurangi penyusutan saat kering dan menurunkan tahanan). Campuran tersebut biasanya ditempatkan pada suatu kantong. Jenis anoda korban dan sifat-sifatnya diberikan pada tabel 1 berikut:

Tabel 1. Jenis anoda korban dan sifatnya

Jenis Anoda	Potensial (V) vs Cu/CuSO <sub>4</sub>	Laju Konsumsi (kg/A-tahun)	Kapasitas (Ah/Kg)	Pemakaian
Seng	- 1,1	12	810	Lingkungan laut dan tanah atau air dengan tahanan rendah sampai medium
Magnesium	-1,55 (standar)	7	1100	konstruksi yang dipendam dalam tanah dan Lingkungan non saline water
	- 1,80 (high potensial)	4	1200	Sda
Aluminium	- 1,1	3,2 (Al-Zn-Hg)	2800	Lingkungan laut
		3-4 (Al-Zn-In)	2300-2600	Sda
		3-9 (Al-Zn-Sn)	900-2600	Sda

b. Proteksi Katodik dengan Metoda Arus Paksa

Proteksi katodik dengan metoda arus paksa ini adalah membuat struktur logam atau baja dibuat menjadi bersifat katodik dengan menghubungkannya ke terminal negatif dari sumber arus searah, sedangkan terminal positifnya dihubungkan dengan anoda inert (yang tidak ikut bereaksi). Anoda inert tersebut dapat dibuat dari bahan yang tahan korosi, artinya bahwa reaksi anodik tidak akan melarutkan bahan logam, tetapi hanya sebagai reaksi lainnya seperti oksidasi air atau ion-ion klor.

Keuntungan proteksi katodik dengan menggunakan arus paksa adalah:

- 1) Driving volnya adalah lebih besar
- 2) Pengontrolan arus dan tegangan dapat dilakukan secara fleksibel
- 3) Dapat digunakan pada konstruksi yang telanjang, lingkungan dengan tahanan yang tinggi, objek yang diproteksi besar, dan lainnya.

Keterbatasan dari proteksi katodik dengan arus paksa adalah:

- 1) Biaya instalasinya mahal
- 2) Biaya perawatan juga mahal
- 3) Dapat menyebabkan pengaruh pada struktur yang berdekatan.

Sumber arus searah dari luar umumnya adalah transformer-rectifier. Sumber arus utama sebelum masuk ke rectifier adalah dari PLN atau sumber sendiri seperti dari pembangkit listrik dari disel atau motor bakar, atau dari sel surya dan lainnya yang berupa arus bolak-balik dan kemudian didalam rectifier diubah menjadi arus searah. Pengeluaran arus dari rectifier diatur atau diprogram secara otomatis sehingga pengeluaran arusnya ke struktur yang diproteksi potensial proteksinya tetap atau konstan.

Bahan logam untuk anoda inert pada sistem proteksi katodik dengan arus paksa ini lebih banyak dibandingkan untuk anoda korban. Bahannya bisa dipilih dari bahan yang sangat murah seperti skrap baja sampai bahan yang sangat mahal seperti bahan platina atau campuran oksida logam yang dilapisi dengan titanium. Baja, grafit dan besi silikon adalah bahan yang paling banyak digunakan untuk aplikasi bawah tanah. Anoda inert ini biasanya dikelilingi dengan backfill dari bahan batu bara untuk meningkatkan hubungan kelistrikan antara anoda dan tanah disekelilingnya. Untuk pekerjaan dilingkungan laut paduan timah hitam dan perak dan titanium yang dilapisi platina atau niobium yang dilapisi platina banyak digunakan.

Anoda inert untuk proteksi katodik dengan arus paksa dapat dioperasikan pada driving potensial yang lebih tinggi dibandingkan dengan anoda korban. Harga maksimum sering ditentukan dengan pertimbangan keselamatan atau pada batas gas yang ditimbulkan dapat diterima. Arus

keluarannya juga secara signifikan adalah lebih tinggi dari anoda korban. Dengan arus tidak berkaitan dengan laju konsumsi anoda, kapasitas arus biasanya diekspresikan dalam arus per unit area dari permukaan anoda (rapat arus/current density) tanpa mengacu pada kehilangan bahan anoda. Jenis bahan anoda untuk sistem proteksi katodik dengan arus paksa dan sifat-sifatnya diberikan pada tabel berikut.

Tabel 2. Bahan anoda dan sifat-sifatnya untuk proteksi katodik dengan metoda arus paksa.

Bahan	Konsumsi (Kg/Amp-tahun)	Rapat Arus (Amp/cm <sup>2</sup> )
Campuran oksida logam yang dilapisi Titanium	10 <sup>-5</sup>	100 - 600
Titanium yang diplatinisasi	10 <sup>-5</sup>	100 - 1000
Niobium yang diplatinisasi	10 <sup>-5</sup>	100 - 1000
Silikon/Krom/Besi	0,4	10 - 40
Magnetite	0,1	3 - 60
Baja	7 - 9	0,1 - 1
Paduan Pb-Ag	0,05 - 0,1	100 - 200
Grafit dalam kokas	0,2 - 0,5	10 - 40

Pada penggunaan di bawah tanah anoda inert disusun didalam backfill yang disebut dengan "ground bed" agar dapat mengalirkan arus yang lebih besar.

#### c. Kebutuhan Arus Proteksi Katodik

Parameter dasar dalam proteksi katodik adalah arus yang dibutuhkan untuk dapat memproteksi suatu struktur. Arus yang dibutuhkan akan mempengaruhi besarnya struktur yang dapat diproteksi, perencanaan dan penempatan dari sistem anoda dan perencanaan dari sumber tenaganya. Untuk alasan ekomis dan teknik arus yang rendah lebih diinginkan. Faktor utama yang mempengaruhi kebutuhan arus adalah:

##### 1) Lingkungan

Baja di dalam lingkungan yang korosif (lingkungan air laut) akan membutuhkan arus proteksi yang lebih besar dibandingkan dengan

kebutuhan arus untuk struktur di dalam tanah yang kurang korosif. Di dalam tanah faktor-faktor tahanan tanah, konsentrasi oksigen, adanya bakteri, pH akan memberikan pengaruh terhadap kebutuhan arus proteksi. Dalam lingkungan air, jumlah aliran air akan memberikan pengaruh terhadap kebutuhan arus proteksi. Aliran air yang berturbolensi adalah akan mengandung udara yang banyak dan menghasilkan pengaruh depolarisasi mekanik. Jumlah arus yang dibutuhkan untuk proteksi dalam lingkungan yang berbeda diberikan dalam tabel berikut ini.

Tabel 3. Arus yang dibutuhkan untuk berbagai kondisi

No	Kondisi	Kebutuhan Arus ( $\text{ma/m}^2$ )
1	Asam sulfat panas	$4 \times 10^5$
2	Baja telanjang dalam air laut yang bergerak	100 sampai 150
3	Baja telanjang dalam air laut diam	50 sampai 80
4	Baja telanjang dalam air payau	40 sampai 60
5	Baja telanjang dalam tanah	10 sampai 30
6	Baja dengan lapis lindung jelek dalam tanah atau air	- 1
7	Baja dalam betan bebas Cl	- 0,07
8	Baja dengan lapis lindung yang baik dalam tanah atau air	- 0,03
9	Baja dengan lapis lindung sangat baik	< 0,01

## 2) Adanya pemberian lapis lindung

Jika objek yang akan diproteksi diberi lapis lindung, maka kebutuhan arus proteksi menjadi lebih rendah, karena luas permukaan yang akan diproteksi menjadi kecil, yaitu pada daerah yang mengalami cacat, atau hanya pada daerah yang tidak terlindungi oleh lapis lindung akibat adanya pori-pori pada lapis lindung. Pada tabel 3 di atas telah diberikan besarnya arus proteksi yang dibutuhkan untuk baja telanjang, baja yang diberi lapis lindung yang jelek, dan lapis lindungnya baik serta sangat baik pada dalam tanah atau air. Dari data tabel tersebut dapat dilihat bahwa dengan semakin baiknya lapis lindung maka kebutuhan arus proteksi semakin menurun. Jika suatu jaringan pipa yang diberi lapis

lindung yang sangat baik, dapat dimungkinkan dapat dilakukan proteksi katodik pada satu lokasi untuk panjang jaringan 80 kilometer atau lebih. Pada struktur yang berada lingkungan air laut, ion-ion hidroksil akan timbul dengan adanya proteksi katodik pada baja, sehingga mengakibatkan pengendapan kalsium yang tidak larut dan garam magnesium yang dikenal dengan "*calcareous deposit*". Dengan demikian akan terbentuk film yang melekat secara kuat, yang mana akan menurunkan kebutuhan arus proteksi.

Ada faktor-faktor lain yang perlu dipertimbangkan dalam perencanaan sistem proteksi katodik, seperti umur yang diharapkan dari struktur, dan faktor ekonomis. Hal ini akan mempengaruhi jenis dan sistem dari proteksi katodik. Perawatan perlu dipertimbangkan karena akan mempengaruhi biaya instalasi dari sistem proteksi katodik. Adanya arus sesat dapat mempengaruhi struktur yang diproteksi secara serius dan akan mempengaruhi rancangan sistem proteksi katodik.

#### d. Tahapan Perencanaan

Hampir semua perancangan proteksi katodik harus dilakukan oleh perusahaan yang mempunyai spesialisasi pengontrolan korosi. Prosedur perancangan sangat bervariasi, tetapi prosedur berikut dapat digunakan sebagai pedoman umum dalam merencanakan proteksi katodik untuk struktur yang dibenam dalam tanah. Di samping itu dengan mempedomani standarisasi akan dapat dihasilkan rancangan yang cukup memadai. Langkah pertama adalah memutuskan sistem proteksi dengan anoda korban atau dengan sistem arus paksa yang akan digunakan. Untuk itu dapat mengacu kepada keuntungan dan keterbatasan dari masing-masing sistem tersebut seperti yang telah dijelaskan di muka. Setelah keputusan diambil, maka perancangan selanjutnya dapat dilakukan sebagai berikut:

##### 1) Sistem Anoda Korban

- (a) Estimasikan arus yang dibutuhkan untuk memproteksi struktur, dengan menggunakan informasi yang telah disebutkan di atas.

- (b) Dari data tahanan tanah dan ukuran anoda, estimasikan arus yang keluar dari anoda.
  - (c) Periksa umur dari anoda dengan estimasi arus yang keluar seperti yang telah ditentukan pada (b). Jika tidak pilih anoda dengan ukuran yang berbeda.
  - (d) Hitung jumlah anoda yang dibutuhkan untuk dapat menghasilkan arus proteksi yang diinginkan. Catatan bahwasanya beberapa anoda yang dipasang bersamaan akan menghasilkan arus masing-masing yang lebih rendah dibandingkan jika ia dipasang sendirian.
  - (e) Gambar secara detail rancangan instalasi proteksi katodik.
  - (f) Optimalkan instalasi dilokasi pemasangan.
- 2). Metoda Arus Paksa
- (a) Estimasikan kebutuhan arus untuk memproteksi struktur.
  - (b) Tentukan jumlah, lokasi ground bed sesuai dengan panjang struktur yang akan diproteksi dan konsisten dengan data yang dikumpulkan selama survay lapangan. Untuk jaringan pipa yang diberi lapis lindung dengan baik jarak antara ground bed 20 – 50 kilometer adalah umum digunakan.
  - (c) Tentukan rancangan arus perground bed. (harganya akan berbeda dengan jarak yang berbeda)
  - (d) Pilih jumlah anoda, jenis, dan ukuran, konsisten dengan umur anoda yang diharapkan untuk setiap unit proteksi katodik.
  - (e) Hitung jarak antara ground bed dengan pipa, untuk meyakinkan tidak terjadinya potensial yang berlebihan pada jaringan pipa akibat bidang anoda. Tahanan tanah yang tinggi dan arus yang dibutuhkan meningkatkan jarak. Jarak antara keduanya 100 meter adalah hal yang biasa.
  - (f) Pilih ukuran kabel
  - (g) Hitung tahanan pentahanan dari sistem ground bed.
  - (h) Hitung total tahanan loop dari jaringan atau sirkuit (R1)

- (i) Hitung sumber daya DC voltage [  $V = (IR1) + 2$  ]
- (j) Atur ukuran dari ground bed, jika diperlukan untuk mencapai potensial yang sesuai dengan kebutuhan.
- (k) Cari sumber daya yang benar-benar sesuai dengan kebutuhan potensial dan arus yang dibutuhkan.
- (l) Gambar detail semua jaringan instalasinya.

#### e. Kriteria Proteksi Katodik

Biasanya potensial proteksi pada suatu struktur diukur dengan menggunakan elektroda pembanding Cu/CuSO<sub>4</sub>, meskipun untuk struktur dilingkungan air laut diukur dengan menggunakan elektroda pembanding Ag/AgCl. Logam seng murni di dalam backfill dapat digunakan sebagai elektroda pembanding untuk instalasi permanen. Menggunakan elektroda pembanding selain Cu/CuSO<sub>4</sub> memerlukan koreksi.

Kriteria proteksi katodik yang luas digunakan untuk memproteksi struktur baja adalah - 0,85 volt vs elektroda pembanding Cu/CuSO<sub>4</sub>. Dalam tanah yang mengandung bakteri pereduksi sulfat digunakan - 0,95 volt. Untuk logam-logam selain baja harus digunakan potensial yang berbeda. Untuk kabel timah hitam digunakan - 0,70 volt, sementara untuk aluminium potensialnya harus dipertahankan antara - 1,0 volt sampai - 1,20 volt vs elektrod apembanding Cu/CuSO<sub>4</sub>. Kriteria lain yang sering digunakan adalah potensial proteksinya harus paling rendah 100 milivolt dibawah potensial murninya, yaitu polarisasi ke - 100 milivolt.

Jumlah maksimum over proteksi yang dapat diaplikasikan pada suatu sistem proteksi adalah dipengaruhi oleh sejumlah faktor. Pada potensial yang lebih negatif, maka dibutuhkan arus yang lebih besar, sehingga meningkatkan biaya operasional proteksi, dan rapat arus yang meningkat tinggi akan menimbulkan masalah lain dalam sistem proteksi katodik.

Alkali yang dibentuk oleh reaksi katodik dapat memperlemah daya adhesif antara lapis lindung pipa dengan baja, di mana akan menjadi lebih serius yaitu meningkatnya rapat arus. Korosi retak tegang dan hydrogen

stress cracking dapat dipercaya merupakan hasil dari meningkatnya potensial menjadi lebih negatif. Dengan alasan tersebut, maka potensial sebesar  $-1,10$  volt adalah umum digunakan sebagai besaran yang maksimum. Harga potensial proteksi untuk struktur/konstruksi logam diberikan pada tabel 4 berikut ini.

Tabel 4. Potensial proteksi yang direkomendasikan untuk berbagai struktur

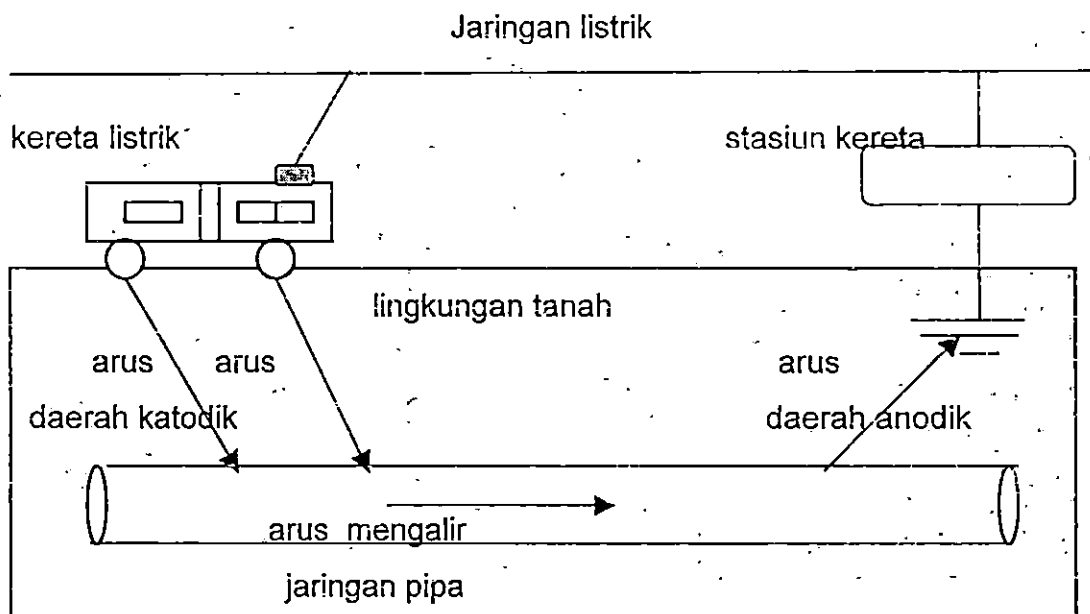
No	Struktur	Lingkungan atau Lokasi	Potensial (V) vs Cu/CuSO <sub>4</sub>	Interpretasi atau Keterangan
1	Baja	Tanah dan air netral	$-0,85$ sampai $-1,10$	$-0,85$ sampai $-1,10$ vs Ag/AgCl $+0,25$ sampai $+0,00$ vs Seng
	Baja	Tanah yang mengandung bakteri anaerobic	$-0,95$ sampai $-1,10$	$-0,90$ sampai $-1,05$ vs Ag/AgCl $+0,15$ sampai $+0,00$ vs Seng
	High Strength Steel	Tanah dan Air	$-0,85$ sampai $-1,00$	$-0,80$ sampai $-0,95$ vs Ag/AgCl $+0,25$ sampai $+0,10$ vs seng Potensial lebih negatif dari yang ditetapkan mungkin menghasilkan penggetasan hidrogen
	Timah Hitam	Tanah atau air	$-0,56$ sampai $-0,90$	Pelarutan timah hitam mungkin terjadi pada $-1,90$ volt.
	Aluminium	Tanah dan air	$-0,85$ sampai $-1,10$	Aluminium rentan terhadap serangan alkali yang mungkin merupakan hasil dari potensial negatif yang besar.
	Paduan Tembaga	Tanah dan air	$-0,85$ sampai $-1,10$	
	Baja Galvani	Tanah dan air	$-1,00$	



f. Pengaruh Arus Sesat.

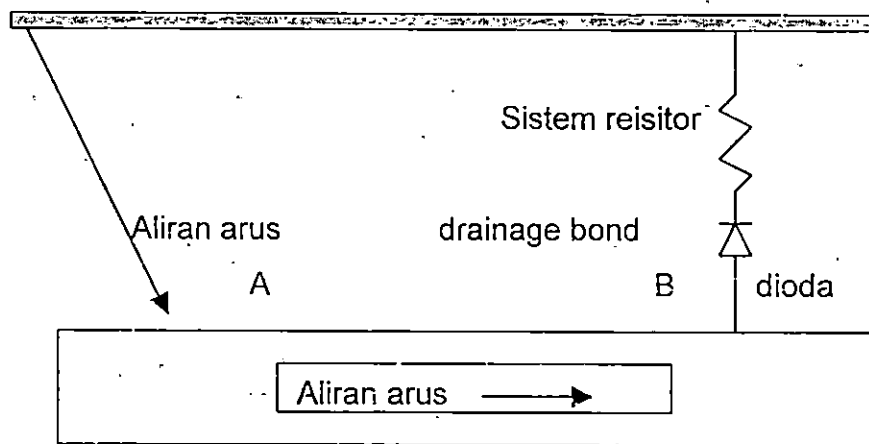
Arus sesat dapat mempengaruhi sistem proteksi katodik. Arus sesat tersebut bisa berasal dari arus DC kereta api listrik dan trem listrik, operasi dari listrik DC, sistem proteksi katodik lain dan sumber sejenis lainnya.

Sumber arus sesat yang sangat berbahaya adalah dari kereta listrik dan trem listrik. Gambar skematik dari jaringan rel ditunjukkan pada gambar 9.12. Arus mengalir dari stasiun melalui jaringan kabel udara, melalui motor di kereta dan kembali melalui rel ke stasiun kembali. Sayangnya rel tidak terisolasi dengan baik dari tanah dan sebagian dari arus akan mengalir kedalam struktur logam yang terbenam dalam tanah. Pada titik A struktur adalah terpolarisasi katodik, tetapi dimana arus adalah dikeluarkan (discharge) pada titik B, pipa akan terkorosi pada laju yang sangat cepat. Dengan demikian maka pipa akan mengalami kebocoran akibat adanya arus sesat dari kereta api listrik kira-kira tiga bulan setelah jaringan pipa dipasang.



Gb.9.12. Diagram arus sesat dari kereta api listrik

Sistem yang paling umum dan banyak digunakan untuk mengatasi hal tersebut di atas adalah dengan memasang lapisan metalik (metallic bond) antara pipa di titik B dan rel kereta api, atau pada daerah negatif di stasiun. Sistem ini disebut dengan "drainage bond" dan bisa dipasang dioda untuk mencegah aliran arus dalam arah kebalikan, balik arus, dan resistor untuk mengontrol aliran arus. Dalam bentuk ini arus balik ke rel secara elektronika dan disini tidak pengeluaran arus elektrolitik dari pipa, karenanya tidak akan terjadi korosi, seperti yang ditunjukkan pada gambar 9.13.



Gb.9.13. Drainage bond pada rel kereta api listrik

Dari kondisi yang dijelaskan di atas, maka perlu adanya suatu perencanaan, instalasi, pengukuran/pengujian, commissioning dan operasi secara bersama dengan unit atau departemen yang mempunyai jaringan pipa logam bawah tanah seperti jaringan kabel, pipa gas, dan lainnya sehingga dapat diperoleh perlindungan terhadap korosi secara maksimal, dan tidak ada yang dirugikan, dan bahkan biaya instalasinya bisa lebih murah karena ditanggung secara bersama.

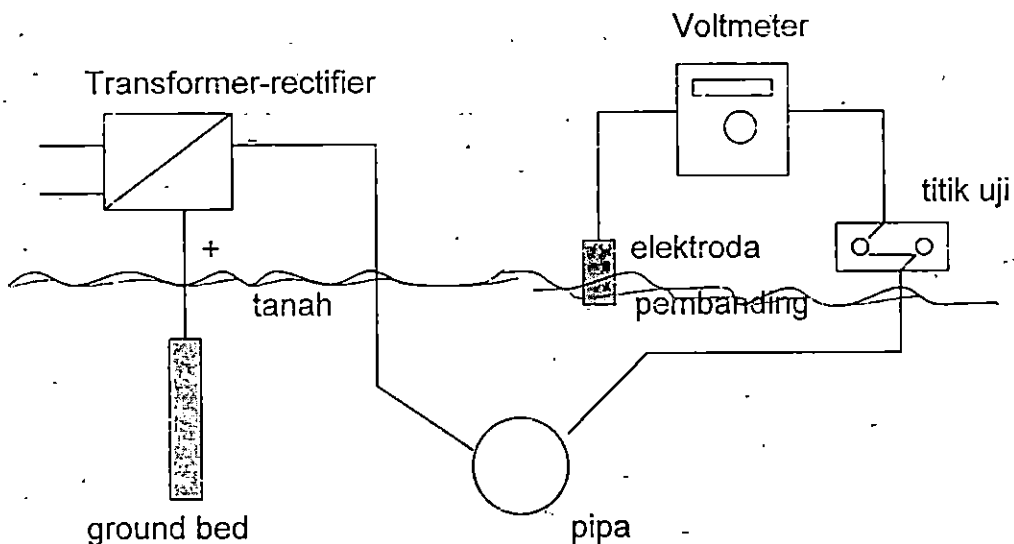
#### g. Monitoring Proteksi Katodik

Guna meyakinkan bahwasanya sistem proteksi katodik yang dipasang berjalan sesuai dengan rancangan dan untuk melihat apakah dalam unjuk kerjanya dapat mencapai sasaran yang diharapkan, maka

diperlukan monitoring. Terdapat dua tingkatan monitoring, yaitu monitoring yang dilakukan secara reguler yang berfungsi untuk memeriksa apakah semua peralatan bekerja dengan baik, dan monitoring yang dilakukan tidak rutin atau reguler untuk meyakinkan bahwasanya proteksi benar-benar mencapai sasaran yang diharapkan.

Pemeriksaan terhadap peralatan untuk meyakinkan bahwasanya arus proteksi mengalir dalam sistem proteksi dan drainage bond dan ukuran potensial apakah perlu diatur kembali untuk mendapatkan proteksi yang maksimal. Di samping itu apakah diperlukan suatu pengaturan atau penyetelan dari seluruh instalasi proteksi katodik. Dalam pemeriksaan non reguler perlu juga dilakukan pemeriksaan potensial pipa (untuk jaringan pipa) pada titik-titik atau daerah yang telah ditetapkan, dan sekaligus mengambil tindakan yang diperlukan jika menemukan hal-hal yang tidak sesuai dengan rancangan atau misalnya potensial pipa masih terlalu tinggi dibandingkan kriteria proteksinya.

Pengukuran potensial pipa dilakukan dengan menggunakan voltmeter dan elektroda pembanding tembaga/tembaga sulfat, seperti ditunjukkan pada gambar 9.14 berikut.



Gb. 9.14. Pengukuran potensial pipa dalam tanah.

Sebagaimana telah dijelaskan di muka bahwasanya potensial proteksi untuk baja adalah  $-0,85$  volt vs Cu/CUSO<sub>4</sub>. Jika hasil pengukuran lebih besar dari potensial tersebut, maka diperlukan pengaturan arus masuk dari sumber arus (rectifier).

Permasalahan akan terjadi dalam pengukuran potensial ini, karena pembacaan ukuran tidak hanya potensial polarisasi dari struktur saja, tetapi juga karena adanya "IR drop", yaitu penurunan potensial akibat pengaruh arus proteksi katodik yang mengalir. Jadi ukuran potensialnya merupakan penjumlahan dari potensial polarisasi struktur dan gradien potensial yang terjadi, yaitu:

$$V_M = E_P + V_{IR}$$

di mana:

$V_M$  = ukuran potensial pipa

$E_P$  = potensial polarisasi dari struktur

$V_{IR}$  = gradien potensial dalam tanah

Contoh

Pertimbangkan suatu struktur yang mengandung cacat dengan radius 50 mm dalam lingkungan tanah yang relatif homogen dengan tahanan 200  $\Omega$ m. Rapat arus yang dibutuhkan untuk proteksi sebesar 100mA/m<sup>2</sup>, dan kriteria proteksi  $-0,85$  volt vs Cu/CUSO<sub>4</sub>. Berapa potensial terukur padapipa tersebut.

Penyelesaian:

Arus yang mengalir ( I ) dikalikan dengan daerah yang cacat akan diperoleh rapat arus. Tahanan (R) diperoleh dengan  $R = \rho/4r$ , di mana

$\rho$  = tahanan tanah, dan r adalah jari-jari daerah cacat.

Dari rumus di atas

$$\begin{aligned} V_M &= E_P + V_{IR} \\ &= -0,85 + [-100 \times 10^{-3} \times \pi (50 \times 10^{-3})^2][200/4 \times (50 \times 10^{-3})] \\ &= -0,85 - 0,785 \text{ volt} \\ &= -1635 \text{ mV vs Cu/CUSO}_4 \end{aligned}$$

Jadi dalam situasi seperti ini, kriteria proteksi diukur dalam keadaan sistem proteksi katodik yang sedang berjalan potensialnya sebesar  $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$  tidak sebesar  $-0,85$  Volt vs  $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$ .

#### E. Pengendalian Korosi dengan Proteksi Anodik.

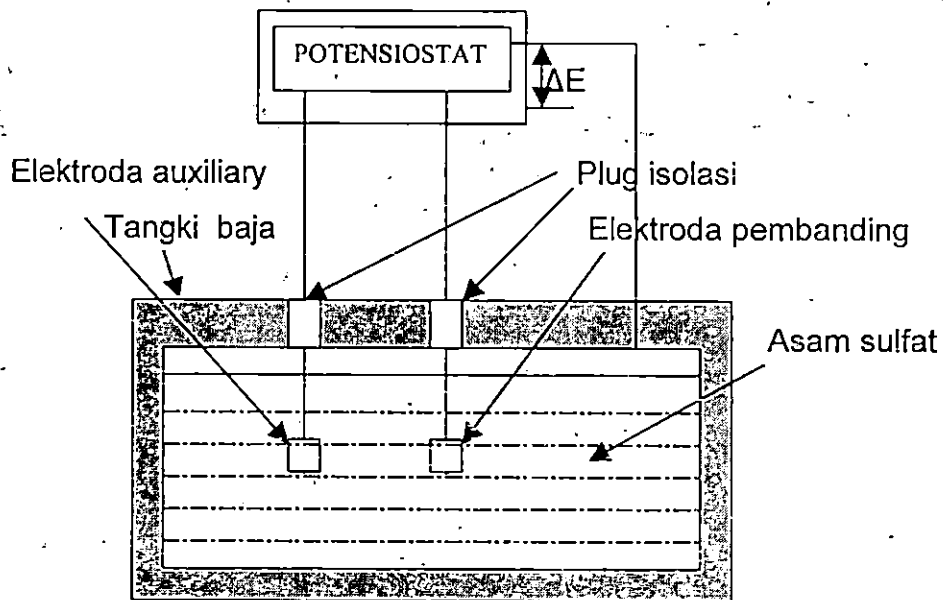
Proteksi anodik merupakan metoda yang lebih baru untuk pengendalian korosi dibandingkan metoda proteksi katodik. Sistem pengendalian korosi dengan proteksi anodik ini didasarkan kenyataan bahwa pada batas potensial tertentu logam atau paduan logam akan menjadi pasif sehingga dapat menurunkan laju korosinya. Jadi secara jelas proteksi anodik ini hanya dapat dilakukan pada logam-logam yang mampu pasif atau dapat membentuk lapisan film pasif, seperti besi dan krom serta paduannya. Juga sistem proteksi anodik ini hanya bisa sangat berguna pada lingkungan tertentu, di mana komposisi elektrolit dapat berpengaruh terhadap sifat pasif.

Proteksi anodik terhadap suatu struktur diperlukan potensiostat untuk menjaga potensial dari logam konstan dan juga diperlukan elektroda pembanding untuk itu. Salah satu terminal pada potensiostat dihubungkan dengan struktur, dan terminal lainnya dihubungkan dengan elektroda tambahan (auxiliary electrode) dari bahan platina atau clading platina, dan terminal ketiga dihubungkan dengan elektroda pembanding (reference electrode) seperti ditunjukkan pada gambar 9.15.

Dalam operasinya potensiostat menjaga potensial tetap konstan antara struktur dan elektroda pembanding. Potensial optimum adalah ditentukan oleh pengukuran secara elektrokimia.

Proteksi anodik dapat menurunkan laju korosi secara substansial, sebagai contoh untuk baja tahan karat jenis 304 yang mengandung asam sulfat aqueous dengan sejumlah kecil sodium klorida menunjukkan laju korosinya sebesar 50 mm/tahun, tetapi dengan proteksi anodik laju korosinya bisa diturunkan menjadi hanya  $0,4\mu\text{m}/\text{tahun}$ , atau penurunan sebesar 100000 kali. Proteksi anodik mempunyai keuntungan yaitu bisa dipasang pada lingkungan yang sangat korosif dan hanya membutuhkan arus yang sangat kecil. Kerugian yang utama dalam

sistem proteksi anodik adalah biaya instalasinya yang sangat mahal, dan jika mengalami kegagalan misalnya catu daya listrik, maka laju korosinya menjadi sangat tinggi. Untuk itu perlu diperhitungkan secara mendalam dalam pemakaiannya, serta perlu pemantauan yang dilakukan secara rutin terhadap potensial dan arus proteksinya.



Gb. 9.15. Proteksi anodik terhadap tangki baja.

## DAFTAR PUSTAKA

- Avner, Sidney, 1975, Introduction to Physical Metallurgy, Second Edition, McGraw Hill International Edition.
- Francis, Robert, 1995, Corrosion Control, Corrosion Prevention Centre, PO BOX 5142, Clayton, Victoria, Australia, 3168.
- Fontana, FG, 1987, Corrosion Engineering, MCGraw Hill Books Company, International Edition, USA.
- Jones, DA, 1992, Principles and Prevention of Corrosion, Maxmillan Publishing Company, New York.
- Morgan, John, 1987, Cathodic Protection, National Association of Corrosion Engineers, Houston -Texass USA.
- Narayan, RAJ, 1983, An Introduction to Metallic Corroison and Its Prevention, Oxford & IBH Publishing Co, New Dēlhi, Bombay, Calcuta, India.
- Pourbaix, Marcel, 1974, " Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solution, NACE, Houston -Texas 77027, USA
- Trethewey, KR & Chamberlain, J, 1988, Korosi untuk Mahasiswa dan Rekayasawan, PT. Gramedia Pustaka Utama, Jakarta.
- ....., 1984, An introduction Corrosion Basic, National Association of Corrosion Engineers, Houston, Texass USA.

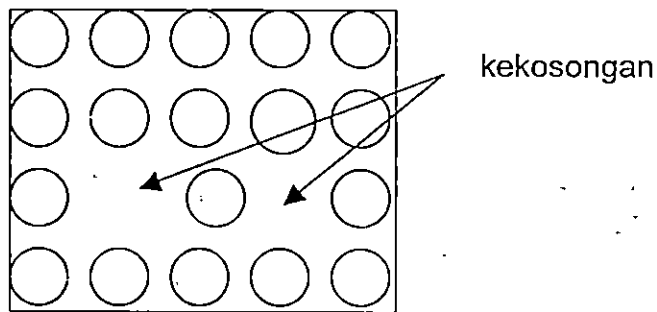
Susunan atom bervariasi tergantung dari jenis logamnya. Ada tiga jenis struktur yang dikenal dengan struktur kristal atau kisi. Basis dari tiga struktur kristal tersebut disebut dengan unit sel, yaitu struktur kubus pemusatan ruang (kpr atau BCC), kubus pemusatan sisi (kps atau FCC), dan hexagonal closed packed (HCP). Bentuk dari struktur kristal tersebut dapat dilihat pada gambar 5.4 di atas.

Logam dengan struktur kristal BCC atau (kpr) adalah: krom (Cr); vanadium (V); wolfram/tungsten (W); molibdenum (Mo); dan besi alpha ( $\alpha$ -Fe) atau ferrit. Logam dengan struktur kristal BCC atau kpr adalah kurang ulet (ductile) dibandingkan dengan logam dengan struktur kristal FCC atau kps. Logam dengan struktur kristal FCC atau kps adalah tembaga (Cu); perak (Ag); emas (Au); aluminium (Al); nikel (Ni); timah hitam/plumbum (Pb); dan besi gamma ( $\gamma$ -Fe) atau austenit. Logam dengan struktur kristal FCC atau kps mempunyai sifat ulet. Logam dengan struktur kristal HCP adalah magnesium (Mg); seng (Zn); dan cadmium (Cd). Logam dengan struktur kristal HCP mempunyai sifat kurang ulet dibandingkan dengan logam yang mempunyai struktur kristal BCC dan FCC.

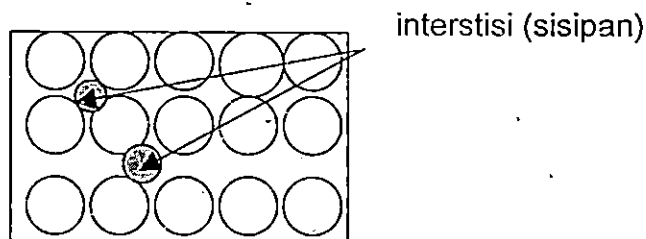
Secara konsep struktur kristal logam adalah tidak mempunyai cacat, tetapi pada kenyataannya struktur kristal dari semua logam dan paduannya mempunyai banyak cacat atau terdapat ketidak sempurnaan. Cacat pada kristal terdiri dari:

- a. Cacat titik, yang diakibatkan oleh: kekosongan (vacancies) yang diakibatkan oleh hilangnya atom-atom dalam kisi kristal. Interstisi (sisipan) yaitu diakibatkan adanya atom ekstra yang menyisip diantara susunan atom, dan adanya bahan pengotor (impurities) yang menggantikan kedudukan dari susunan atom. Cacat titik ini dapat mempengaruhi sifat fisik logam. Sebagai contoh dengan adanya cacat titik akibat kekosongan akan memberikan keuntungan pada proses difusi atom melalui kisi, sementara interstisi dan substitusi akan dapat meningkatkan kekuatan logam.
- b. Cacat garis atau yang lebih dikenal dengan dislokasi, yang memberikan pengaruh yang besar pada kisi dibandingkan dengan cacat titik.



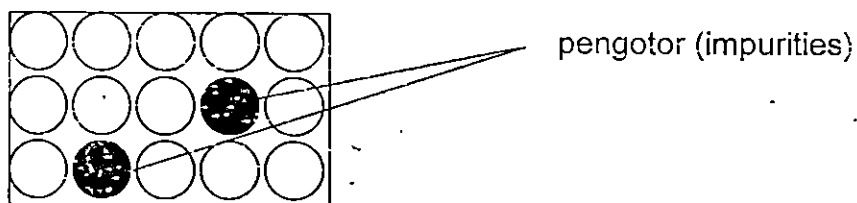


Gb. 5.5. Cacat titik akibat adanya kekosongan



Gb. 5.6. Cacat titik akibat adanya sisipan/interstisi

Adanya interstisi atau sisipan dan substitusi, serta bahan pengotor akan meningkatkan sifat kekuatan logam (sifat mekanik)



Gb.5.7. Cacat titik karena adanya substitusi

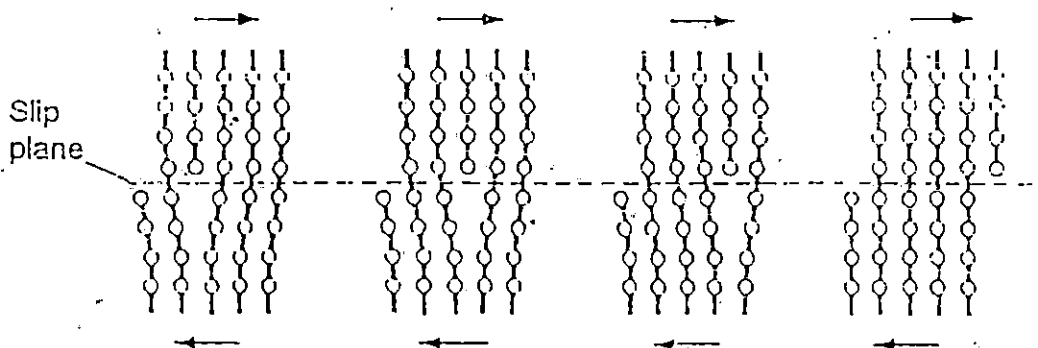
### C. Deformasi Plastik pada Logam

Dislokasi adalah cacat yang terbentuk secara bersambungan tetapi tidak satu garis melalui kisi kristal. Bentuk sederhana dari dislokasi adalah disebut dengan dislokasi tepi, yang terbentuk dengan adanya bidang setengah atom dalam kisi. Sedangkan bentuk dislokasi yang lebih rumit disebut dengan dislokasi ulir, yang berhubungan dengan sobekan pada bidang kristal. Pada logam dislokasi yang terjadi adalah campuran dari dislokasi tepi dan dislokasi ulir, yaitu

pada satu bagian terjadi dislokasi tepi, sedangkan pada bagian lainnya terjadi dislokasi ulir.

Dislokasi dapat bergerak dengan adanya gaya yang relatif rendah/kecil, dan pergerakan dislokasi tersebut akan menghasilkan deformasi pada logam. Mekanisme di mana dislokasi dapat bergerak dan menyebabkan terjadinya deformasi plastik yang disebut dengan slip. Daerah yang mengalami distorsi elastik menjadikan daerah disekeliling kisi kristal dapat dengan mudah bergerak sepanjang bidang atom normal ke bidang ekstra. Jika proses slip selesai, maka kristal kembali sempurna tetapi dengan atom-atom di atas bidang slip tempatnya berubah sebesar satu unit ke arah kanan terhadap atom-atom di bawah bidang slip, seperti diperlihatkan pada gambar 5.8. Di samping itu setiap ikatan pada bidang slip mengalami pecah, dan adanya dislokasi berarti hanya ada satu panah (arah) dari ikatan yang pecah untuk terjadinya slip.

Dislokasi adalah cacat yang sangat penting diantara kristal. Densitas dan interaksi antara atom yang satu dengan atom lainnya dan bentuk struktur mikronya adalah bervariasi yang mempengaruhi kekuatan dan keuletan/ductility dari bahan.



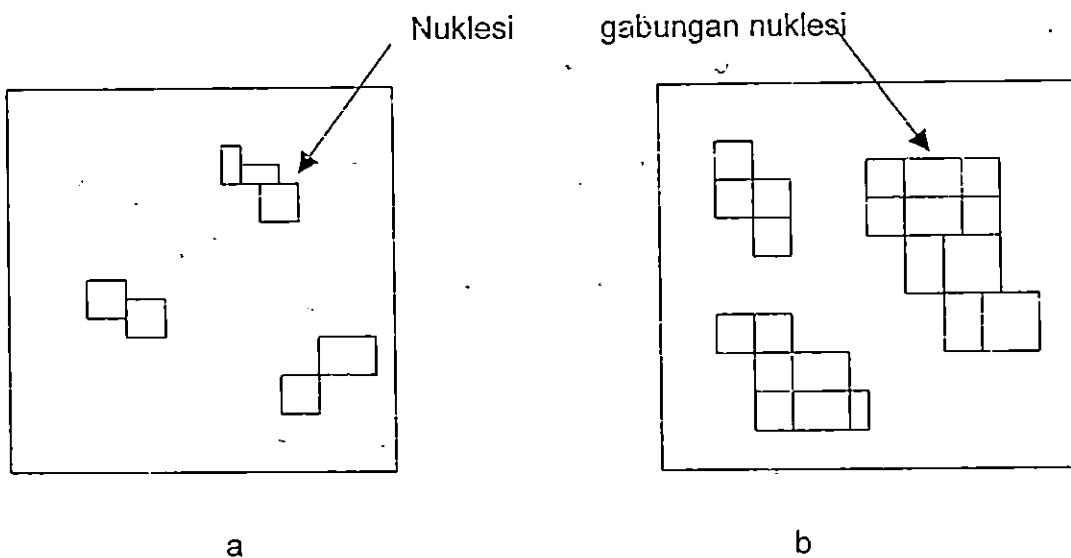
Gb. 5.8. Pergerakan dari dislokasi tepi menyebabkan terjadinya slip

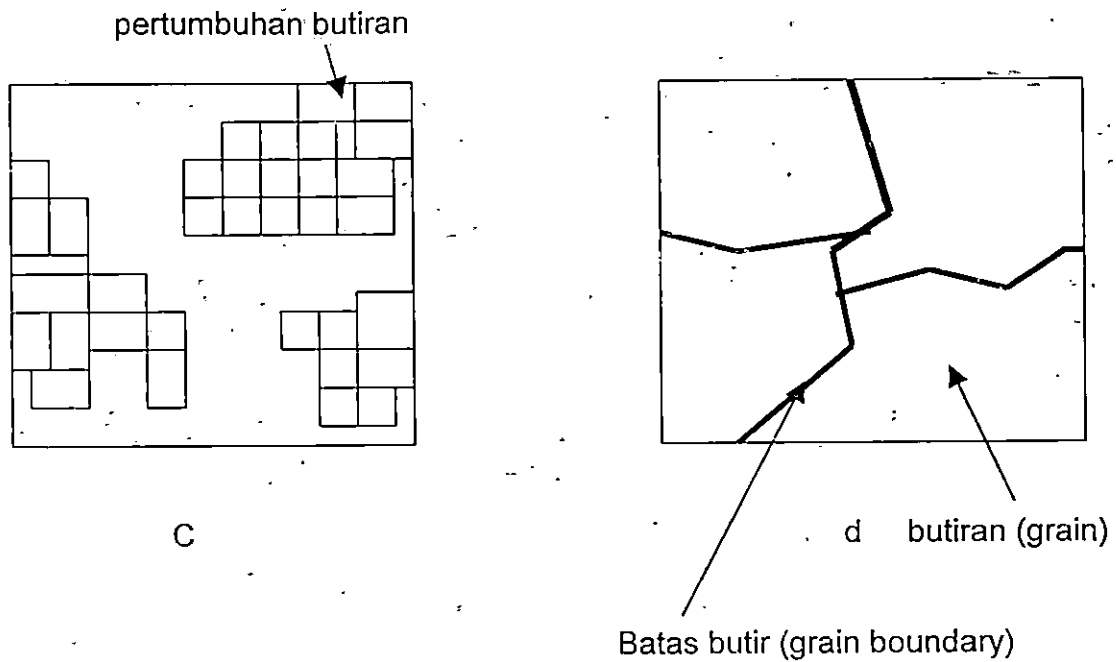
Jika dislokasi bebas bergerak, logam dapat terdeformasi dengan hanya menggunakan gaya yang kecil, oleh karenanya logam tersebut relatif lunak atau

mempunyai sifat ulet atau ductile, artinya dapat terdeformasi plastik sebelum mengalami perpatahan. Di sisi lain jika dislokasi terhalangi (diblok) logam akan lebih tahan terhadap slip, dan logam tersebut akan menjadi lebih kuat. Oleh karena itu jika pergerakan dislokasi terhalangi secara menyeluruh, maka logam akan menjadi getas (brittle). Setelah beberapa kali logam mengalami deformasi, maka logam akan mempunyai sifat yang unik, yaitu menjadi lebih kuat. Fenomena ini disebut dengan "strain hardening" atau yang umumnya disebut dengan "work hardening". Lebih lanjut dibutuhkan adanya mekanisme untuk meningkatkan jumlah dislokasi dalam logam untuk dapat terjadinya deformasi. Sebagai hasilnya probabilitas interaksi dislokasi dan oleh karenanya kekuatan logam meningkat dengan besarnya deformasi plastik.

#### D. Struktur Logam Polikristalin

Sejauh ini logam telah kita pertimbangkan sebagai kristal tunggal yang terdiri dari kisi yang seragam/uniform dengan cacat titik dan cacat garis. Oleh karenanya hampir semua logam mempunyai butiran, dan antara butiran dibatasi dengan batas butir. Butiran terbentuk karena pada saat pendinginan/pembekuan logam cair tidak membeku secara serempak. Pertama-tama dalam pembekuan terbentuk nukleasi yang kecil, dan selanjutnya tumbuh dan saling mengikat satu sama lainnya. Gambar skematis proses pembentukan padatan dapat dilihat pada gambar berikut ini.





Gb. 5.9. Tahapan dalam proses pembekuan/solidifikasi logam

Butiran pada logam merupakan struktur yang terkecil pada logam yang dapat dilihat dengan menggunakan mikroskop. Bentuk butiran dan ukurannya sangat bervariasi tergantung pada jenis logamnya. Butiran yang kasar berdiameter 0,5 mm, dan yang halus kira-kira 0,005 mm. Bentuk butiran dan ukurannya dapat dikontrol dengan proses perlakuan panas dan proses fabrikasi.

Butiran dan batas butir pada logam adalah sangat penting karena akan sangat berpengaruh terhadap sifat logam tersebut. Batas butir merupakan daerah yang mempunyai energi yang besar, dan daerah batas butir ini mudah menerima serangan atau merupakan daerah yang sangat lemah dibandingkan dengan butirannya, sehingga apabila logam ditempatkan pada lingkungan yang korosif maka daerah batas butir akan pertama sekali mengalami korosi. Korosi demikian disebut dengan korosi batas butir. Permasalahannya kenapa daerah batas butir adalah daerah paling lemah?

Dalam proses pembekuan (pembentukan kristal padat atau solidifikasi), bahan-bahan pengotor yang ada pada cairan /lelehan logam akan terakumulasi pada daerah batas butir, karena daerah ini pembekuannya adalah paling lambat/akhir. Disamping itu pada proses difusi, maka atom-atom akan mudah

dan cepat lewat pada daerah batas butir tersebut, sehingga keadaan ini juga menguntungkan.

Jika suatu logam mengalami deformasi plastis, berarti mengalami kenaikan densitas dislokasi, maka butiran akan terdeformasi dan struktur butiran akan terganggu, serta jika deformasi terus berlanjut sampai batas maksimumnya (limitnya), maka logam akan mengalami perpatahan. Oleh sebab itu logam yang dikerjakan secara dingin dengan beban pengerjaan yang berat, setelah dibentuk kemudian dilakukan proses annealing (pemansan pada temperatur relatif rendah). Proses ini akan melunakkan logam dengan jalan menghilangkan tegangan dalam (internal stress), menurunkan densitas dislokasi, dan menyebabkan terbentuknya butiran baru. Butiran yang terbentuk sangat tergantung dari temperatur annealing. Jika butiran yang terbentuk, sangat besar maka akan memberikan sifat logam lunak dan ulet/ductile, dan jika butiran yang terbentuk sangat halus maka akan memberikan logam yang kuat. Proses annealing adalah merupakan proses yang sangat penting untuk mengubah sifat mekanis dari logam.

#### E. Paduan

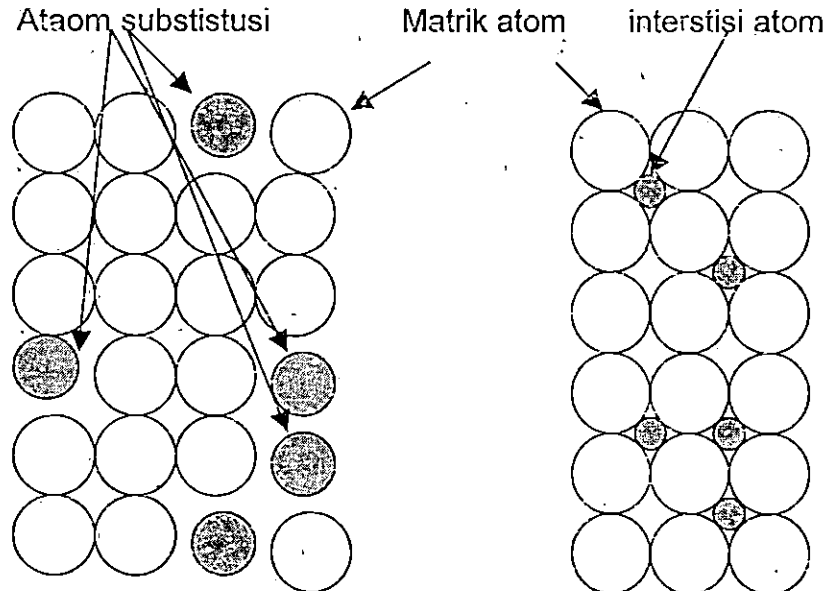
Logam dalam keadaan murni jarang digunakan untuk keperluan rekayasa, hal ini dikarenakan kekuatannya sangat rendah. Hampir semua bahan logam yang digunakan dalam rekayasa adalah kombinasi dari dua atau lebih logam yang dikenal dengan nama paduan. Meskipun logam pemadu dalam jumlah yang kecil tetapi dapat memberikan perubahan sifat yang signifikan. Sebagai contoh besi murni adalah logam yang sangat lunak, tetapi dengan penambahan 0,1% karbon dapat meningkatkan kekuatannya untuk membuat besi merupakan bahan yang sangat berguna untuk keperluan rekayasa permesinan. Dengan adanya sejumlah kecil krom, nikel dan sejumlah kecil unsur lainnya dapat meningkatkan kekuatan dan meningkatkan sifat dapat diperlakukan panas (heat treatment). Penambahan 12% krom kedalam besi, besi secara dramatis akan menjadi tahan korosi, dan besi tersebut berubah menjadi baja tahan karat. Oleh karenanya mempelajari tentang paduan dan perbedaan-perbedaan dari berbagai elemen dapat berkombinasi adalah sangat penting dalam memahami sifat-sifat logam.

Unsur logam dan non logam dapat berkombinasi dalam banyak cara yang berbeda untuk membentuk paduan. Unsur-unsur tersebut mungkin terlarut secara sempurna dalam logam seperti air yang dipadukan dengan alkohol, tetapi mungkin juga akan membentuk senyawa kimia yang mungkin tetap terpisah seperti air dengan minyak.

Untuk menentukan paduan-paduan apa yang terjadi para ahli logam menggunakan diagram fasa atau diagram kesetimbangan untuk menganalisisnya. Fasa dapat berbentuk padatan, cairan dan gas, serta bisa berupa bahan murni atau berupa larutan/senyawa. Oleh karena campuran alkohol dan air adalah fasa tunggal, tetapi air dan minyak akan membentuk 2 (dua) fasa yang berbeda. Diagram fasa menunjukkan apakah fasa itu stabil komposisinya dengan perubahan temperatur dan perubahan paduannya?

#### a. Larutan Padat

Jika unsur atau elemen semuanya terlarut dalam unsur lainnya mereka membentuk larutan padat. Keadaan atau kejadian ini dapat terjadi melalui 2 (dua) cara seperti yang ditunjukkan pada gambar 5.10



Gb. 5.10. Larutan padat substitusi dan larutan padat interstisi

Dalam larutan padat substitusional atom terlarut mengambil tempat pada

susunan atom-atom pada kisi, sehingga atom yang dilarutkan tadi mengambil tempat pada susunan atom didalam kisi. Contoh tembaga akan terlarut dalam nikel dalam semua perbandingan dan membentuk larutan padat. Jika diameter atom dari dua atom (atom terlarut /substitusi dan atom yang tersusun) perbedaannya lebih dari 15% dapat diharapkan atom yang terlarut/substitusi akan terbatas. Contoh timah hitam dan timah putih kelarutannya satu dengan lainnya adalah terbatas.

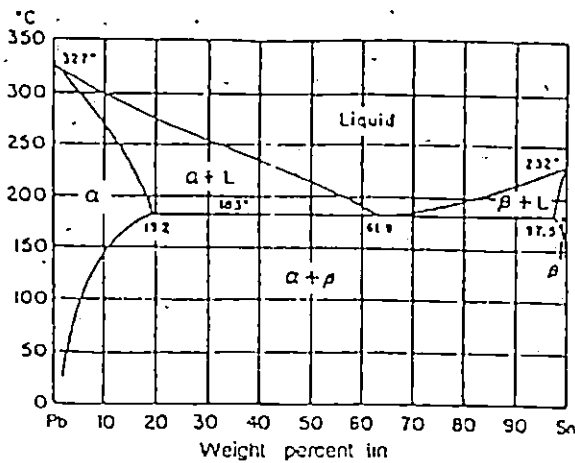
Bentuk kedua dari larutan padat adalah larutan padat interstisi. Dalam kasus ini logam terlarut adalah lebih kecil diameternya dibandingkan dengan atom-atom pelarutnya. Contoh atom karbon, nitrogen dan hidrogen dalam besi, di mana diameter ketiga atom tersebut adalah lebih kecil dari diameter atom besi.

Penambahan elemen kedua kedalam logam membuat pergerakan dislokasi menjadi lebih kuat dan kejadian ini akan mengunci dislokasi, sehingga kekuatan dari larutan padat interstisi menjadi kuat dibandingkan dengan larutan.

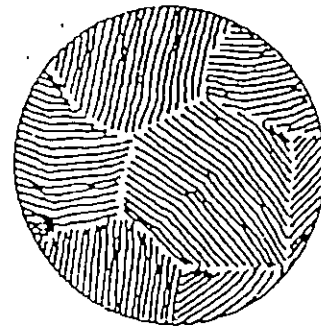
#### b. Paduan dengan Kelarutan Terbatas

Dalam sistem paduan timah hitam dengan timah putih maksimum kelarutan timah putih dalam timah hitam sebesar 20% sehingga terbentuk fasa kaya timah hitam. Dengan cara yang sama timah hitam akan melarutkan Timah hitam sebanyak 3% dan membentuk fasa kaya timah putih. Semua ini ditunjukkan pada gambar 5.11.

Jika ditambahkan timah hitam lebih dari 20% kedalam timah putih, maka struktur yang dihasilkan berupa campuran fasa kaya timah hitam dan fasa kaya timah putih. Paduan dengan 62% timah putih adalah komposisi di mana menunjukkan titik beku yang rendah dan titik tersebut disebut dengan titik eutektik. Jika cairan paduan ini didinginkan lebih lanjut, komposisinya akan tetap dalam keadaan cair sampai temperatur  $183^{\circ}\text{C}$ , kemudian ia akan membeku membentuk lapisan berlapis-lapis yang berganti-ganti, yaitu dari fasa kaya timah putih diikuti lapisan fasa kaya timah hitam dan seterusnya seperti yang ditunjukkan pada gambar 5.11.b, sampai seluruhnya membeku.



(a)



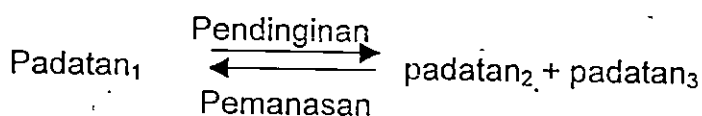
(b)

Gb. 5.11. (a) Diagram fasa Pb-Sn, (b) struktur mikro  $\alpha$  dan  $\beta$  eutektik

Struktur eutektik dikenal dengan struktur lamellar yang mempunyai sifat mekanik yang baik. Jika suatu lapisan bersifat keras dan kuat, sementara lapisan lainnya lunak dan ulet, maka kombinasi keduanya menjadikan bahan tersebut kuat dan tangguh.

Jika paduan mengandung sedikit timah putih dibandingkan dengan komposisi eutektik (hypoeutektik) maka fasanya merupakan campuran dari fasa alpha ( $\alpha$ ) dan fasa eutektik. Paduan yang mengandung timah putih yang lebih besar dari eutektiknya (hypereutektik) maka fasanya terdiri dari campuran fasa beta ( $\beta$ ) dan fasa eutektik. Reaksi eutektik umumnya terjadi dalam sistem paduan. Contoh lain ialah paduan antara timah hitam dengan antimon, tembaga dengan perak dan aluminium dengan silisium.

Ada banyak mekanisme pembekuan yang lain. Eutektoid adalah berkaitan secara dekat dengan eutektik, tetapi dibentuk dari pecahnya larutan padat menjadi atau membentuk 2 (dua) fasa padatan yang berbeda.





c. Senyawa Kimia

Satu atau beberapa senyawa kimia mungkin terbentuk dalam banyak sistem paduan, di mana ikatan dari komponen atau unturnya cukup kuat. Ikatan tersebut berupa komposisi yang pasti seperti  $\text{Fe}_3\text{C}$  dalam sistem besi karbon, atau  $\text{Mg}_2\text{Sn}$  dalam sistem magnesium-timah putih. Suatu fasa padatan tunggal ditunjukkan sebagai garis vertikal dan cenderung memecah diagram kesetimbangan kedalam sub daerah yang dikenali. Keadaan ini dikenal sebagai senyawa intermetalik. Senyawa jenis ini biasanya sangat keras dan getas dan sering dalam bentuk partikel kecil yang terisolasi didalam matriknya.

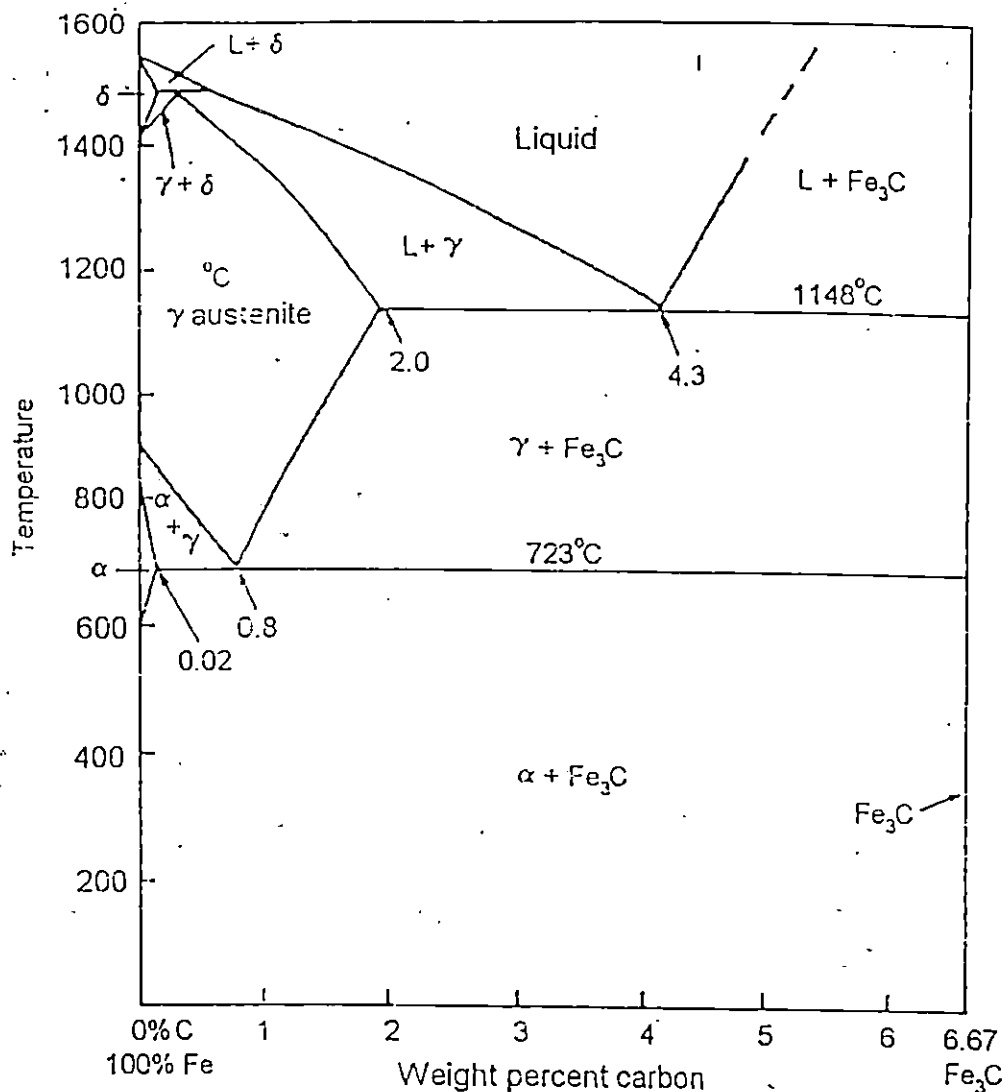
Dalam bentuk ini ia akan memberikan batas yang sangat baik untuk pergerakan dislokasi sehingga akan memberikan penguatan yang sangat besar pada logam. Proses ini dikenal dengan sebutan "precipitation hardening", oleh karenanya jika jumlahnya besar logam akan menjadi getas dan kurang banyak digunakan dalam bidang rekayasa permesinan.

d. Diagram Kesetimbangan Besi-Karbon

Besi cor dan baja, keduanya merupakan logam yang mengandung besi dan karbon dan merupakan bahan rekayasa yang sangat penting. Dalam diagram kesetimbangan besi-karbon menunjukkan paduan antara besi dan karbon, yang meliputi dari besi murni sampai besi yang mengandung 6,67% karbon. Di samping itu juga ditunjukkan senyawa intermetalik  $\text{Fe}_3\text{C}$  yang dikenal sebagai sementit. Paduan yang mengandung karbon lebih dari 2% disebut dengan besi cor. Titik eutektik pada diagram ditunjukkan pada kandungan karbon 4,3%, dan temperatur  $1148^\circ\text{C}$ , yang merupakan struktur penting dalam besi cor. Sedangkan baja adalah kandungan karbonnya kurang dari 2% dan merupakan bahan yang sangat penting dalam rekayasa.

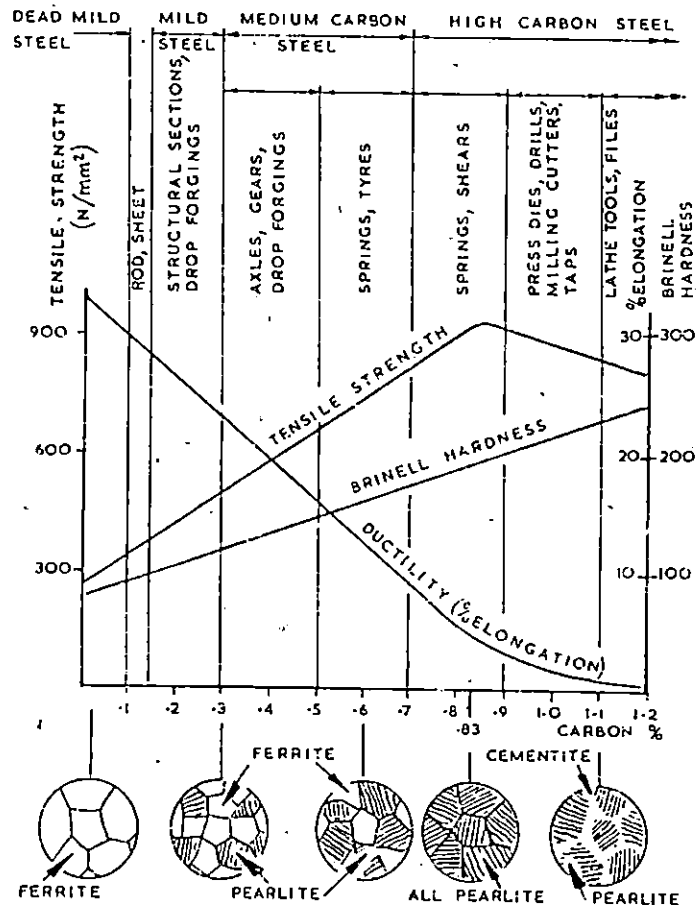
Pada temperatur  $723^\circ\text{C}$  dan kandungan karbon 0,80% merupakan titik eutektoid. Baja pada komposisi ini dan berada pada daerah diatas temperatur  $723^\circ\text{C}$  mempunyai struktur yang dikenal dengan austenit, atau besi gamma ( $\gamma$ -Fe) dengan struktur kristal face centre cubic (FCC). Semua karbon dilarutkan dalam larutan padat dalam fasa ini. Sifat austenit cenderung lunak, ulet tetapi

hanya terjadi pada temperatur yang tinggi dalam baja karbon. Di bawah temperatur eutektoid besi bertukar menjadi dua fasa dalam struktur lamellar. Satu fasa terdiri dari hampir semua besi murni yang dikenal dengan nama "ferrit" atau besi alpha ( $\alpha$ -Fe) dan berupa larutan padat interstisi dengan struktur kristal body centre cubic (BCC). Sedangkan fasa yang satunya lagi adalah fasa sementit. Kombinasi lamellar dari ferrit yang lunak dan sementit yang keras bukan merupakan fasa dan diberi nama sebagai "pearlite". Pearlit adalah sangat kuat, tetapi getas.



Gb. 5.12. Diagram ksetimbangan besi-karbon

Hampir semua baja yang mengandung karbon kurang dari komposisi eutektoid dikenal sebagai baja hypoeutektoid, dan mengandung ferrit bebas dan pearlit. Semakin rendah kadar karbonnya perbandingan ferrit bebas semakin besar. Peningkatan kandungan karbon akan meningkatkan kekuatan, tetapi menurunkan keuletannya seperti ditunjukkan pada gambar 5.13 ini.



Gb. 5.13. Hubungan kekuatan, kekerasan, dan keuletan dengan kandungan karbon

Perakuan panas dari baja melibatkan pemanasan dan pendinginan logam pada keadaan ketidaksetimbangan dan diagram kesetimbangan adalah sedikit sekali digunakan dalam banyak proses perlakuan panas.

Pengerasan baja dilakukan dengan jalan memanaskannya sampai ke daerah austenit sehingga semua karbon dilarutkan untuk membentuk fasa tunggal, kemudian dilakukan pendinginan cepat (quenching). Hasil dari proses pendinginan ini transformasi ke ferrit dan sementit tidak bisa berlangsung karena tidak cukup waktu, sehingga terbentuk struktur baru yang dikenal sebagai "martensite". Sifat dari hasil pendinginan cepat tersebut baja menjadi sangat keras, tetapi sangat rapuh dan tidak dapat dimanfaatkan sebagai bahan rekayasa. Untuk memperbaiki sifatnya dilakukan pemanasan lanjutan pada temperatur  $200^{\circ}\text{C}$  sampai  $500^{\circ}\text{C}$  di mana selama pemanasan ini tegangan-tegangan yang terjadi sewaktu proses quenching akan dihilangkan dan terjadilah pengendapan karbida. Proses di atas disebut dengan tempered martensit, dan hasil proses tempering ini ialah baja menjadi kokoh. Dengan pengontrolan temperatur pada proses tempering akan diperoleh baja dengan kekuatan yang bervariasi dan sifat-sifat lainnya dapat diperoleh.

Baja paduan mengandung fasa yang sama dengan yang ditemukan dalam baja karbon. Jenis elemen padu yang ditambahkan adalah untuk mengubah sifat-sifat baja dalam beberapa jalan. Sebagai contoh, sejumlah kecil titanium, vanadium atau niobium membentuk endapan karbida yang meningkatkan kekuatan baja. Mangan, silikon dan aluminium ditambahkan ke dalam baja untuk menghilangkan oksigen dari baja selama pelelehan. Krom, nikel, dan molibdenum meningkatkan kekuatan dan sifat-sifat perlakuan panas. Prosentase dari elemen-elemen tersebut secara besar digunakan dalam pembuatan baja tahan karat. Untuk mendapatkan sifat-sifat khusus pada baja paduan banyak digunakan elemen atau unsur lain selain unsur tersebut di atas. Penambahan unsur yang terlalu besar prosesentasenya dapat mengakibatkan ketidak stabilan fasa, sebagai contoh penambahan krom yang besar atau mangan akan menjadikan austenit stabil pada temperatur kamar, dan paduan tertentu menjadi lunak, dan baja dengan fasa tunggal tidak dapat diperlakukan panas (heat treatment), tetapi baja tersebut dapat dikeraskan dengan "work hardening".

#### e. Paduan Lain yang Penting

Aluminium dipadukan dengan batas penambahan yang tertentu dan dapat dilakukannya pemanasan untuk meningkatkan sifat-sifatnya. Mangan dan magnesium ditambahkan untuk membentuk larutan padat dengan aluminium yang mana memberikan pengaruh yang kecil pada sifat-sifatnya, tetapi paduan tertentu dapat dikeraskan dengan proses work hardening. Paduan aluminium dengan kandungan sedikit seng, lithium atau tembaga dapat dilakukannya pemanasan untuk membentuk paduan dimana kekuatannya dapat diperoleh dengan precipitation hardening. Paduan ini dapat dilakukannya pemanasan dalam cara tertentu dengan menahan pada temperatur yang rendah sehingga menyebabkan pengendapan tumbuh dan kekuatannya akan meningkat. Proses tersebut biasa disebut dengan "age hardening", dan dengan menggunakan temperatur dan waktu untuk ageing yang spesifik dapat dihasilkan kekuatan yang optimum. Aluminium paduan yang mengandung tembaga sayangnya rentan terhadap korosi.

Tembaga juga sering dipadukan dengan logam-logam seperti seng, timah putih, aluminium dan logam lainnya untuk meningkatkan kekuatan dan sifat-sifat lainnya. Beberapa paduan ini adalah berfasa tunggal dan kekuatannya diperoleh dengan pengerasan larutan padat (solid solution hardening). Kuningan (Cu-Zn) adalah fasa tunggal alpha ( $\alpha$ ) sampai kandungan sengnya mencapai 37%, fasa tunggal beta ( $\beta$ ) diatas 45% kandungan sengnya, dan menjadi dua fasa ( $\alpha$ - $\beta$ ) diantara kandungan 37%-45% seng. Kuningan berfasa  $\alpha$  mempunyai sifat kokoh dan dapat dengan mudah dikerjakan meskipun kuningan dengan fasa  $\alpha$ - $\beta$  lebih kuat tetapi kurang ulet atau keuletannya sangat kurang. Bronze dengan kandungan timah putih sampai 7% berfasa tunggal  $\alpha$ , dan berfasa ganda jika kandungan timah putihnya diatas 7%. Paduan dengan fasa tunggal adalah lebih ulet dan biasanya dirol atau ditarik dalam pembentukannya.

#### F. Pengelasan

Pengelasan merupakan prosedur fabrikasi yang umum dilakukan untuk penyambungan benda kerja/konstruksi. Penggunaan panas dapat mempengaruhi

sifat mekanik, metalurgi dan sifat ketahanan korosi dari logam induknya. Panas pengelasan dapat menyebabkan transformasi fasa, atau terjadinya presipitasi atau masalah mungkin dapat menimbulkan tegangan dalam atau disekitar daerah pengelasan.

Dengan proses pendinginan yang cepat maka hasil pengelasan akan menjadi getas karena terbentuknya struktur martensit. Retak dalam daerah HAZ (heat affecting zone) sangat tergantung pada komposisi baja dan kandungan hidrogen. Untuk menghindari hal-hal yang telah diuraikan di atas, maka digunakan atau dilakukan prosedur khusus pengelasan. Pengelasan juga dapat menyebabkan terjadinya pengendapan krom karbida dalam daerah batas butir pada baja tahan karat yang secara dramatis akan mempengaruhi sifat ketahanan korosinya.

Proses pengelasan yang jelek akan mengakibatkan terjadinya porositas, inklusi terak, dan kesalahan lain yang dapat memicu terjadinya korosi. Proses pembekuan lasan akan dapat menyebabkan terjadinya tegangan sisa dan akan menyebabkan terjadinya korosi retak tegang atau stress corrosion cracking.

#### G. Perpatahan dan Pengujian Patah

Patah dapat didefinisikan sebagai terpisahnya bahan padat menjadi dua bagian atau lebih. Sifat perpatahan bervariasi dengan jenis materialnya dan dapat dipengaruhi oleh sifat tegangan yang diaplikasikan, kondisi temperatur, laju regangan dan faktor-faktor lingkungan lainnya. Perpatahan dapat dibagi menjadi dua kategori yaitu patah ulet dan patah getas, tetapi juga dapat dikombinasikan keduanya. Perlu diperhatikan atau dicatat bahwa bentuk dari perpatahan pada suatu logam dapat berubah yaitu tergantung pada faktor-faktor eksternal. Bentuk perpatahan getas yang kadang-kadang disebut dengan cleavage fracture adalah:-

1. mempunyai shiny, penampakan granular sebagai hasil perpatahan cleaving sepanjang bidang kristalografi.
2. Dihasilkan dari penjarangan retak yang sangat cepat dengan deformasi plastik yang kecil atau bahkan tidak terjadi deformasi plastik.
3. Dapat intergranular jika adanya penggetasan (embrittlement), tetapi biasanya adalah transgranular.

4. Terjadi pada logam dengan struktur BCC, tetapi tidak pada logam dengan struktur HCP kecuali jika terjadi penggetasan.

Perpatahan ulet, kadang-kadang disebut dengan shear fracture, mempunyai bentuk perpatahan sebagai berikut:

1. Permukaan perpatahan tumpul, dan penampakannya fibrous
2. Terjadi setelah adanya plastik deformasi yang ekstensif dan penjalaran retakannya lambat
3. Prosesnya terjadi sebagai akibat slip yang ekstensif

Perpatahan getas harus dihindari karena akan berakibat fatal seperti runtuhnya konstruksi dan berakibat kecelakaan kerja yang sangat besar. Untuk itu permasalahan perpatahan getas ini harus sudah menjadi pertimbangan utama dalam perencanaan.

Beberapa logam khususnya mild steel adalah kokoh dan ulet pada temperatur yang tinggi dan getas pada temperatur yang rendah. Faktor lain yang dapat meningkatkan kecenderungan terjadinya perpatahan getas adalah adanya takikan dan laju regangan yang tinggi. Pengujian yang umum dilakukan untuk melihat kecenderungan perpatahan getas adalah dengan metoda "Charpy Impact Test". Pengujian ini dilakukan untuk mengukur energi yang dibutuhkan untuk memecahkan/mematahkan batang standar /benda uji bertakik. Logam ulet untuk bisa patah memerlukan energi yang lebih besar dibandingkan dengan logam yang getas. Tes impact ini juga bisa digunakan untuk mencari temperatur transisi dari keadaan ulet menjadi getas, di mana terjadi pada temperatur yang diturunkan. Semakin rendah temperatur transisinya, maka semakin baik sifat impaknya. Temperatur transisi tergantung pada sejumlah variabel. Peningkatan kandungan karbon akan menaikkan temperatur transisi, jadi meningkatkan kekuatan baja, artinya meningkatkan sifat getas dari baja. Fosfor dan nitrogen juga menaikkan temperatur transisi. Mangan dan nikel keduanya menurunkan temperatur transisi. Pengurangan ukuran butiran juga dapat menurunkan temperatur transisi dan meningkatkan kekuatan baja dan meningkatkan sifat – sifat baja.

## BAB VI

### JENIS-JENIS KOROSI METALIK

#### A. Pendahuluan

Pengklasifikasian korosi didasarkan pada penampakan korosi dan penyebabnya atau berdasarkan kombinasi keduanya. Pengklasifikasian ini dapat digunakan untuk menentukan penyebab kegagalan atau kerusakan karena korosi dan juga dapat digunakan untuk menentukan metoda atau cara untuk meminimumkan kerusakan lebih lanjut atau kerusakan di masa mendatang. Dalam bab ini akan dibahas mengenai beberapa jenis korosi untuk logam (metallic corrosion) yang meliputi:

1. Korosi merata
2. Korosi galvanik
3. Korosi celah
4. Korosi filiform
5. Korosi sumuran
6. Korosi intergranular
7. Penggetasan hidrogen (Hydrogen embrittlement)
8. Korosi fatik
9. Korosi arus sesat
10. Korosi retak tegang

Tujuan instruksional yang akan dicapai pada pembahasan jenis-jenis korosi ini ialah:

Setelah belajar dan membaca materi perkuliahan yang tercakup pada bab ini, mahasiswa diharapkan dapat:

1. Menyebutkan jenis-jenis korosi pada logam, dan menjelaskan mekanisme terjadinya korosi tersebut.
2. Menjelaskan cara-cara mencegah atau meminimumkan laju korosi pada masing-masing jenis korosi metalik.



## B. Jenis-jenis Korosi Logam

### 1. Korosi Merata

Korosi merata adalah bentuk korosi yang paling umum, seperti namanya maka korosi ini merata diseluruh permukaan logam. Contoh baja yang dicelup dalam air laut atau dicelupkan dalam larutan asam belerang akan mengalami korosi merata, dan tembaga akan terkorosi dalam lingkungan atmosfer.

Korosi ini terjadi karena anoda dan katoda selalu berpindah-pindah/berubah secara terus menerus di permukaan logam. Laju korosi pada beberapa jenis logam adalah berbeda, seperti ditunjukkan pada tabel dibawah ini.

Tabel 1. Laju korosi pada air laut yang bergerak lambat atau diam

Jenis Logam	Laju Korosi rata-rata (mm/tahun)	Catatan
Mild Steel	0,13	
Baja Tahan Karat (304)	0	Deep pitting
Baja Tahan Karat (316)	0	Deep pitting
Tembaga	0,04	
Kuningan (70%Cu-30%Zn)	0,05	Dezincification
Kuningan (60%Cu-40%Zn)	0,06	Desensifikasi
Arsenial Admiralty Brass (Cu-29%Zn-1%Sn-0,04%As)	0,05	
Aluminium Bronze	0,04	Korosi sumuran
Cupro Nikel	0,01	Korosi sumuran
Nikel	0,02	Korosi sumuran yang parah
Monel (70%Ni-30%Cu)	0,02	Korosi sumuran (laju menurun seiring dengan waktu)
Timah Hitam	0,01	
Seng	0,02	
Titanium	0	

Korosi atmosferik pada logam ferro dan non ferro adalah bentuk yang umum korosi dan menunjukkan destruksi/kerusakan yang paling besar. Korosi

merata kurang berbahaya karena bentuk korosinya nampak dan umur komponen dapat secara akurat diperkirakan. Jarang terjadi kerusakan pada korosi merata terjadi secara tiba-tiba. Bentuk korosi yang lain (selain korosi merata) perilakunya sulit diperkirakan, sebagai contoh korosi setempat di mana pada korosi ini cenderung mengakibatkan kerusakan prematur.

## 2. Korosi Galvanik

Korosi galvanik terjadi jika dua logam atau lebih dari jenis yang tidak sama digabungkan atau dihubungkan secara listrik, dan ditempatkan dalam elektrolit. Hasilnya ialah karena adanya perbedaan potensial diantara logam-logam tersebut maka terjadi arus listrik antara kedua logam tersebut. Dalam galvanic series logam yang lebih noble menjadi katodik, dan logam yang kurang noble menjadi anodik yang merupakan daerah di mana terjadi proses korosi, atau daerah anodik merupakan daerah aktif untuk berlangsungnya korosi. Korosi galvanik lebih dikenal sebagai bimetallic corrosion, atau juga sering disebut sebagai "dissimilar metal corrosion". Unsur penting untuk dapat terjadinya korosi galvanik, adalah:

- a. Adanya dua logam yang mempunyai potensial permukaan yang berbeda
- b. Adanya elektrolit (umum)
- c. Adanya kawat penghantar/penghubung diantara kedua logam.

Tanda terjadinya korosi galvanik ialah bahwa korosi hanya terjadi pada satu logam (logam dengan potensial antarmuka yang lebih kecil), dan logam yang satunya lagi tidak terkorosi atau bebas serangan korosi (sebagai katoda). Faktor-faktor yang mempunyai kontribusi dalam korosi galvanik, adalah:

### a. Perbedaan potensial

Logam yang lebih aktif pada penggabungan logam dalam galvanic series akan terkorosi. Potensial antarmuka logam dipengaruhi oleh lingkungan seperti terbentuknya lapisan film pasif di permukaan logam. Untuk itu galvanic series diukur pada setiap lingkungan. Oleh sebab itu hampir semua pengukuran potensial galvanic series dikonstruksi dalam air laut (sebagai elektrolit), di mana telah digunakan secara luas.

b. Polarisasi katodik

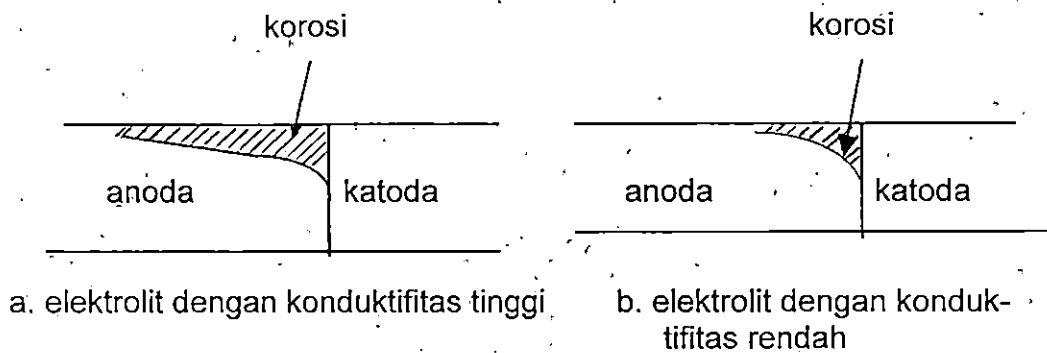
Jika katoda tidak dilapisi film oksida atau film oksida telah terkikis oleh aliran galvanik, maka reduksi oksigen terlarut akan berlangsung segera, dan logam-logam seperti platina, emas, perak, tembaga dan lainnya akan bertindak sebagai katoda yang efisien. Oleh karenanya jika reduksi berlangsung pada film oksida yang stabil reaksi cenderung lebih banyak terpolarisasi, sehingga reaksinya bergerak ke arah potensial aktif, dan logam-logam seperti titanium, baja tahan karat dan aluminium akan bertindak sebagai katoda yang efisien.

c. Pengaruh luas

Laju korosi adalah proporsional langsung terhadap perbandingan luas katodik logam terhadap anodik logam. Konsekuensinya luas anoda yang kecil dan luas katoda yang besar akan mengakibatkan korosi yang parah pada daerah anodik. Kebalikannya jika luas anoda besar sedangkan luas katoda kecil, maka laju korosinya lambat, atau pengaruh galvanik sangat kecil. Jika hanya satu logam yang dicat (dilindungi dengan cat) pada sistem galvanik katoda atau logam nobel juga harus dicat atau dilapisi agar laju korosinya juga menjadi lambat.

d. Jarak dan Pengaruh Elektrolit

Serangan korosi galvanik akan menurun dengan makin jauhnya jarak tempat penggabungan logam, tetapi pengaruhnya juga tergantung pada konduktifitas larutan elektrolit, karena media aliran arus adalah penting pada peristiwa korosi. Pada larutan yang mempunyai konduktifitas tinggi serangan pada logam aktif mungkin menyebar sepanjang jarak dari daerah yang dihubungkan dan oleh karenanya korosi yang terjadi kurang parah. Pada kesempatan lain jika konduktifitas larutan rendah, misalnya korosi dapat menjadi korosi setempat pada daerah yang berhubungan saja, sehingga korosi tersebut mungkin menjadi sangat parah.



Gb.6.1. Pengaruh konduktivitas elektrolit pada distribusi korosi galvanik

Pengontrolan korosi galvanik dapat dilakukan melalui beberapa metoda yang berbeda, yaitu:

- 1) Kombinasi logam atau paduan yang dipisahkan secara jauh pada galvanik seri harus dihindarkan.
- 2) Pengontrolan lingkungan, misalnya dengan penambahan inhibitor atau oksigen scavanger.
- 3) Adanya lapisan pembatas (barrier coating) baik metallic organic atau vitreous yang dapat mengisolasi logam dari lingkungannya.
- 4) Dengan proteksi katodik dengan sistem anoda korban yaitu menggunakan logam yang lebih aktif.

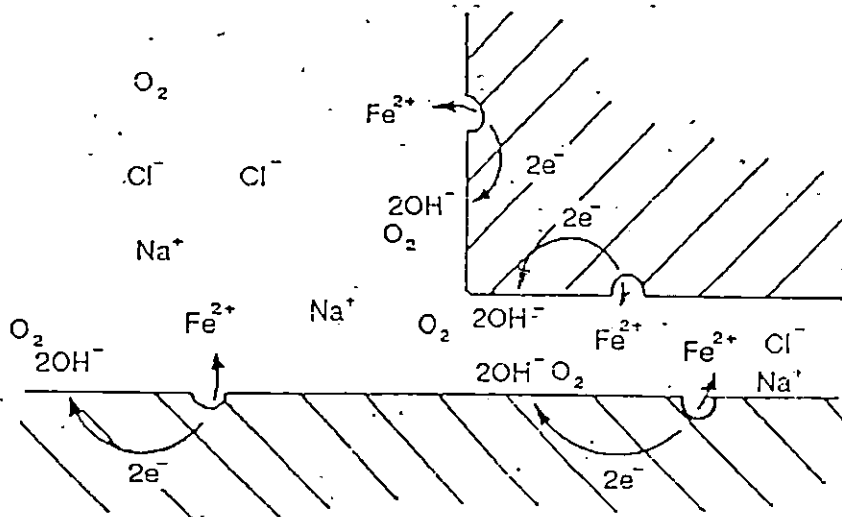
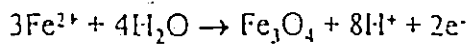
### 3. Korosi Celah

Serangan korosi setempat ini sering terjadi pada daerah celah, yang terbentuk akibat adanya konfigurasi mekanik tertentu, seperti pada lobang-lobang, pada permukaan gasket, sambungan sistem lap, adanya celah dibawah baut dan kepala paku keling. Untuk dapat terjadinya korosi celah, maka celah harus cukup lebar untuk bisa masuknya larutan/cairan, dan cukup sempit untuk menjaga daerah tetap stagnan (menggenang). Produk korosi yang permeable (tembus) dan gasket yang fibrous (berserabut) akan membuat suatu keadaan yang ideal untuk terjadinya korosi celah.

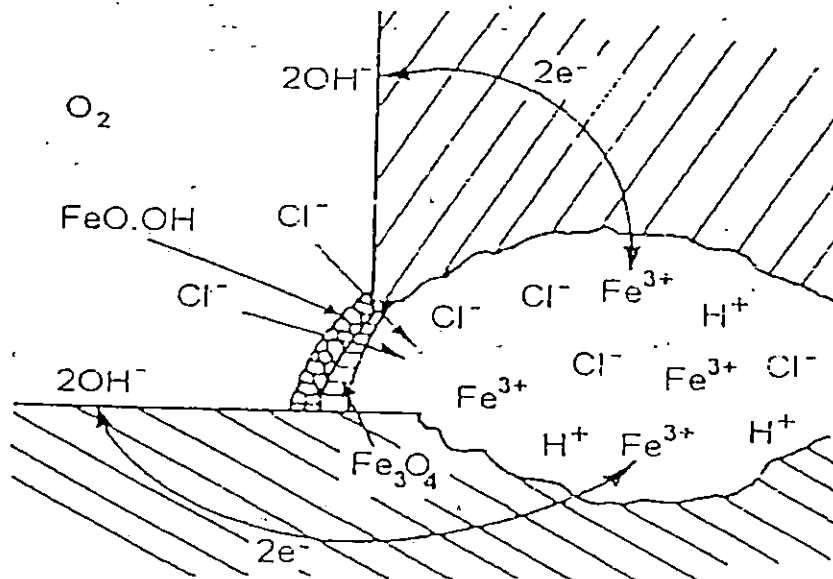
Korosi celah merupakan salah satu jenis korosi setempat yang berbahaya. Korosi ini terjadi pada logam yang mudah terpasivasi, seperti baja tahan karat. Korosi ini juga bisa terjadi pada mild steel, jika kondisi media korosi adalah sangat korosif. Korosi celah ini juga terjadi pada kondisi di

mana terjadi perbedaan konsentrasi oksigen di antara celah dan kondisi sekelilingnya. Korosi ini juga terjadi jika terjadi perbedaan pH antara daerah celah dengan sekelilingnya.

Korosi celah didefinisikan sebagai serangan yang terjadi karena sebagian permukaan logam terhalang atau terasing dari lingkungan dibandingkan bagian lain logam yang menghadap elektrolit dalam volume yang besar. Mekanisme korosi celah dapat dilihat pada gambar di bawah ini.



Gb. 6.2.a. Skema reaksi korosi celah segera setelah adanya elektrolit



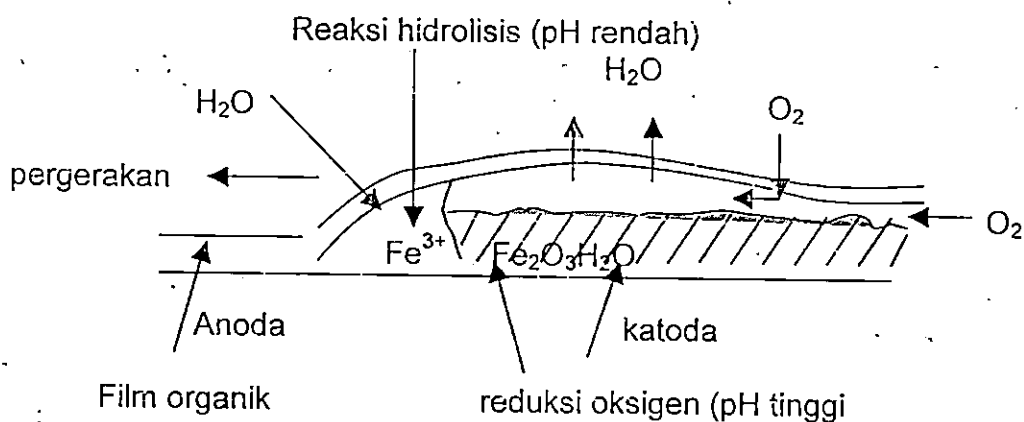
Gb.6.2.b. Skema reaksi korosi celah setelah terjadinya keadaan keasaman.

#### 4. Korosi Filiform

Korosi filiform adalah bentuk khusus dari korosi celah di mana bentuk produk korosinya menyerupai ulir yang sangat halus dan terjadi dipermukaan logam yang dilapisi dengan lapisan film cat. Korosi filiform ini teramati pada permukaan baja, sengm aluminium dan magnesium yang dilapisi oleh lapisan tipis cat.

Meskipun mekanisme dari korosi filiform ini sampai saat ini masih belum jelas, tetapi diperkirakan mekanisme korosinya menyerupai pada korosi celah. Korosinya adalah terbatas pada pada daerah aktif, di mana reaksi hidrolisis terjadi untuk menjaga lingkungan yang bersifat asam, seperti terlihat pada gambar 6.3. Korosi filiform terjadi utamanya pada daerah atmosfer dengan kelembaban relatif dari 65% sampai 99%, sehingga jenis korosi ini sangat banyak terjadi di Indonesia karena kelembaban udara kita berkisar dari angka tersebut.

Cara pencegahan dari korosi filiform adalah dengan jalan mengurangi kelembaban relatif sampai di bawah 60%, tetapi hal ini juga kurang dimungkinkan, maka untuk itu bisa dilakukan dengan memberikan primer, membuat permukaan sehalus mungkin atau dengan jalan memberikan lapisan yang lebih tebal pada permukaan logam.



Gb. 6.3 Gambar skematik korosi filiform pada permukaan baja.

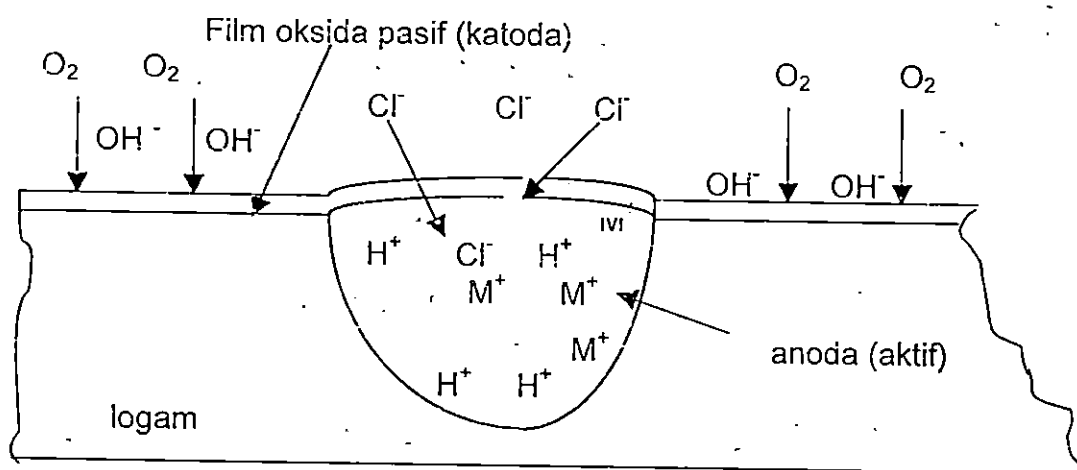
## 5. Korosi Sumuran

Korosi sumuran merupakan korosi setempat yang sangat parah dan menghasilkan lobang pada logam, sehingga menyebabkan peralatan mengalami kegagalan seperti logam yang berlobang-lobang.

Umumnya korosi sumuran terjadi pada oksida yang menutup permukaan logam seperti pada baja tahan karat atau pada logam aluminium karena rusaknya lapisan film oksida setempat yang disebabkan oleh anion agresif, khususnya ion-ion klorida.

Awal terjadinya korosi sumuran adalah adanya ion klorida yang mempenetrasi film oksida, di mana film oksida ini adalah sangat lemah, seperti inklusi non-logam yang berupa partikel sulfida yang dapat menyebabkan kerusakan setempat pada film pasif. Jika satu sumuran telah terbentuk maka produk korosi dipermukaan logam akan menghalangi difusi oksigen dari larutan ruah ke sumuran.

Reaksi hidrolisis didalam sumuran akan menjadikan keadaan larutan menjadi bersifat asam di dalam lobang (sumuran) seperti terjadi pada korosi celah. Pengasaman larutan di dalam sumuran dapat menjadikan sumuran daerah aktif, sementara permukaan bagian luar sumuran tetap pasif (lihat gambar di bawah)



Gb. 6.4. Mekanisme korosi sumuran pada logam aktif-pasif

Tahapan propagasi (penjalaran) korosi sumuran adalah identik dengan korosi celah, yaitu terbentuknya sel mikro aktif-pasif antara daerah anoda yang kecil dan bersifat asam atau pada daerah sumuran dan daerah katoda yang luas yaitu daerah pada permukaan bagian luar sumuran. Kondisi ini menghasilkan korosi yang cepat di dalam sumuran. Korosi sumuran juga "autokatalitik" seperti pada korosi celah.

Cara terbaik untuk mencegah korosi sumuran adalah:

- a. Dengan menggunakan logam-logam yang diketahui tidak akan terkena korosi sumuran pada lingkungan-lingkungan tertentu. Contohnya adalah penggunaan baja tahan karat type 316, dengan unsur paduan Molibdenum, adalah lebih tahan terhadap korosi sumuran dibandingkan dengan baja tahan karat type 304.
- b. Paduan dengan kandungan nikel yang tinggi seperti Hastelloy, atau titanium yang tahan terhadap korosi sumuran.
- c. Untuk melawan korosi sumuran dalam aluminium yang mengandung tembaga, besi dan silikon harus dijaga tetap dalam konsentrasi yang minimum dan perlakuan panas anil pada temperatur  $500^{\circ}\text{C}$  harus dicegah selama mengasihkan endapan yang bersifat noble.
- d. Selama korosi sumuran berlangsung secara elektrokimia hal ini dapat dicegah dengan proteksi katodik.
- e. Pengurangan atau penurunan lingkungan yang agresif, sebagai contoh dengan menurunkan konsentrasi ion klorida, temperatur, keadaan keasaman atau dengan penambahan inhibitor juga dapat mencegah korosi sumuran.
- f. Inhibitor harus digunakan secara hati-hati karena jika korosi sumuran tidak secara lengkap dihentikan, maka kemungkinan malahan intensitas serangannya akan menjadi lebih meningkat.
- g. Sacrificial metal coating, seperti menggunakan seng pada baja atau alclad pada aluminium atau protektif coating seperti dengan pengecatan yang tebal juga dapat mencegah penetrasi korosi sumuran.
- h. Dalam beberapa atau banyak kasus agitasi pada lingkungan dapat



mengurangi larutan yang stagnan yang dapat mencegah korosi sumuran.

#### 6. Korosi Intergranular.

Pada batas butir, atom-atom tidak tertata seperti atom-atom pada posisi kisi reguler dan oleh karenanya mudah mendapat serangan korosi dibandingkan pada bulk metal. Pada kenyataannya dalam banyak pemakaian, perbedaan dalam reaktivitas hanya menghasilkan serangan korosi merata yang relatif ringan kerusakannya.

Meskipun di bawah kondisi tertentu, kotoran-kotoran atau pengendapan mungkin akan mengakibatkan serangan setempat dan menyebabkan kegagalan setempat yang cukup parah (katastropik).

Korosi intergranular adalah bentuk serangan yang sangat kecil (kehilangan beratnya kecil) tetapi akan menghilangkan ikatan butiran, sehingga menghilangkan sifat mekanis yang ditandai dengan menurunkan sifat keuletan sebelum kehilangan kekuatannya. Contoh korosi intergranular pada baja tahan karat austenitik adalah jika baja ini ditahan pada temperatur 500-800°C atau didinginkan secara perlahan-lahan melewati batas ini pengendapan butirannya halus. Karbida krom akan tumbuh dalam daerah batas butir dan proses ini disebut dengan proses sensitisasi.

Depleksi krom pada daerah yang dekat dengan batas butir akan mengakibatkan kandungan Cr pada daerah tersebut menjadi kurang dari 12%. Sudah diketahui bahwasanya suatu baja tahan karat akan tahan terhadap serangan korosi jika kandungan Cr nya lebih besar atau sama dengan 12%. Dengan rendahnya kandungan Cr pada daerah dekat batas butir maka menjadikan baja tersebut tidak pasif sehingga menjadi terkorosi.

Korosi intergranular pada baja tahan karat austenitik dikarenakan oleh proses pengelasan yang disebut dengan "weld decay". Korosi intergranular pada baja tahan karat dapat diminimalkan dengan tiga cara, yaitu:

- a. Menurunkan batas karbon sampai dibawah 0,03% yang akan menghilangkan kemungkinan terjadinya pengendapan karbida krom. Jenis baja tersebut sering diindikasikan sebagai baja tahan karat type 304L.
- b. Menggunakan bahan tambahan titanium atau niobium yang mempunyai

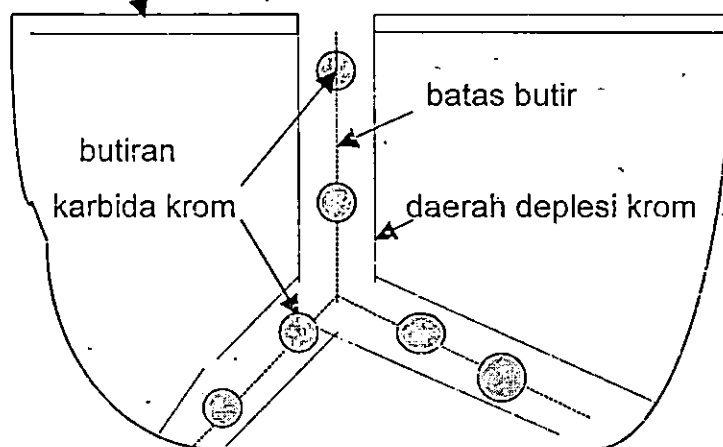
afinitas yang lebih tinggi terhadap karbon dibandingkan dengan krom. Jadi titanium dan niobium karbida akan lebih banyak diendapkan dibandingkan dengan karbida krom.

- c. Memanaskan baja tersensitisasi pada temperatur 1000-1200<sup>0</sup>C untuk melarutkan kembali karbida krom, dan kemudian mendinginkan kembali dengan air. Proses ini hanya sesuai untuk objek yang kecil dan quenching mungkin akan menyebabkan distorsi atau regangan dalam yang tidak diinginkan.

Menstabilkan baja tahan karat austenitik mungkin menjadikan baja tersebut rentan terhadap bentuk korosi intergranular setempat yang sering disebut sebagai "knife line attack". Selama proses pengelasan logam dasar yang berdekatan dengan daerah peleburan (fusion) mengalami pemanasan yang cukup tinggi, sehingga melarutkan karbida penstabil. Tetapi dengan pendinginan yang cukup cepat terutama pada daerah yang tipis.

film oksida pasif

(Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)

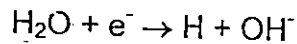


Gb.6.5. Korosi intergranular

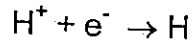
Korosi knife line attack dapat dicegah dengan metoda pengelasan dan melakukan pemanasan pada temperatur sampai 1050<sup>0</sup>C setelah proses pengelasan untuk melarutkan kembali karbida krom dan memisahkannya menjadi karbida penstabil pada baja tahan karat.

## 7. Penggetasan Hidrogen (Hydrogen Embrittlement)

Keberadaan hidrogen mungkin terjadi dari reduksi air atau asam menurut:



atau



Ion-ion hidrogen yang mudah masuk kedalam logam melalui struktur kristal pada kebanyakan logam dan paduan. Hidrogen dalam jumlah kecil dapat menyebabkan masalah pada sejumlah logam. Penggetasan hidrogen terjadi karena adanya konsentrasi yang sangat kecil ( $\pm 1$  ppm) dan dapat menghasilkan logam yang kuat menjadi lemah dan getas. Dengan jumlah hidrogen sedikit lebih tinggi dapat menyebabkan terjadinya retakan hidrogen atau yang dikenal dengan retakan yang disebabkan oleh hidrogen, flaking atau retak rambut yang terbentuk dalam logam.

Dalam lingkungan sulfida (dalam lingkungan industri minyak) ion-ion sulfida meningkatkan penetrasi ion-ion hidrogen kedalam baja yang menghasilkan retakan hidrogen yang dikenal dengan sulfida stress cracking. (retak tegang karena sulfida).

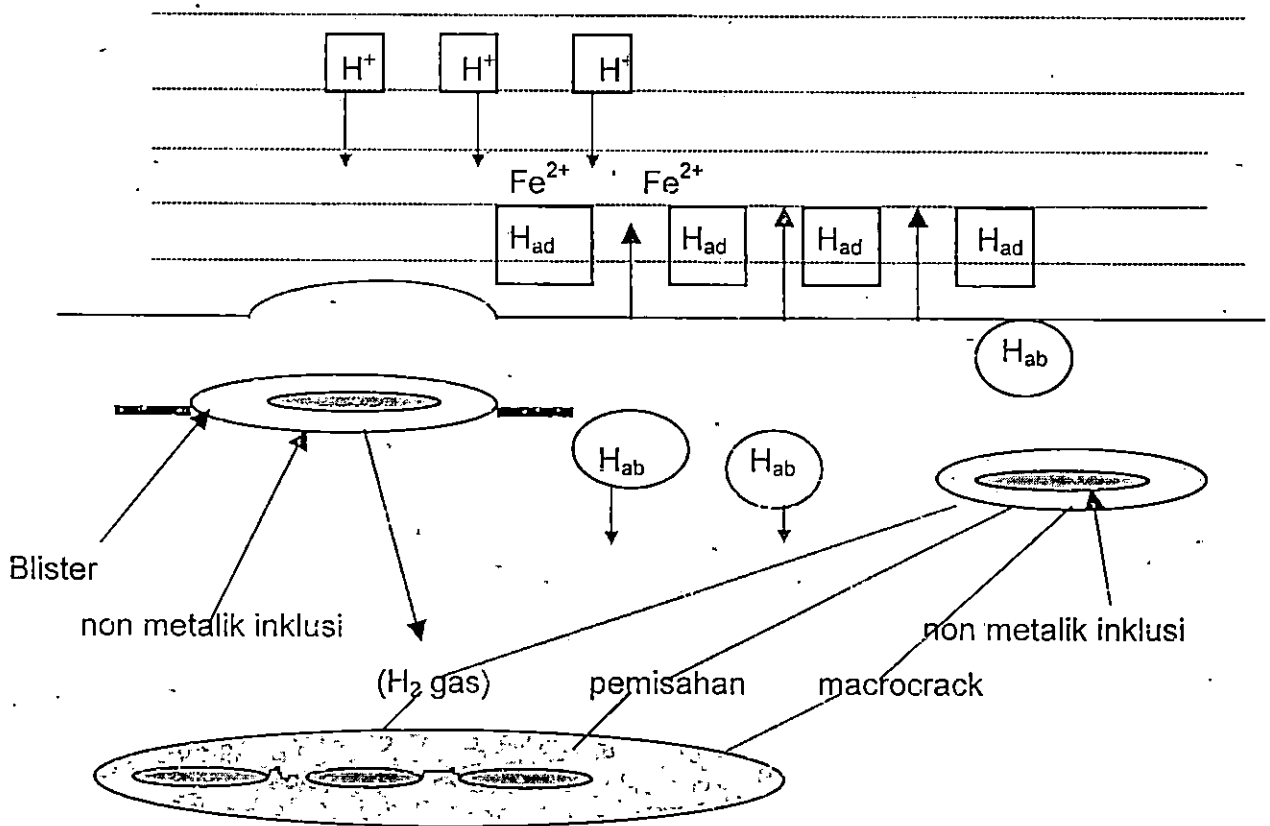
Serangan hidrogen terjadi jika ia bereaksi dengan karbon dalam baja. Pada keadaan ini temperatur dan tekanan yang tinggi akan membentuk methane yang menghasilkan retakan internal dan celah (fissure).

Masalah tertentu mungkin terjadi dalam batas yang cukup luas pada logam berkekuatan tinggi (kecuali logam dengan struktur FCC), tetapi hal ini terjadi pada baja. Hidrogen dapat diindikasikan dari adanya embun selama peleburan di mana ia terperangkap pada saat pembekuan, atau selama perlakuan panas, pengelasan, pickling, elektroplating atau pada saat pelaksanaan proteksi katodik.

Perubahan struktur mikro tidak teramati dengan adanya penggetasan hidrogen, tetapi beberapa sifat mekanik menjadi berubah. Perubahan ini merupakan pengaruh yang sangat dramatis pada laju regangan rendah dalam

pengujian tarik.

Mekanisme penggetasan masih belum diketahui secara baik, hanya diusulkan bahwa penggetasan terjadi karena atom-atom hidrogen menyelinap kedalam pergerakan dislokasi. Retakan hidrogen atau pelepuhan terjadi jika atom-atom hidrogen berdifusi kedalam logam dan berkombinasi membentuk molekul hidrogen pada rongga di dalam logam. Selama molekul hidrogen tidak dapat berdifusi, maka konsentrasi dan tekanan akan terbentuk sampai cukup untuk memecahkan bahan seperti digambarkan di bawah ini.



Gb.6.6. Penggetasan hidrogen

Kerusakan hidrogen dapat dicegah dengan:

- Mencegah hidrogen masuk kedalam logam dalam kesempatan pertama.
- Pengelasan pada kondisi yang kering dan penggunaan elektroda jenis hidrogen rendah (low hydrogen electrode).
- Pengontrolan kondisi selama pengendapan pada proses elektroplating dan proteksi katodik adalah cara penting untuk mencegah penangkapan

hidrogen.

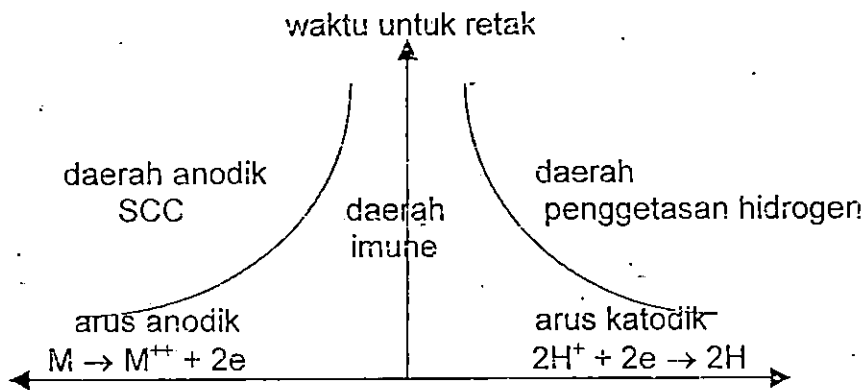
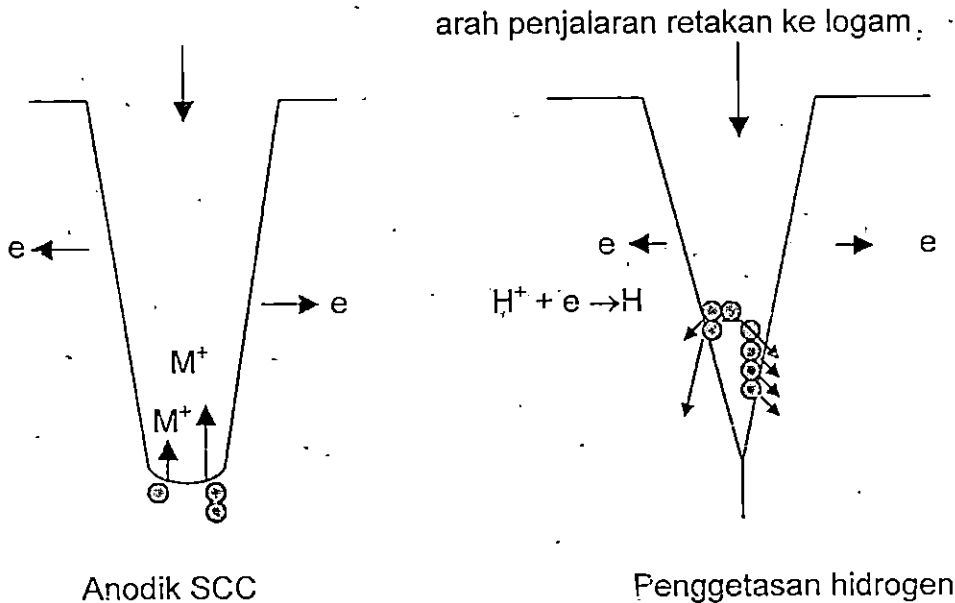
- d. Memberikan coating dan inhibitor untuk mencegah reaksi korosi dan menurunkan ketesediaan hidrogen. Jika hidrogen tetap ada dalam bentuk atomik dalam kisi logam maka hal ini dapat dihilangkan dengan membakarnya pada temperatur rendah (100-150°C).
- e. Menggunakan baja yang mengandung inklusi non metalik yang rendah, akan dapat meningkatkan ketahanan terhadap retakan dan pelepuhan karena tidak adanya rongga dalam logam. Jika adanya hidrogen tidak dapat dihindarkan, maka gunakan paduan dengan nikel sebagai base alloy, karena logam paduan ini akan lebih tahan terhadap permasalahan hidrogen dari pada baja kekuatan tinggi (high strength steel).

Perbandingan antara korosi retak tegang (SCC) dengan penggetasan hidrogen (hydrogen embrittlement) diuraikan dalam tabel berikut:

Tabel 2. Perbandingan antara korosi retak tegang (SCC) dengan penggetasan hidrogen

No	Tinjauan	SCC	Penggetasan Hidrogen
1	Awal mula terjadinya	<p>a. Apabila arus yang membuat logam lebih anodik dan mempercepat retakan</p> <p>b. Biasanya diawali terjadinya pitting.</p> <p>c. Disertai dengan adanya tegangan.</p>	<p>a. Apabila arus yang mengakibatkan retakan dalam arah katodik yang mempercepat reaksi pembentukan hidrogen.</p> <p>b. Atom hidrogen berdifusi ke dalam logam.</p> <p>c. Tidak disertai adanya tegangan.</p>
2	Proses dan mekanisme kerusakan	<p>Terjadi akibat adanya aksi gabungan tegangan dengan lingkungan yang korosif, serta kondisi bahan yang rentan. Pertama serangan terhadap bagian lokal pada permukaan yang bersifat anodik berupa pitting. Kemudian retak menjangkar yang akhirnya menyebabkan kegagalan</p>	<p>Hidrogen yang larut dalam logam adalah atom H, hasil reduksi H<sub>2</sub> dan umumnya menyebabkan distorsi pada sistem kisi yang relatif besar dan ini akan menyebabkan penggetasan</p>

3	Reaksi yang terjadi	Reaksi yang terjadi adalah reaksi anodik: $M \rightarrow M^{++} + 2e$	Reaksi yang terjadi adalah reaksi katodik: $2H^+ + 2e \rightarrow 2H$
4	Cara pencegahannya	a. Proteksi katodik b. Penggunaan coating c. Penggunaan inhibitor d. Memperendah tegangan di bawah harga ambang batas.	a. Penggunaan inhibitor b. Penggunaan coating c. Penghilangan zat-zat yang menghambat reaksi pembentukan $H_2$

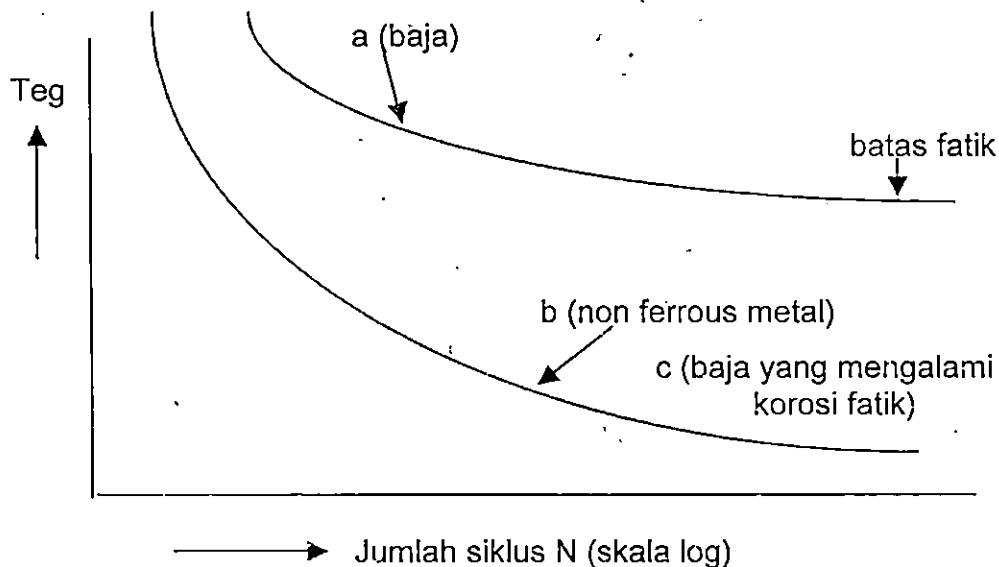


Gb. 6.7. Perbandingan antara mekanisme penggetasan hidrogen dengan SCC

## 8. Korosi Fatik

Fatig adalah kerusakan logam karena adanya beban siklik, dan terjadi di bawah kekuatan maksimumnya. Fatig adalah salah satu dari bentuk umum

kegagalan dari komponen di bawah beban yang berulang. Contohnya adalah pada poros engkol. Pengujian fatik dilakukan dengan menentukan jumlah siklus pembebanan yang menyebabkan kegagalan pada tegangan yang bervariasi yang dikenal dengan kurva S-N.



Gb.6.8. Korosi fatik

Dalam lingkungan korosif sifat fatik logam berubah, sebagai contoh pada logam ferro, batas fatiknya tidak terobservasi. Serangan tegangan siklik dan serangan kimia yang secara simultan (bersama-sama) dikenal sebagai korosi fatik. Jika konsentrasi fatik terjadi secara bersamaan, serangan kimia akan mempercepat laju pada mana retak fatik menjalar. Hasilnya adalah terjadinya penurunan kekuatan fatik yang cukup besar, meskipun hanya sebentar terekspose dalam atmosfer yang korosif.

Permukaan perpatahan pada korosi fatik sama seperti permukaan perpatahan fatik pada umumnya. Meskipun lebih banyak retakan dibentuk pada bidang tetapi perbedaan perpatahan hanya kecil. Permukaan perpatahan sering rusak akibat produk korosi.

Korosi fatik nampak merata pada media di mana selanjutnya akan membentuk korosi sumuran yang dapat menyebabkan terjadinya inisiasi/

pemicu retakan. Korosi fatik dapat dicegah dengan cara:

- a. Menurunkan tegangan pada komponen dengan mengubah rancangannya.
  - b. Melakukan pembersihan dengan metoda shoot peening pada permukaan atau dengan metoda stress relieving.
  - c. Menurunkan pengaruh atmosfer korosif seperti dengan penggunaan inhibitor, atau dengan menggunakan coating metalik dan coating organik. Di samping itu juga akan memperpanjang umur pemakaian sepanjang tidak terjadi tegangan tarik pada permukaan logam.
  - d. Pemilihan bahan di dasarkan pada sifat ketahanan korosi dari pada sifat ketahanan fisik.
9. Korosi Arus Sesat

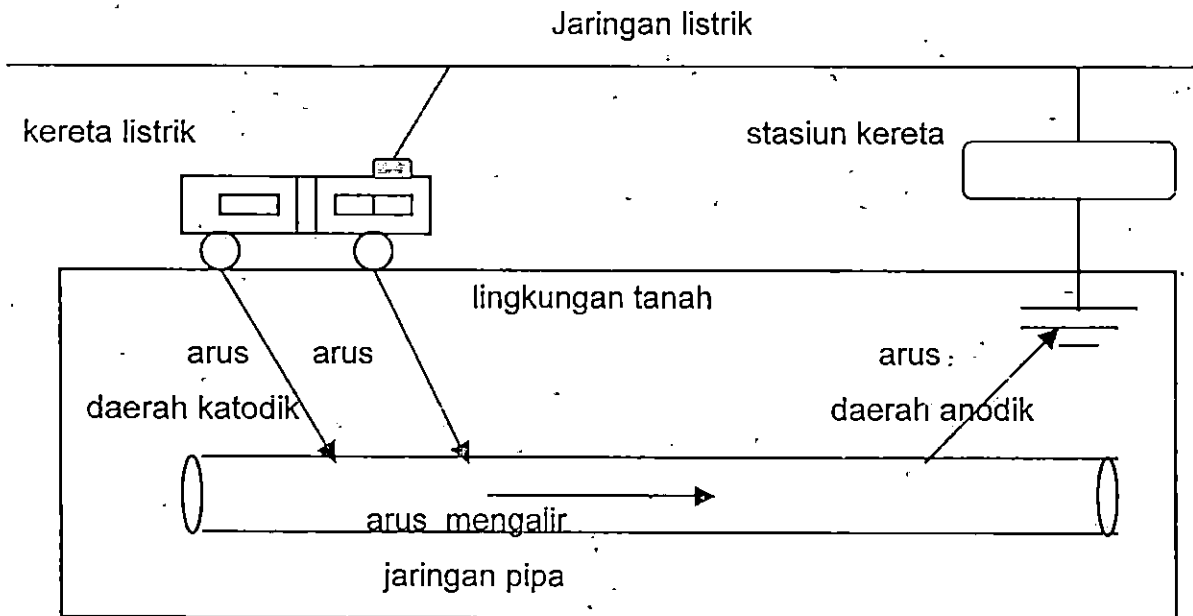
Korosi arus sesat umumnya mengacu kepada elektrolisis atau korosi elektrolitik. Korosi ini terjadi jika reaksi korosi dipicu atau digerakkan oleh sumber arus searah dari luar sistem. Sumber arus searah dari luar mendorong arus melalui sel korosi sehingga terjadi korosi pada anoda, di mana arus konvensional meninggalkan logam. Oleh karenanya hal ini tidak bergantung pada faktor lingkungan seperti konsentrasi oksigen atau pH.

Korosi elektrolitik merupakan kerusakan yang sangat serius. Sumber arus searah dari luar seperti penggerak kereta listrik, yang menyebabkan kerusakan terhadap jaringan pipa, jika rel kereta tersebut tidak terisolasi secara penuh dengan tanah.

Jika pipa atau peralatan lain dari logam yang ditimbun dalam tanah, mengambil sebagian arus, maka ia akan terkorosi pada titik di mana arus tersebut meninggalkannya dan bergabung kembali ke arus semua, seperti yang ditunjukkan pada gambar di bawah ini.

Sumber arus sesat lain adalah peralatan las listrik yang digrounding ke tanah dan arus searah yang sesat yang berdekatan dengan sistem proteksi katodik.





Gb.6.9. Korosi arus sesat

Dalam lingkungan laut, korosi arus sesat dapat terjadi jika suatu alat dari bahan logam digunakan sebagai pentahan (grounding) arus listrik. Penggunaan peralatan las listrik DC tanpa pentanahan yang sesuai juga dapat menjadikan masalah elektrolisis. Arus mendapat jalan yang mudah untuk kembali ke tanah melalui air. Dalam kasus yang serius seperti pada kapal, jika lapisan luar dapat terlobangi sehingga kapal akan bocor dan tenggelam. Pencegahan korosi ini ialah :

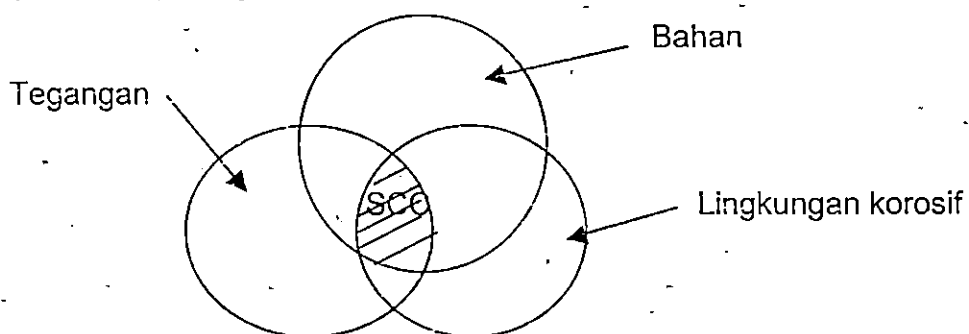
- a. Dengan memberikan isolasi terhadap struktur dari sumber arus DC. Jika hal ini tidak dimungkinkan dapat dilakukan dengan memberikan saluran diantara permukaan struktur dan sumber arus, sehingga tidak ada arus yang kembali (meninggalkan jaringan) ke jaringan sistem kelistrikan.
- b. Menggunakan anoda korban
- c. Memberikan lapisan coating sepanjang pipa, tetapi harus diingat bahwasanya arus dapat mengalir disekeliling insulator dan dapat menyebabkan korosi yang lebih serius jika potensialnya cukup tinggi.

## 10. Korosi Retak Tegang (Stress Corrosion Cracking/SCC)

Korosi retak tegang atau stress-corrosion cracking adalah suatu ungkapan yang digunakan untuk menggambarkan kerusakan bahan konstruksi yang terjadi akibat lingkungan korosi dan penjalaran retak yang lambat. Kerusakan tersebut disebut dengan transgranular dan intergranular. Jones, D.A., memberikan definisi stress corrosion cracking adalah; kerusakan yang terjadi pada tegangan tarik yang relatif rendah dari suatu paduan logam yang dibiarkan berada pada lingkungan yang spesifik (korosif). Fontana, G.Mars memberikan definisi stress corrosion cracking sebagai berikut: Stress corrosion cracking mengacu kepada retak yang diakibatkan oleh adanya tegangan tarik dan media korosi spesifik.

### a. Gejala-Gejala Stress Corrosion Cracking

Suatu studi atau pengamatan tentang penjalaran retakan diperoleh kesimpulan bahwa retakan merupakan kegiatan kombinasi atau gabungan antara interaksi yang sinergi (synergistic) dari tegangan tarik statik dengan lingkungan yang spesifik (korosif). Sejarah juga telah menjelaskan bahwa untuk terjadinya stress corrosion cracking, 3 (tiga) kondisi harus ada secara bersamaan, yaitu; (a) kondisi lingkungan yang korosif, (b) kondisi paduan atau logam yang rentan, dan (c) unsur tegangan tarik. Hubungan ketiganya dapat dilihat pada gambar di bawah ini.



Gb.6.10. Ketiga faktor (tegangan tarik, lingkungan korosif, dan bahan yang rentan) penyebab terjadinya stress corrosion cracking.

Pada kenyataannya 3 kondisi atau keadaan tersebut di atas akan selalu ada dalam waktu yang bersamaan, tetapi waktu dan kondisi pemakaian dari

masing-masing logam atau paduannya yang sangat bervariasi juga akan menentukan lamanya stress corrosion cracking terjadi.

Dengan demikian sebelum membicarakan masalah SCC secara mendasar, maka harus ditetapkan masalah-masalah yang berkaitan dengannya, seperti; jenis beban yang terlibat, jenis-jenis bahan yang terlibat, jenis-jenis lingkungannya yang dapat menyebabkan terjadinya penjalaran dari retakan, dan sifat alami dari interaksi ini sehingga dapat menimbulkan gejala terjadinya stress corrosion cracking.

Selama proses stress corrosion cracking logam atau paduan logam secara jelas tidak diserang pada hampir seluruh permukaannya, sementara itu retakan yang sangat halus (yang hanya bisa dilihat dengan mikroskop dengan pembesaran tertentu) akan terjadi dan menjalar pada logam atau paduan tersebut.

Tegangan tarik yang dibutuhkan untuk dapat terjadinya SCC adalah cukup kecil, biasanya dibawah tegangan nominal luluhnya. Tegangan tarik yang diberikan dari luar, tetapi yang sering berperan dalam SCC ini ialah tegangan sisa pada logam/material itu sendiri. Besarnya tegangan sisa pada logam besarnya kurang lebih 80 kg/mole, atau sama dengan 0,829 volt. Tegangan sisa yang ada pada logam biasanya diakibatkan oleh pekerjaan dingin. Dengan demikian kita dapat melakukan pencegahan korosi jenis ini dengan melakukan perlakuan panas pada bahan sebelum bahan tersebut digunakan. Tegangan tarik statik yang bertanggung jawab terhadap terjadinya SCC, sementara tegangan tarik dinamik akan mengakibatkan terjadinya korosi fatik.

Lingkungan yang dapat menyebabkan terjadinya SCC biasanya ialah lingkungan yang mengandung air dan dapat berupa lapisan uap air/embun yang kental atau larutan ruah. Khususnya SCC pada logam paduan diperoleh adanya jenis bahan kimia khusus didalam lingkungan tersebut. Jadi SCC pada paduan tembaga, secara tradisional mengacu dengan retakan akibat musim, dan yang jelas dengan adanya amonia dalam lingkungan tersebut dan adanya ion chlor akan menyebabkan terjadinya

retakan pada baja tahan karat dan pada paduan aluminium. Juga dapat dijelaskan bahwa suatu lingkungan yang menyebabkan cracking pada satu logam atau paduan logam belum tentu akan menyebabkan retakan pada logam lainnya. Perubahan temperatur, derajat aerasi (tingkat keberadaan oksigen), dan adanya konsentrasi jenis ionik tertentu memungkinkan timbulnya retakan untuk satu jenis bahan. Di bawah ini diberikan daftar untuk beberapa paduan logam dengan lingkungan yang menghasilkan SCC.

Logam atau paduan yang mengalami SCC adalah logam dan paduan logam yang dapat menghasilkan lapisan pasif pada permukaan logam atau paduan. Pada beberapa kasus lapisan pasif yang terbentuk dapat mengurangi terbentuknya lapisan korosi merata, sehingga membuat logam tahan terhadap serangan korosi merata dalam lingkungannya.

Stress corrosion cracking merupakan proses kerusakan yang tertunda, artinya retakan yang terjadi berlangsung lama atau proses dari awal terjadinya retakan sampai penjalaran dan kerusakan berlangsung dalam waktu yang sangat lama. Hal ini dikarenakan laju retaknya yang kurang lebih  $10^{-6}$  meter per detik. Urutan kejadian dalam proses stress corrosion cracking ini dapat dibagi dalam 3 tingkatan, yaitu:

- 1) Inisiasi terjadinya retakan dan tingkat 1 penjalaran retakan pertama (awal penjalaran)
- 2) Tingkat 2 atau steady-state atau steady rate penjalaran retakan, dan,
- 3) Tingkat 3 penjalaran retakan atau kerusakan.

Membedakan antara ketiga tingkatan ini memang sangat sulit dikarenakan timbulnya transisi dari tingkat yang satu ke tingkat berikutnya berlangsung secara kotinyu, sehingga pembatasan antar tingkatan tersebut selalu berubah-ubah. Guna memahami lebih jelas tentang proses ini, maka perlu dilakukan berbagai jenis percobaan, kemudian membandingkan hasil yang didapatkan.

Jika kita perhatikan secara seksama sebenarnya fenomena dari stress corrosion cracking, dapat dibagi menjadi dua kelompok besar, yaitu :

- 1). Inisiasi dari retakan, yang dapat dibagi dalam:

- (a) adanya permukaan yang tidak kontinyu, artinya lapisan permukaan pasif pada beberapa bagian telah terputus, sehingga pada daerah tersebut telah terjadi korosi setempat. Juga diakibatkan oleh suatu proses pengejaan/fabrikasi, sehingga mengakibatkan permukaan yang tidak rata seperti beralur, atau terjadi lobang-lobang yang sangat kecil (hanya dapat dilihat dengan mikroskop).
  - (b). adanya korosi sumuran pada logam, ini disebabkan pemakaian alat tersebut pada lingkungan korosif dalam waktu yang lama.
  - (c) adanya korosi intergranular atau slip dissolution, yaitu adanya korosi sumuran pada intergranular, karena adanya perbedaan sifat kimiawi di batas butir dan di larutan ruah. Juga adanya salah susun.
- 2) Penjalaran retakan, yang sangat dipengaruhi oleh tiga faktor utama, yaitu:
- (a) masalah lingkungan di mana alat/bahan tersebut digunakan/ diope- rasikan
  - (b) masalah kerentanan bahan itu sendiri
  - (c) tegangan tarik yang terjadi.

Tabel 1: Kombinasi Sistem Paduan-Lingkungan yang menghasilkan SCC

Paduan	Lingkungan
Baja Karbon	Nitrat panas, Hydroxida, dan Larutan karbonat/ bikarbonat
HSS (High Strength Steel)	Elektrolit basah (aqueous) terutama yang mengan-dung H <sub>2</sub> S
Baja Austenit	Panas, Larutan yang mengandung Chlorida, uap yang terkontaminasi oleh Chllorida.
Paduan Nikel Tinggi	Uap murni (High Purity Steam)
Alpha Brass (Kuningan- $\alpha$ )	Larutan Amonia
Paduan Aluminium	Larutan Cl <sup>-</sup> aqueous, Br <sup>-</sup> dan I <sup>-</sup>
Paduan Magenesium	Larutan Cl <sup>-</sup> encer
Paduan Titanium	Larutan Cl <sup>-</sup> encer, Br <sup>-</sup> dan I <sup>-</sup> , cairan organik N <sub>2</sub> O <sub>4</sub>
Paduan Zirkonium	Larutan Cl <sup>-</sup> encer; cairan organik; I <sub>2</sub> pada 350 <sup>o</sup> C

b. Mekanisme Korosi Retak Tegang (SCC)

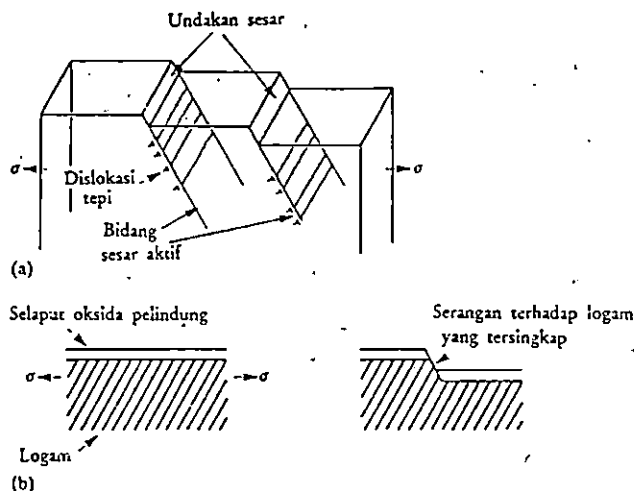
Mekanisme SCC untuk mudahnya dibagi menjadi dua tahap, yaitu (1) tahap pemicuan (initiation) dan (2) tahap penjalaran (propagation).

1) Tahap pemicuan (initiation)

Tahap pemicuan adalah tahap dimana faktor pembangkit tegangan terbentuk. Pembangkit tegangan disini dapat berupa serangan terhadap bagian-bagian setempat pada permukaan logam yang bersifat anoda, yang berakibat terjadinya ceruk atau cekungan dan bahkan lobang pada permukaan logam. Dengan adanya cekungan atau lobang, maka tegangan tarik yang terjadi akan menimbulkan pengaruh terhadap bahan seperti terjadinya pemusatan tegangan pada ujung retakan. Kemungkinan yang terjadi terutama adalah bahwa tegangan tarik akan menyerang kisi kristal, yang semestinya dalam kesetimbangan, dan berakibat bangkitkan energi termodinamik ikatan-ikatan atom. Kalau pengaruh ini terlokalisasi pada permukaan logam, anoda-anoda akan terbentuk, walaupun bahan yang bersangkutan menerima tegangan yang masih di bawah batas elastiknya. Kemudian begitu tegangan melewati kekuatan luluhnya, bahan akan mengalami deformasi plastik, yaitu ikatan-ikatan pada struktur kristalnya terputus, sehingga bentuk bahan berubah secara tetap, misalnya pembentukan dislokasi. Dislokasi akan berhenti apabila dislokasi telah mencapai permukaan logam atau sampai batas akhir. Penumpukan dislokasi pada batas butir menyebabkan polarisasi anodik pada daerah tersebut. Hal ini karena meningkatnya ketidak teraturan dalam struktur kristal. Keadaan ini tidak akan berpengaruh terhadap tahap pemicuan terjadinya scc apabila keadaan ini terjadi pada bagian dalam bahan, tetapi akan berpengaruh terhadap tahap penjalaran scc. Dengan adanya polarisasi anodik, maka pada permukaan logam akan terjadi cacat lokal yang berupa undakan-undakan sesar (slip step). Bagian-bagian yang mengalami undakan sesar, merupakan daerah yang paling rentan terhadap serangan korosi.

Paduan logam yang bergantung pada lapisan tipis oksida sebagai pelindung korosi, menjadi rentan karena adanya undakan sesar tersebut. Undakan sesar akan menyebabkan tersingkapnya lapisan tipis tersebut, sehingga bagian ini sangat bersifat anodik dibandingkan permukaan disekelilingnya yang tidak mengalami undakan sesar. Undakan sesar

hanya dapat dilihat secara mikroskopis.



Gb. 6.11. Peran undakan sesar dalam peretakan peka lingkungan

- (a) Pembentukan undakan sesar pada permukaan logam oleh pergerakan dislokasi di sepanjang bidang sesar aktif akibat tegangan tarik.
- (b) Undakan sesar pada permukaan logam yang sedang pasif menyingkapkan daerah-daerah aktif yang dapat memicu korosi sumuran (pitting).

Jika logam mampu pasif kembali dengan cepat, maka bahaya terjadinya korosi sumuran akan berkurang, tetapi jika proses pemasifan kembali memerlukan waktu yang lama, maka pada daerah tersebut akan terbentuk cerukan, sehingga persyaratan untuk pemicuan scc telah terpenuhi. Bahkan pada logam-logam yang tidak mengalami pemasifan, pembentukan undakan-undakan sesar pada permukaan menimbulkan terjadinya korosi, karena ketidak sinambungan struktur kristal akan menimbulkan anoda-anoda lokal. Pemicu scc pada umumnya adalah retak-retak lokal pada batas butir. Dalam semua lingkungan, batas butir mengalami serangan karena heterogenitas kimianya, bahkan meski tegangan tidak ada.

## 2) Tahap Penjalaran

Pada tahap penjalaran ini, ada tiga mekanisme yang terjadi, yaitu; (a)

mekanisme penjalaran melalui lintasan aktif yang sudah ada, (b) mekanisme penjalaran melalui lintasan aktif akibat adanya regangan, dan (c) mekanisme penjalaran melalui adsorpsi.

(a) Mekanisme penjalaran melalui lintasan aktif yang sudah ada.

Mekanisme penjalaran ini cenderung terjadi sepanjang batas butir yang aktif, seperti yang terjadi pada korosi intergranular, yaitu terjadi jika daerah batas butir terserang akibat adanya endapan didalamnya. Batas butir sering menjadi tempat yang lebih disukai untuk proses pengendapan (presipitation) dan pemisahan yang teramati pada banyak paduan.

(b) Mekanisme penjalaran melalui lintasan aktif (melalui mekanisme bidang slip)

Gagasan tentang mekanisme melalui lintasan aktif akibat regangan ini didasarkan pada pecahnya lapisan pasif pada permukaan logam akibat adanya regangan, yang kemudian diikuti dengan penguraian logam di bagian bawah bagian lapisan yang pecah. Disini laju penjalaran retak ditentukan oleh 3 kriteria, yaitu:

(1) Laju pencahanya/rusaknya lapisan/selaput oksida

Hal ini ditentukan oleh laju regangan yang dialami, atau dalam kasus pembebanan statik oleh laju creep.

(2) Laju penggantian dan pembuangan larutan diujung retakan

Proses ini dikendalikan oleh difusi, dan ini juga ditentukan oleh kemudahan masuknya unsur-unsur bahan agresif kebagian ujung yang mengalami retakan.

(3) Laju pemasifan

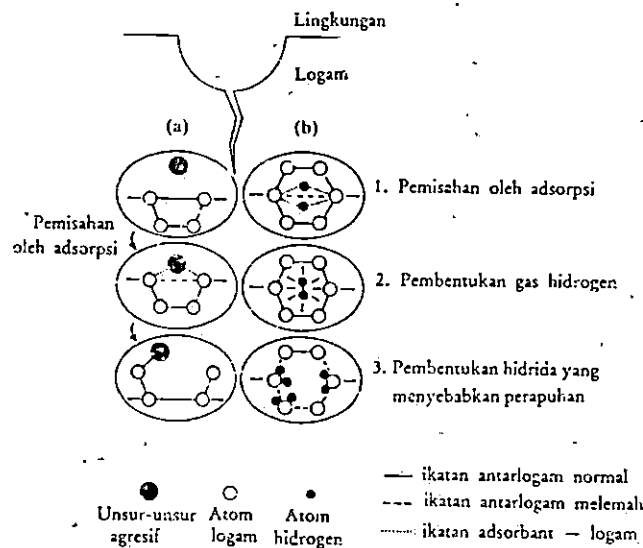
Logam dengan laju pemasifan rendah, maka korosi akan terjadi bukan scc. Tetapi sebaliknya apabila laju pemasifan cepat, maka korosi yang terbentuk adalah scc.

(c) Mekanisme Adsorpsi

Mekanisme adsorpsi mengandung arti bahwa unsur-unsur aktif dalam larutan elektrolit menurunkan integritas mekanik bagian ujung retakan.



Jadi memudahkan putusnya ikatan-ikatan pada tingkat energi yang jauh lebih rendah dari energi semestinya. Salah satu contoh mekanisme jenis adsorpsi ini ialah ion-ion agresif yang spesifik untuk setiap kasus diperkirakan akan mengurangi kekuatan ikatan antara atom-atom logam diujung retakan akibat proses adsorpsi, dan ini menyebabkan terbentuknya ikatan-ikatan antara logam dan unsur agresif tersebut. Energi yang digunakan untuk agresor dan atom-atom logam akan mengurangi energi ikatan logam dengan logam sehingga pemisahan secara mekanik lebih mudah terjadi. Bukan tidak mungkin bahwa ion yang tidak reaktif akan menjadi reaktif karena meningkatnya energi termodinamik diantara ikatan-ikatan logam akibat adanya tegangan tarik. Mekanisme yang mungkin terjadi dapat digambarkan secara skematik dalam gambar di bawah ini.



Gb.6.12. Mekanisme penjalaran retak

Mekanisme adsorpsi yang lain didasarkan pada pembentukan atom-atom hidrogen akibat reaksi ion-ion hidrogen didalam retakan. Atom-atom hidrogen yang terbentuk diadsorpsi oleh logam, dan ini diperkirakan menyebabkan pelemahan (pengurangan kekuatan) atau perapuhan dari ikatan-ikatan logam yang terletak tepat dibawah

permukaan pada ujung retakan.

- 1) Unsur-unsur agresif diabsorpsi pada ujung retakan dan menyebabkan berkurangnya kekuatan ikatan antar logam.
- 2) Pemisahan oleh absorpsi hidrogen di daerah yang melebar secara lokal tepat di depan ujung retakan.
- 3) Gas hidrogen terbentuk di daerah yang melebar secara lokal atau disepanjang bidang sesar. Tekanan gas itu membantu putusya ikatan-ikatan antar logam.
- 4) Pembentukan hidrida logam menyebabkan berkurangnya kekuatan ikatan antar logam dan perapuhan di daerah tepat didepan ujung retakan.

### c. Proses Terjadinya SCC

Telah dijelaskan dimuka mengenai fenomena dan mekanisme terjadinya SCC, maka pada bagian ini akan dibahas masalah proses terjadinya SCC. Proses terjadinya SCC dapat dibagi dalam 2 bagian yaitu; (1) awal terbentuknya retak, dan (2) proses penjalaran retak yang akhirnya menimbulkan SCC.

#### 1) Awal Terjadinya Retak

Awal terjadinya retak dapat disebabkan oleh karena tidak sempurnanya permukaan logam atau dapat disebut karena permukaan logam tidak sinambung. Hal ini diakibatkan oleh proses pengerjaan yang tidak sempurna, misalnya adanya alur-alur pada permukaan logam akibat proses penggerindaan pada pengerjaan akhir yang tidak sempurna, adanya permukaan yang beralur akibat pembersihan permukaan sebelum bahan dibentuk, misalnya pembersihan dengan metoda pickling. Juga karena proses fabrikasi dari benda kerja, sehingga menimbulkan cacat permukaan. Disamping itu adanya sensitisasi pada batas butir yang cukup tinggi sehingga akan dapat menimbulkan inisiasi retak oleh korosi intergranular.

Awal terjadinya retak, dapat juga diakibatkan adanya korosi sumuran (pitting) yang terbentuk selama benda kerja dioperasikan atau

benda tersebut terpasang selama beberapa waktu dalam udara terbuka dan lingkungan yang korosif. Dengan kondisi demikian maka permukaan lapisan pasif pada baja tahan karat akan pecah, sehingga akan terjadi korosi sumuran pada permukaan logam, yang lama kelamaan akan mengurangi kekuatan logam. Dengan demikian daerah yang mengalami korosi sumuran menjadi awal terjadinya retak.

Transisi antara korosi sumuran dan peretakan, adalah sangat tergantung pada parameter yang sama yang mengontrol SCC, seperti bentuk geometri dari sumuran, susunan kimia dari bahan, dan tegangan dan regangan pada sumuran. Perubahan lingkungan yang korosif dan potensial diantara sumuran dapat juga menjadi pemicu terjadinya retak pada benda kerja.

Awal terjadinya retak juga dimungkinkan dari adanya korosi intergranular atau korosi batas butir, atau adanya slip dissolution (terputusnya slip) pada bahan benda kerja. Korosi batas butir terjadi akibat adanya perbedaan unsur kimiawi pada batas butir setempat dengan yang ada di ruah. Keadaan ini terjadi karena adanya sensitisasi pada baja tahan karat austenit atau dengan pemisahan bahanbahan pengotor seperti fosfor, belerang, atau silikon pada jenis-jenis bahan. Proses inisiasi dan penjalaran retak oleh proses penguraian slip pada kenyataannya adalah sama.

## 2). Proses Penjalaran Retakan

Awal terjadinya retak dan proses penjalaran retak adalah sangat berhubungan, tetapi prosesnya adalah ber-beda, oleh karenanya jika awal retak telah terbentuk, maka penjalaran retak akan terjadi. Telah didiskusikan atau dibahas di muka bahwa mungkin retak diawali dengan adanya cacat permukaan, baik yang dihasilkan secara proses kimia, proses mekanik atau karena kondisi metalurginya, di mana secara bersama keadaan tersebut bertemu atau saling sesuai, sehingga akan mengakibatkan terjadinya retak. Di samping itu proses korosi yang mungkin terbentuk seperti cacat permukaan atau oleh korosi sumuran

atau korosi setempat juga akan dapat menyebabkan awal terjadinya retak. Kondisi yang mengkreasi korosi sumuran atau korosi setempat adalah daerah dengan sifat kimia yang tidak homogen seperti pada batas butir, fasa kedua, inklusi, dan batas antara fasa. Pada daerah ini pertumbuhan retak akan terjadi secara terus menerus.

Jika kondisi pH, potensial dan sifat kimia pada ujung retakan tidak mencapai harga-harga yang dibutuhkan, maka pertumbuhan korosi sumuran atau penetrasi korosi setempat tidak dapat berlangsung. Juga jika aspek rasio pit tidak lebih besar dibandingkan dengan harga kritisnya kemudian tegangan setempat dan regangan yang dihasilkan dari retakan tidak dicapai, maka pertumbuhan reatakan tidaka dapat terjadi. Terakhir pertumbuhan scc yang dihasilkan dari hidrogen katodik, retak yang pendek mungkin dapat terinisiasi oleh proses penguraian anodik, sementara penjalaran tergantung pada aktivitas hidrogen.

Walaupun kondisi berada pada keadaan korosi lokal atau korosi sumuran mungkin tidak dapat menghasilkan penjalaran retak, tetapi keduanya lebih sering membantu terjadinya retak. Ada tiga kondisi yang umumnya dikatakan sebagai persyaratan untuk mendukung terjadinya scc, yaitu: (a) sifat kerentanan bahan, (b) lingkungan yang korosif, dan (c) tegangan yang cukup.

Daftar kondisi bahan yang rentan dan lingkungan korosif yang diketahui menyebabkan scc telah diberikan pada tabel 1, di mana sebagai contoh logam murni diketahui dapat retak pada waktu bahan pengotor memisahkan batas butir (segregation grain boundaries).

## BAB VII

### KOROSI LINGKUNGAN

#### A. Pendahuluan

Sebagaimana telah didefinisikan bahwa korosi adalah reaksi antara logam dengan lingkungannya. Dalam bab ini akan dilakukan pembahasan terhadap 3 (tiga) lingkungan yang banyak dibahas dan dibicarakan oleh para ahli korosi, yaitu : (1) Lingkungan atmosfer, (2) Lingkungan air, dan (3) Lingkungan tanah

Perlu diingat bahwa air biasanya diperlukan untuk terjadinya korosi dalam lingkungan alami, juga beberapa atau banyak situasi yang terlibat dalam proses korosi.

Diharapkan setelah mempelajari masalah korosi lingkungan ini mahasiswa dapat menjelaskan:

1. Pengaruh atmosfer, air dan tanah terhadap laju korosi pada berbagai jenis logam.
2. Menjelaskan cara-cara melindungi korosi yang diakibatkan oleh pengaruh ke tiga lingkungan tersebut.

#### B. Korosi Lingkungan

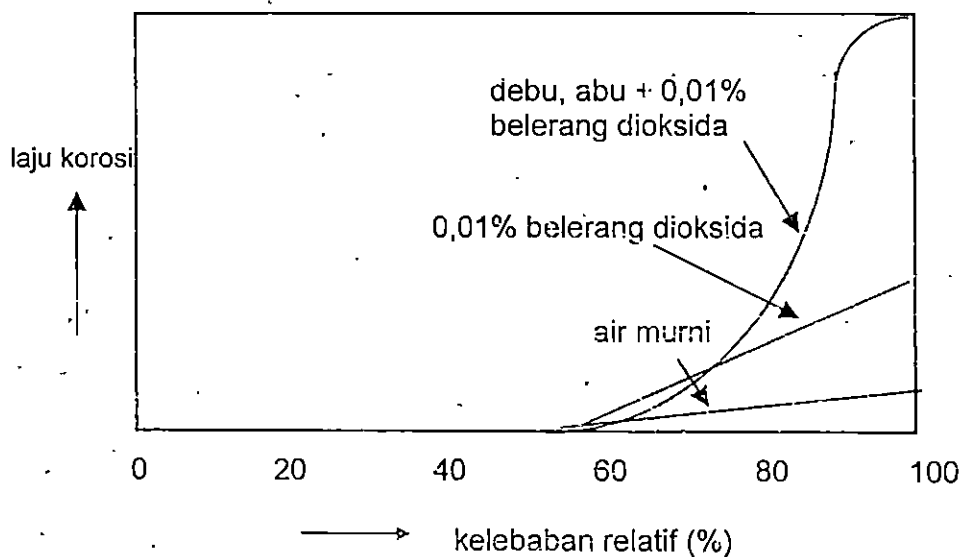
##### 1. Korosi atmosferik

Dalam atmosfer korosi tergantung pada tiga faktor, yaitu oksigen, uap air (moisture) dan bahan pengotor (contaminant) seperti debu, garam, polutan, dan lainnya. Oksigen diperlukan untuk menjaga proses korosi. Jumlah oksigen dalam atmosfer sekitar 20%, dan selalu tersedia untuk mengambil bagian dalam proses korosi dalam atmosfer. Laju korosi biasanya dikontrol oleh laju di mana oksigen dapat berdifusi ke daerah katodik, tetapi keadaan ini jarang menjadi persoalan dalam korosi atmosfer seperti uap air yang biasanya berbentuk film tipis atau berupa titik embun.

Uap air juga merupakan wahana yang penting bagi berlangsungnya proses reaksi korosi. Meskipun pada logam tidak nampak basah untuk dapat berlangsungnya proses korosi. Film uap air yang tidak dapat dilihat akan berkembang sampai batas moderat dari kelembaban relatif. Telah ditetapkan bahwa pada harga kelembaban kritis tertentu di mana korosi

pada logam dapat diabaikan. Dalam praktek ditemukan bahwa korosi terjadi biasanya apabila harga kelembaban relatif tersebut lebih besar dari 80%, di mana harga tersebut jika tidak terdapat bahan pengotor lain seperti garam. Kelembaban biasanya berubah-ubah sepanjang hari (biasanya berbanding terbalik dengan temperatur).

Bahan pengotor dalam atmosfer juga memegang peran penting pada korosi. Karbon dioksida ( $\text{CO}_2$ ), sulfida dioksida ( $\text{SO}_2$ ), sulfida trioksida ( $\text{SO}_3$ ), hidrogen sulfida ( $\text{H}_2\text{S}$ ), amoniak ( $\text{NH}_3$ ) sering ditemui dalam daerah industri. Debu, abu dan bahan padatan lainnya yang sangat kecil ditemukan juga di daerah industri dan daerah urban. Semua bahan pengotor tersebut akan mempunyai pengaruh yang signifikan terhadap laju korosi. Hubungan antara pengotor belerang dioksida dengan kelembaban relatif terhadap laju korosi dapat dilihat pada gambar 7.1. di bawah ini.

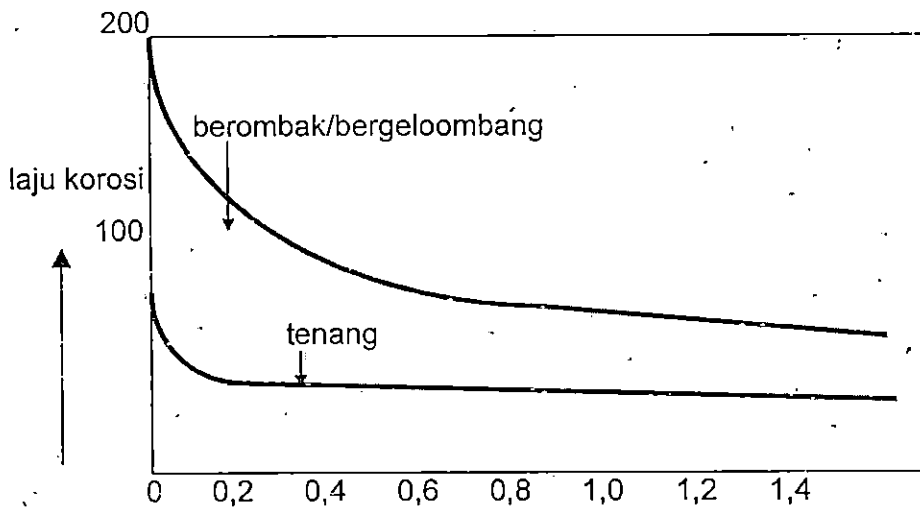


Gb.7.1 Pengaruh kelembaban dan variasi pengotor pada laju korosi besi

Dari gambar 7.1. dapat dibaca jika kelembaban kurang dari 60% laju korosinya sangat rendah. Belerang dioksida membentuk belerang dan asam belerang dengan adanya embun dan menyebabkan peningkatan laju korosi yang signifikan (bandingkan garis A dan garis B). Jika pada atmosfer yang mengandung debu dan kotoran lainnya, maka laju korosi dapat meningkat (bandingkan dengan garis B dan garis C). Partikel-partikel ini seperti garam, pasir, dan lainnya mungkin mengabsorpsi uap air atau belerang dioksida,

dan mungkin membentuk hubungan galvanik (contoh karbon bertindak sebagai katoda), atau mungkin malahan akan membentuk korosi sumuran.

Garam dari laut telah ditemukan sebagai penyebab utama meningkatnya laju korosi, sehingga pada daerah yang makin dekat dengan laut laju korosinya meningkat, tetapi laju korosi juga dipengaruhi oleh keadaan lautnya, seperti ditunjukkan pada gambar 7.2. berikut ini .



Gb.7.2 Hubungan antara laju korosi dengan jarak dari laut (km)

Laut yang berombak besar akan laju korosinya akan lebih besar dibandingkan dengan laut yang tenang. Laju korosi rata-rata korosi atmosferik untuk beberapa jenis logam dapat dilihat pada tabel berikut ini.

Telah dijelaskan di muka bahwasanya bahan pengotor akan selalu ada dan bervariasi tergantung daerahnya seperti pada daerah industri, urban, atau daerah pantai. Pada daerah pantai garam akan dibawa oleh angin, maka udara atau atmosfer di daerah pantai mengandung banyak garam. Di daerah industri, belerang dioksida, debu dan bahan pengotor lain akan menghasilkan lingkungan yang sangat korosif. Dengan demikian pada daerah pantai dan daerah industri laju korosinya adalah tinggi. Bahan pengotor relatif sedikit pada daerah urban dan daerah pedesaan sehingga laju korosinya juga sangat kecil. Daerah-daerah tropis biasanya laju korosinya juga rendah kecuali daerah yang dekat dengan laut. Perlu juga

diperhatikan bahwa pada daerah pertanian kemungkinan laju korosinya juga tinggi, karena penggunaan bahan kimia sebagai pupuk tanaman.

Faktor lain yang besar pengaruhnya terhadap laju korosi, misalnya curah hujan yang besar yang tidak bisa mengalir secara baik. Temperatur juga akan berpengaruh terhadap korosi atmosferik karena meningkatkan laju reaksi

Tabel 1: Jenis logam dan laju korosinya pada berbagai lingkungan.

No	Logam	Daerah Industri	Lingkungan laut	Daerah pedesaan
1	Aluminium	1	0,5	0,1
2	Baja Karbon	10 - 100	20 - 100	5 - 50
3	Tembaga	1 - 2	1	0,5
4	Timah hitam	0,5	0,5	0,05
5	Timah putih	1,5	2 - 5	0,5
6	Nikel	3,5	0,1	0,2
7	Monel	1,5	0,2	0,2
8	Seng	2 - 16	0,5 - 8	0,2 - 3

## 2. Korosi dalam Air

Terminologi air disini mengacu pada beberapa jenis air seperti; air destilasi, air hujan, air laut, air payau dan air yang telah terpolusi. Jenis air yang disebutkan diatas mempunyai pengaruh yang berbeda dalam proses korosi, tetapi dalam pembicaraan korosi dalam air disini hanya akan dibahas mengenai air alami (natural water). Faktor-faktor yang mempengaruhi korosi dalam air adalah:

### a. Larutan garam

Air murni tidak korosif; tetapi segera setelah air diberi larutan garam laju korosinya meningkat secara cepat. Larutan kimia yang membuat kandungan garam terlarut terutama terdiri dari ion sodium ( $\text{Na}^+$ ), ion magnesium ( $\text{Mg}^{2+}$ ), ion tembaga ( $\text{Cu}^{2+}$ ) dan potasium ( $\text{K}^+$ ). Disamping itu dengan adanya anion klorida ( $\text{Cl}^-$ ), dan sulfat ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), bikarbonat ( $\text{HCO}_3^-$ ), karbonat ( $\text{CO}_3^{2-}$ ), dan sedikit nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ).

Jumlah ion-ion tersebut lebih besar dibandingkan jumlah garam yang terlarut dalam air. Pada lingkungan tertentu, sebagai contoh air terpolusi oleh fertiilizer, fosfat, ammonium dan florida, dan ion-ion besi, tembaga dan mangaan mungkin juga ditemukan dalam jumlah yang



kecil pada air bawah tanah. Jumlah padatan terlarut tersebut akan mempengaruhi laju korosi.

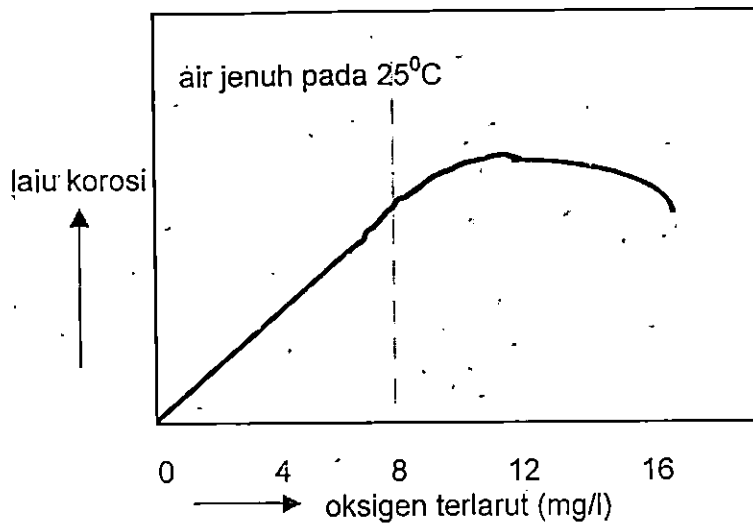
Ion sodium dan klorida mempunyai pengaruh yang besar terhadap korosi yang paling besar didalam padatan yang terlarut. Suatu penelitian yang telah dilakukan menyatakan bahwa adanya NaCl sampai 3% dalam air maka laju korosi besi dalam air yang mengandung oksigen terlarut meningkat dengan cepat. Hal ini dikarenakan konduktivitasnya meningkat dan anoda dan katoda dipermukaan terbentuk menjadi sebuah sel korosi sehingga terbentuk produk korosi awal  $\text{Fe}(\text{OH})_2$ . Kandungan NaCl di atas 3% kelarutan oksigen dalam air menurun secara kontinyu dengan naiknya konsentrasi NaCl, atau makin tinggi konsentrasi NaCl laju korosinya makin menurun.

pH kebanyakan air berkisar pada daerah netral (6 sampai 8), tetapi dapat juga terjadi pH air harganya dari 4,5 sampai 9. Air yang lebih asam akan cenderung lebih korosif, dan air yang lebih basa akan kurang korosif terhadap baja, sedangkan korosi yang tidak tergantung pada pH adalah jika pH air berharga 4 dan 12.

Untuk bahan atau material lain pengaruh harga pH yang bervariasi, juga mungkin laju korosinya juga akan berbeda, contohnya laju korosi pada seng dan aluminium adalah tinggi pada keadaan asam dan basa yang tinggi, sementara untuk logam-logam nobile laju korosinya rendah pada semua pH.

#### b. Gas terlarut

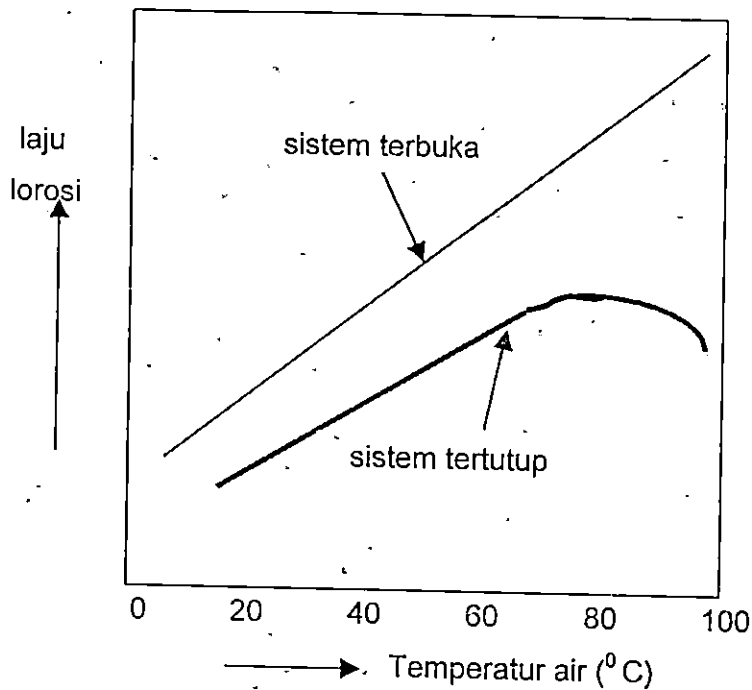
Gas terlarut yang paling signifikan adalah oksigen dan karbon dioksida. Kandungan oksigen terlarut bervariasi dari mendekati nol sampai 8 mg/liter. Oksigen menstimulasi korosi, tetapi juga bertindak sebagai pembentuk film pasif yang memproteksi logam dari serangan korosi selanjutnya. Perhatikan gambar di bawah ini yang menjelaskan bentuk kurva dar laju korosi.



Gb.7.3. Laju korosi besi dengan variasi kandungan oksigen terlarut

Pada pH yang diberikan laju korosi meningkat secara linier dengan adanya kandungan oksigen terlarut, tetapi setelah mencapai batas maksimum/kritis laju korosi menurun, karena terjadinya pembentukan lapisan/film pasif yang protektif.

Maksimum laju korosi untuk variasi dengan temperatur, garam terlarut, pH sama dengan 10 dan aliran air, serta kandungan oksigen sebesar 4 mg/liter. Belerang dioksida yang terlarut atau sulfida hidrogen yang terlarut mungkin ada pada air yang terpolusi juga akan mempengaruhi sifat-sifat korosi. Laju korosi umumnya meningkat dengan meningkatnya temperatur, meskipun kandungan oksigen terlarut menurun dengan meningkatnya temperatur. Oleh karenanya dalam sistem terbuka di mana oksigen dibiarkan menguap akan ditemukan bahwa laju korosi menurun pada temperatur tinggi. Dalam sistem tertutup oksigen tidak dapat menguap dengan meningkatnya temperatur dan laju korosinya menjadi meningkat dengan meningkatnya temperatur sampai semua oksigen terlarut dikonsumsi, seperti ditunjukkan pada gambar di bawah ini.



Gb. 7.4. Laju korosi besi dengan variasi temperatur

Meningkatnya laju aliran air juga akan meningkatkan laju korosi. Hal ini karena meningkatnya suplai oksigen ke katoda. Laju korosi akan cepat turun jika terbentuk lapisan pasif, tetapi dengan tingginya konsentrasi klorida, seperti pada air laut lapisan pasif yang terbentuk akan segera rusak kembali maka laju korosinya akan terus meningkat. Pada kecepatan aliran yang tinggi maka akan terjadi korosi erosi.

Dalam air alami banyak mengandung mikro organism di mana ia berperan penting dalam proses korosi. Dalam air yang bebas udara (anaerobic water) sulfat reducing bacteria dapat menyebabkan laju korosi yang tinggi.

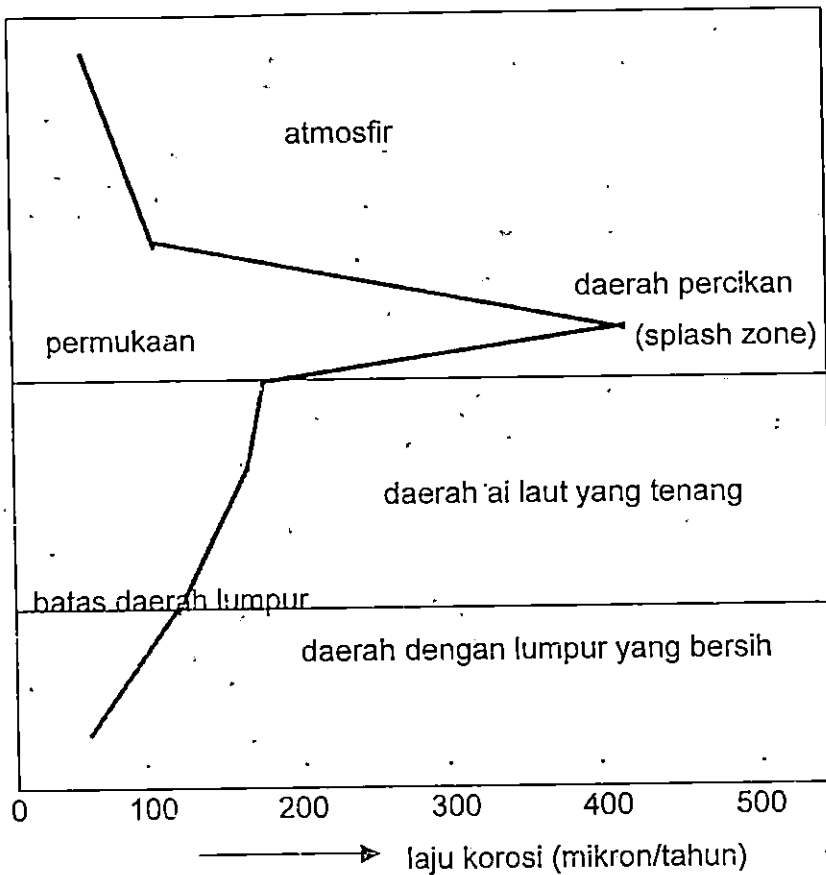
c. Perilaku korosi dalam air alami .

Air laut mengandung 3,5% garam, meskipun pada daerah dekat aliran sungai kandungan garamnya pada batas terendah. Ion sodium dan klorida adalah ion utama yang terlarut, tetapi sulfat, karbonat dan unsur atau ion-ion lain juga ada. pH air laut antara 8,1 dan 8,3. Oksigen juga ada dan hal ini diperlukan untuk terjadinya reaksi katodik., dan batas

oksigen terlarut adalah sangat penting. Pada lautan yang terbuka kandungan oksigen terlarut kira-kira 4 sampai 8 mg/liter yang mengakibatkan korosi yang cepat. Tetapi pada kandungan oksigen terlarut yang rendah, misalnya pada daerah stagnant (tenang) laju korosinya juga rendah. Perbedaan konsentrasi oksigen akan mempengaruhi laju korosi di lingkungan air laut. Laju korosi baja pada daerah percikan (splash zone), oksigen tersedia dengan bebas dan laju korosinya adalah paling tinggi. Dalam daerah lumpur laju korosinya rendah karena oksigen yang tersedia sangat kecil/rendah.

Laju korosi rata-rata baja dalam air laut kira-kira 125 mikron per tahun. Baja tahan karat menunjukkan ketahanan korosi yang sangat baik jika lapisan film pasif yang terbentuk terpelihara dengan baik. Peningkatan kandungan unsur padu akan meningkatkan ketahanan korosinya. Baja tahan karat jenis 304 laju korosinya kira-kira 2,5 mikron per tahun. Tetapi pada daerah celah atau daerah di mana lapisan film pasifnya tidak terpelihara maka pada daerah tersebut akan terjadi korosi sumuran yang cepat.

Paduan tembaga umumnya terkorosi pada laju yang sama dengan baja tahan karat austenitik kecuali di dalam air laut yang mengandung senyawa berlerang pada polutan/pengotor. Kuningan akan terkena dezincification, tetapi paduan tembaga-aluminium menunjukkan ketahanan korosi yang lebih baik dibandingkan dengan paduan tembaga lainnya. Paduan nikel mempunyai perilaku yang sama dengan baja tahan karat. Paduan aluminium menunjukkan ketahanan korosi yang bagus pada lingkungan air laut, tetapi paduan aluminium-tembaga menderita korosi sumuran dan tidak direkomendasikan untuk dipakai pada lingkungan air laut.



Gb. 7.5. Laju korosi mild steel dalam air laut

Air yang diperoleh pada permukaan atau dari dalam tanah umumnya mengandung kurang dari 1% sodium klorida, sehingga laju korosinya lebih rendah dibandingkan dengan air laut. Konsentrasi kalsium dan magnesium akan mempengaruhi laju korosi pada air jenis ini. Bahan besi tuang, baja dan baja yang digalvanisasi banyak digunakan pada lingkungan ini. Tembaga, kuningan, aluminium dan beberapa jenis baja tahan karat, monel dan tembaga-nikel dapat digunakan pada lingkungan ini jika pengaruh temperatur ikut berperan.

### 3. Korosi dalam Tanah

Tanah dapat dibedakan menurut sifat korosif dari tanah yaitu; tanah yang korosif (laju korosinya sama dengan air laut), tanah yang laju korosinya menengah (laju korosinya sama dengan pada daerah pedesaan). Masalah umum yang berkaitan dengan korosi dalam tanah adalah konstruksi pipa dalam tanah, tangki-tangki tiang pancang dan casing

pemboran. Beberapa faktor yang mempengaruhi korosi dalam tanah adalah:

a. Jenis tanah.

Sifat tanah dipengaruhi oleh sifat fisik dan sifat kimianya. Sebagaimana telah diketahui tanah berasal dari pelapukan batu dan spesi-spesi lain, sehingga komposisi kimia tanah sangat bergantung pada jenis batuan dan spesies pembentuknya. Meskipun dari batuan yang sama, dapat juga diperoleh komposisi kimia tanah yang bervariasi tergantung pada lingkungannya. Pengklasifikasian tanah biasanya didasarkan pada ukuran butiran, yaitu dalam bentuk pasir (0,07-2 mm), silt (0,005-0,007 mm), dan tanah liat (kurang dari 0,05mm), tetapi hanya sebagian kecil dari pasir yang dapat disebut sebagai pasir murni, silts, dan tanah liat.

b. Kandungan Air

Adanya air merupakan hal yang penting untuk dapat terjadinya korosi dalam tanah. Air yang ada dalam tanah terdiri dari 3 bentuk, yaitu sebagai air kapiler yang tinggal karena sifat tanah, karena pengendapan (akibat gravitasi air), dan air yang terkumpul akibat gravitasi air (ground water). Korosi dalam tanah biasanya diakibatkan oleh air kapiler, karena air gravitasi (gravitational water) sedikit mengandung garam, dan air bawah tanah (ground water) diharapkan tidak mengandung spesi yang dapat menimbulkan korosi.

c. Kandungan Oksigen

Reduksi oksigen adalah biasanya merupakan proses katodik yang dominan dalam korosi pada logam yang dibanam dalam tanah. Selama oksigen dapat mencapai permukaan logam melalui tanah laju korosinya dikontrol oleh laju sampainya oksigen ke permukaan logam.

Selama pori-pori tanah terisi oleh oksigen atau air, maka ketersediaan oksigen dikaitkan dengan volume pori dan pori tersebut tetap menyimpan air atau oksigen. Contoh tanah liat dengan pori-pori yang kecil dan sering mengandung air yang cukup besar, sehingga kandungan oksigennya kecil. Oksigen mungkin mencapai permukaan logam melalui proses difusi gas yang ada dalam pori-pori yang terbuka. Difusi gas adalah lebih cepat, sehingga kandungan airnya terbatas dan

dengan demikian akan meningkatkan korosi secara maksimum. Dengan kurangnya air maka akan menghilangkan jalan elektrolit untuk terjadinya mekanisme korosi. Kelebihan air akan menghambat difusi gas (oksigen) dan menjadikan keadaan anaerobik pada permukaan logam.

Sifat kimia dan fisik dari tanah mungkin bervariasi sepanjang strukturnya. Hal ini dikarenakan jenis tanah yang bervariasi; sehingga ada daerah yang terekspose (terbuka) dengan lingkungannya yang menyebabkan kandungan oksigen tinggi, dan pada bagian lain yang tidak terekspose kandungan oksigennya rendah. Daerah dengan kandungan oksigen yang rendah akan bertindak sebagai anoda dan terkorosi, dibandingkan dengan daerah yang mengandung oksigen yang tinggi.

Udara yang terkandung di dalam tanah, komposisinya berbeda dengan yang di atmosfer. Dekomposisi material organik, akar-akar tumbuhan mengkonsumsi oksigen dan melepas karbon dioksida. Oleh karena itu kandungan oksigen berkurang dengan cepat sebaliknya karbon dioksida meningkat terutama bila hubungan dengan atmosfer terhalang.

d. Garam terlarut

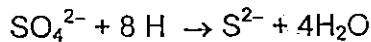
Sifat kapiler air dalam larutan garam berasal dari tanah. Kation utamanya adalah sodium, potasium, kalsium dan magnesium, sementara anion-anion yang paling banyak adalah klorida, sulfat, dan bikarbonat. Kandungan garam dalam tanah dapat dipengaruhi oleh aktivitas manusia. Pada bidang pertanian pengaruh garam bisa disebabkan oleh pemakaian pupuk (fertilizer), dan adanya limbah. Ion-ion akan meningkatkan konduktivitas tanah dan dengan cara demikian maka akan memberikan fasilitas pada reaksi korosi. Meskipun demikian kalsium dan magnesium cenderung membentuk karbonat protektif yang tidak larut atau hidroksida pada permukaan logam. Jadi tanah yang kaya kalsium

d. pH

Laju korosi pada hampir semua logam akan meningkat dengan menurunnya pH (menjadi bersifat asam). Hal ini menjadi alasan jika tanah mengandung banyak asam organik adalah menjadi lebih agresif

dibandingkan tanah yang banyak mengandung bahan alkaline seperti kapur. Beberapa logam seperti seng, aluminium, oleh karena akan terserang oleh tanah yang mengandung alkaline (tanah yang mempunyai sifat basa).

- e. Bakteri pereduksi sulfat dapat mempromosikan korosi dan sangat banyak terdapat didalam tanah. Peran bakteri dalam korosi adalah kemampuannya untuk mendepolarisasi reaksi katodik dengan memanfaatkan atom-atom hidrogen untuk mereduksi sulfat menurut reaksi:



Sementara itu bakteri pereduksi sulfat dapat hidup dalam tanah yang mengandung oksigen, sehingga ia menjadi aktif pada keadaan anaerobik dengan adanya nutrient organik. Tanah liat sering banyak mengandung banyak air sehingga kandungan oksigennya rendah, dan dapat mengaktifkan bakteri pereduksi sulfat. Pertumbuhan bakteri adalah terbatas pada batas pH 6,5 sampai 9,5 dan utamanya pada pH 7 dan 8. Jadi tanah liat yang umumnya mempunyai pH 7 sampai 8 tidak hanya memberikan kondisi anaerobik, tetapi juga mempunyai pH yang mendekati optimum untuk tumbuhnya bakteri.

f. Ketahanan Tanah

Ketahanan tanah adalah fungsi dari kandungan uap air (moisture), kandungan garam, jenis garam dan temperatur dari tanah. Secara umum ada hubungan antara ketahanan tanah dengan laju korosi, hal ini karena korosi adalah fenomena elektrokimia, jadi ketahanan yang rendah menghasilkan tahanan sirkuit yang rendah untuk sel korosi, menghasilkan aliran arus korosi yang tinggi, sehingga menjadikan laju korosi yang cepat. Hubungan antara korosivitas tanah dengan ketahanan listrik dapat dilihat pada tabel berikut ini.

Tabel 2. Hubungan korosivitas tanah dengan ketahanan listrik

No	Jenis Tanah	Korosivitas	Ketahanan listriknya ( $\Omega$ )
1	Berpasir	Rendah	60 - 100
2	Loams	Menengah	45 - 60
3	Tanah liat	Tinggi	20 - 45
4	Marsh/organic/wet	Severe	0 - 20



g. Proses Korosi di Tanah

Mekanisme korosi dalam tanah tergantung pada kepadatan tanah, kandungan air. Contoh proses korosi dalam tanah untuk pipa, sebagian pipa ditempatkan pada tanah liat atau material yang hampir sama cenderung menjadi anoda sementara bagian lain yang ditempatkan pada tanah gravel cenderung menjadi katoda. Arus yang mengalir dalam sel yang kita kenal sebagai long-line current.

Perbedaan potensial dapat terjadi karena faktor lain selain ketersediaan oksigen-nya. Sebagai contoh pipa dari bahan yang berbeda digabung bersama maka akan terjadi korosi galvanik. Tabel berikut menunjukkan galvanic series untuk beberapa logam dalam tanah yang mengandung udara. Perlu dicatat bahwa pipa baru adalah anodik terhadap pipa yang sudah lama, jadi penggantian panjang pipa dalam daerah yang lama cepat terkorosi. Perbedaan dalam keasaman, konsentrasi garam, atau komposisi tanah juga dapat menaikkan sel korosi. Tambahan lagi dengan adanya bakteri akan menyebabkan terjadinya korosi. Dalam praktek semua faktor tersebut dapat berperan dalam korosi pada obyek yang terpendam didalam tanah.

Pada daerah galian bagian bawah galian biasanya kandungan uap airnya tinggi dibandingkan dengan tanah yang tidak digali. Tanah timbunan di atas obyek yang dibenam biasanya tidak mencapai kepadatan seperti semula sehingga terjadi aliran air dan udara dengan laju yang lebih tinggi. Hasilnya cenderung akan terjadi korosi surnuran pada daerah bawah jaringan pipa dibandingkan pada bagian atasnya. Apa yang akan terjadi pada struktur yang dibenam dalam tanah seperti pipa adalah sulit untuk diprediksi. Tidak hanya variasi dari tingkat korosivitas tanah karena jenis tanah, tetapi juga adanya pengaruh perbedaan kandungan oksigen dalam tanah juga akan mempengaruhi laju korosi.

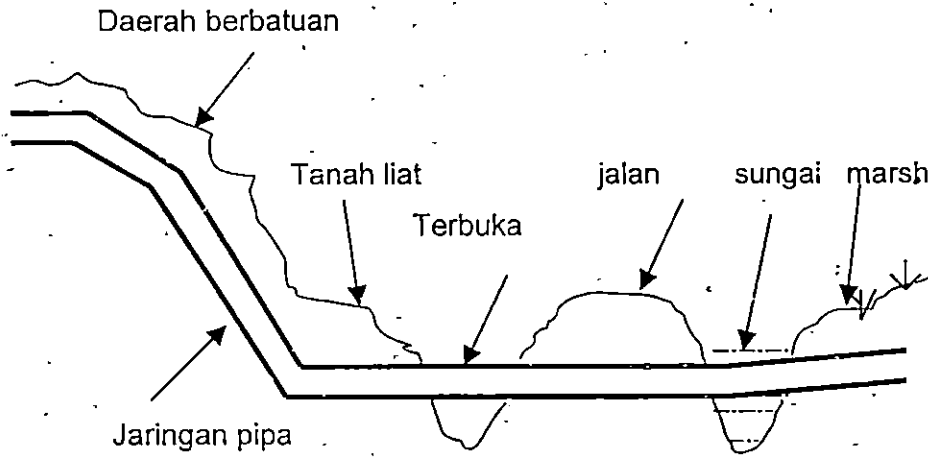
Tabel 3. Potensial logam dalam tanah jenuh udara.

No	Logam	Potensial VS Cu/CuSO <sub>4</sub>
1	Karbon, Grafit, Batubara	+ 0,2
2	Millscale on Mild Steel	- 0,2
3	Tembaga, Kuningan, Bronze	- 0,2
4	Mild Steel (in good concrete)	- 0,2
5	Mild Steel (in Cl-contaminated concrete)	- 0,3 sampai - 0,5
6	Mild Steel (Terkorosi)	- 0,3 sampai - 0,6
7	Besi yang ulet	- 0,3 sampai - 0,8
8	Timah Hitam	- 0,5
9	Besi cor (not grafitisasi)	- 0,5
10	Mild Steel (tidak terkorosi)	- 0,6 sampai - 0,8
11	Aluminium	- 0,8 sampai - 1,1
12	Seng	- 1,1
13	Magnesium	- 1,6

Perhatikan gambar 7.6, di mana digambarkan suatu jaringan pipa yang melewati beberapa daerah dengan kondisi tanah yang berbeda. Pengaruh yang terjadi adalah:

- 1) Pada daerah perbukitan yang berbatu. Pada daerah berbatuan ini drainasinya bagus, dan tahanan tanahnya tinggi sehingga laju korosinya rendah.
- 2) Daerah bertanah liat. Pada daerah ini kandungan oksigennya rendah, sehingga laju korosinya tinggi.
- 3) Daerah yang terbuka. Pada daerah ini bersifat katodik sehingga laju korosinya rendah.
- 4) Daerah jalan. Pada daerah ini aliran udaranya sangat jelek atau kandungan oksigennya sangat kurang sehingga laju korosinya tinggi.
- 5) Daerah sungai. Pada aliran sungai ini aliran udara sangat bagus, tetapi aliran air mengakibatkan depolarisasi sel setempat menyebabkan laju korosi tinggi.

- 6) Daerah marsh. Pada daerah ini aliran oksigennya jelek, laju korosinya tinggi karena daerah ini basah dan mungkin bersifat asam.



Gb. 7.6. Pengaruh perubahan tanah dan lingkungan terhadap laju korosi

## BAB VIII

### SIFAT KOROSI LOGAM

#### A. Pendahuluan

Mild steel (baja karbon rendah) adalah bahan yang paling banyak digunakan untuk konstruksi dan permesinan, karena ia mudah dibentuk, dikerjakan dengan mesin, tetapi mild steel mudah terkorosi dengan laju yang cukup tinggi. Didunia ini banyak bahan atau material lain yang mempunyai ketahanan korosi yang jauh lebih baik dibandingkan dengan mild steel. Meskipun demikian karena faktor atau alasan sifat mekanis dan biaya maka baja adalah logam yang paling luas penggunaannya. meskipun kurang tahan terhadap korosi, baik dilingkungan atmosfer maupun dilingkungan korosif lainnya.

Dalam lingkungan korosif dapat dipilih bahan yang tahan terhadap korosi, jika sifat mekanis dari konstruksi yang dibuat tidak diperlukan, atau proteksi korosi tidak akan diberikan pada konstruksi tersebut. Sifat ketahanan korosi dari berbagai logam dan paduan logam yang umum akan dibahas dalam bab ini.

Tujuan dari pengajaran ini adalah agar mahasiswa dapat:

1. Menyebutkan jenis-jenis logam (ferro dan non ferro serta paduannya) beserta komposisi dan sifatnya.
2. Memilih logam (ferro dan non ferro serta paduannya) untuk aplikasi pada lingkungan tertentu, ditinjau dari ketahanan korosinya.

#### B. Jenis logam

##### 1. Baja Karbon dan Baja Paduan

Baja karbon, merupakan bahan yang banyak digunakan untuk keperluan konstruksi dan peralatan lain, karena sifat mekanisnya yang baik dan mudah dikerjakan dengan mesin serta mudah dibentuk, tetapi baja karbon ketahanan korosinya terbatas.

Sebagaimana telah diketahui baja karbon dapat dibagi menjadi 3 kategori, yaitu baja karbon rendah, baja karbon menengah dan baja karbon tinggi. Baja karbon rendah atau yang dikenal dengan mild steel biasanya

mempunyai kandungan karbon kurang 0,3% dan mengandung unsur padu lainnya (mangan, silikon, fosfor, belerang, oksigen dan nitrogen), sehingga mild steel mempunyai sifat mekanis yang cukup baik. Unsur-unsur penambah dalam baja karbon ini tidak mempunyai pengaruh yang signifikan terhadap ketahanan korosinya.

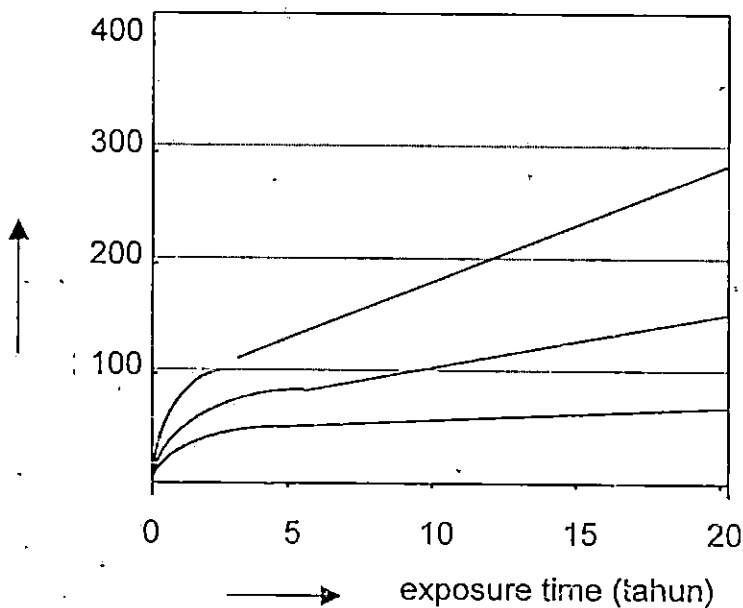
Ketahanan korosi baja karbon adalah terbatas, di mana korosi akan menjadi lebih cepat apabila baja karbon tersebut digunakan dalam lingkungan industri dan laut dibandingkan pada lingkungan perkotaan. Baja ini terkorosi di lingkungan laut, asam, meskipun baja ini dapat digunakan pada lingkungan asam sulfat dengan konsentrasi 90%. Baja karbon ini dapat digunakan sebagai tempat penampungan bahan alkalin, tetapi akan terkorosi dan kemungkinan akan terjadi penggetasan (embrittlement) oleh soda abu (caustic embrittlement).

Baja paduan yang mengandung unsur paduan lebih dari 1% dapat memodifikasi sifat-sifatnya seperti kekuatan dan sifat mampu keras. Unsur-unsur yang ditambahkan adalah krom, nikel, molibdenum, fosfor dan vanadium. Jenis baja paduan yang sering digunakan untuk keperluan di lingkungan korosif adalah high strength low alloy steel (HSLA). Baja paduan (HSLA) ini atau yang juga sering disebut sebagai micro alloyed steel mempunyai kandungan yang relatif kecil (0,005-0,01%) unsur-unsur seperti niobium, vanadium, dan titanium untuk menghasilkan baja berkekuatan tinggi, sehingga dapat digunakan sebagai pipa-pipa bertekanan tinggi. Baja ini dapat digunakan pada lingkungan korosif menengah, dan pada lingkungan yang sangat korosif ketahanan korosinya tetap lebih baik dibandingkan dengan baja karbon.

Jenis baja paduan lain yang banyak digunakan untuk keperluan yang mempunyai ketahanan korosi adalah weathering steel yang mempunyai ketahanan korosi atmosfer yang sangat bagus dibandingkan dengan plain carbon steel, karena adanya unsur padu seperti fosfor, krom, nikel dan tembaga. Adanya unsur-unsur padu tersebut menjadikan produk korosi dipermukaan baja menjadi rapat/padat dan melekat secara kuat dipermukaan

sehingga dapat mencegah korosi yang berkelanjutan. Baja ini (weathering steel) dapat digunakan tanpa pelindung cat pada daerah yang tidak mengandung bahan kimia agresif. Masalah lain ialah baja ini akan terkena noda (stain) jika kena air hujan.

Laju korosi dari baja yang disebutkan diatas pada lingkungan industri dapat dilihat pada gambar di bawah ini



Gb.8.1. Laju korosi atmosferik pada jenis baja dalam lingkungan industri.

## 2. Besi Tuang

Paduan besi yang mengandung karbon lebih dari 2% disebut dengan besi tuang. Besi tuang dapat dikatakan sebagai logam yang murah karena mempunyai sifat mampu tuang yang baik, sehingga mudah dalam proses pembuatan benda tuang yang rumit bentuknya, dan titik cairnya yang rendah ( $1250^{\circ}\text{C}$ )

### a. Besi tuang kelabu

Komposisi besi tuang kelabu adalah 2-4% C, 1-3% Si, dan merupakan logam konstruksi yang murah. Karbon dalam besi tuang berupa karbon bebas dalam bentuk grafit (strukturnya berbentuk sepihan) dan permukaan perpatahannya berwarna kelabu. Besi tuang kelabu mempunyai kekuatan

tekan (compressive strength) yang cukup tinggi (3-4 kali tensile strengthnya) dan mempunyai sifat mampu dikerjakan dengan mesin (machineability). Sifat lainnya ialah tahan aus dan ketahanan meredam getaran yang cukup baik, tetapi sifat yang jelek dari besi tuang kelabu adalah getas (brittle).

Besi tuang kelabu umumnya mempunyai ketahanan korosi sama dengan baja. Bentuk korosi yang terjadi pada besi tuang kelabu adalah grafitisasi, di mana matrik besi akan terkorosi, sehingga tinggal jaringan grafitnya.

b. Besi tuang putih.

Besi tuang putih ini bentuk karbon seluruhnya berupa karbida besi, sehingga ia mempunyai sifat sangat keras, rapuh dan sulit untuk dikerjakan dengan mesin, serta mempunyai warna perpatihan putih. Besi tuang putih ini sangat banyak digunakan sebagai rol, peralatan gerinda dan peralatan lain yang memerlukan ketahanan keausan yang tinggi. Ketahanan korosinya sama dengan besi tuang kelabu, tetapi korosinya bukan grafitisasi karena karbonnya tidak berupa grafit.

c. Besi tuang mampu bentuk.

Besi tuang mampu bentuk ini diperoleh dari proses perlakuan panas besi tuang putih atau melalui proses annealing yang cukup panjang, sehingga kandungan karbon yang berupa karbida besi akan berubah menjadi grafit dalam bentuk *cluster atau rosets*, disamping bentuk serpihan. Dengan struktur seperti ini (karbon dalam bentuk serpihan grafit dan cluster serta rosets) maka sifat besi tuang ini menyerupai sifat besi tuang kelabu, tetapi besi tuang ini lebih ulet (ductile). Ketahanan korosinya sama dengan besi tuang kelabu. Besi tuang mampu bentuk ini harganya lebih mahal karena proses pembuatannya lebih rumit dan memerlukan proses tambahan yang memerlukan biaya tambahan. Oleh karena itu besi tuang tidak banyak digunakan dalam bidang rekayasa.

d. Besi tuang ulet atau Spheroidal graphite atau Besi tuang noduler.

Besi tuang ini mengandung grafit berbentuk spheroidal atau noduler sebagai hasil proses perlakuan panas khusus pada lelehan logam dengan penambahan cerium atau magnesium. Hasil proses ini menjadikan besi tuang ini mempunyai sifat yang lebih kuat dan lebih ulet. Sifat mekanis besi tuang ini dapat diubah dengan proses perlakuan panas seperti yang dilakukan pada kebanyakan baja. Oleh karena kombinasi sifat yang dimiliki pada besi tuang ini maka besi tuang noduler ini lebih banyak digunakan pada bidang rekayasa, dibandingkan dengan besi tuang kelabu dan besi tuang mampu bentuk. Penggunaannya banyak untuk pipa air, poros engkol pada kendaraan. Sifat ketahanan korosinya hampir sama dengan besi tuang kelabu, tetapi grafitisasi yang terjadi lebih kecil dibandingkan dengan besi tuang kelabu, artinya lebih tahan terhadap korosi dibandingkan besi tuang kelabu.

e. Besi tuang silikon tinggi (high silicon cast iron)

Besi tuang ini mengandung 14,5% Si, 1% karbon, dan sisanya besi. Besi tuang ini mempunyai ketahanan korosi yang kurang baik untuk bahan-bahan kimia, karena terbentuknya lapisan  $\text{SiO}_2$  dipermukaannya. Besi tuang ini dapat digunakan dilingkungan asam sulfat pada seluruh konsentrasi sampai pada titik didihnya. Di samping itu ia juga dapat digunakan pada lingkungan asam nitrat pada banyak konsentrasi dan temperatur. Jika besi tuang ini dipadukan dengan 4,5% krom maka ia mempunyai ketahanan terhadap asam klorida (HCl) pada temperatur kamar dan larutan agresif yang mengandung klorida seperti ferric-chloride, tetapi besi tuang ini sangat getas dan rentan terhadap thermal stressing dan beban impak.

f. Austenitic Cast Iron (besi tuang austenitik)

Besi tuang austenitik ini mengandung 12-13% nikel (dengan atau tanpa krom dan tembaga) sehingga meningkatkan ketahanan korosi, abrasi dan panas serta sifat mekanisnya. Ketahanan korosi besi tuang austenitik ini lebih tinggi dibandingkan dengan besi tuang kelabu. Sebagai contoh dalam



lingkungan air laut yang mengalir ketahanan korosinya 10 kali lebih besar dibandingkan besi tuang kelabu. Penggunaan besi tuang ini untuk katup-katup, rumah pompa, kotak kondensor, dan peralatan pada pembangkit listrik. Sifat lainnya ialah besi tuang ini immune terhadap grafitisasi.

g. High Chromium Iron

Jenis logam ini adalah paduan antara besi tuang putih dengan 12-13% krom untuk memperoleh ketahanan abrasi dibawah lingkungan yang korosif dan temperatur tinggi.

### 3. Baja Tahan Karat

Baja tahan karat adalah paduan besi yang ketahanan korosinya sangat bergantung pada lapisan tipis film pasif oksida krom transparan yang terbentuk dipermukaannya. Lapisan film pasif ini terbentuk apabila dua keadaan saling bertemu, yaitu keadaan (a) matrik bahan paling sedikit mempunyai kandungan krom terlarut sebesar 11%, dan (b) adanya suplai oksigen.

Apabila kedua kondisi tersebut di atas bertemu, maka baja tahan karat akan mempunyai ketahanan korosi yang sangat baik pada banyak lingkungan korosif. Memang juga terdapat beberapa masalah yang dapat mengakibatkan pecahnya lapisan protektif, sehingga terjadi bentuk-bentuk korosi yang berbeda seperti;

a. Korosi sumuran dan korosi celah (pitting and crevice corrosion)

Korosi sumuran dan korosi celah dapat terjadi karena hilangnya atau pecahnya lapisan pasif protektif setempat. Lingkungan yang mengandung klorida, bromida, dan fluorida akan dapat memecahkan lapisan film protektif krom oksida sehingga menimbulkan adanya celah yang dalam yang kemudian akan terjadi reaksi anodik di daerah di mana lapisan pasif protektif tersebut pecah. Selanjutnya akan terjadi celah yang halus atau sempit sehingga akses oksigen menjadi sangat jelek, dan berakibat terjadinya korosi sumuran dan korosi celah.

b. Korosi retak tegang (stress corrosion cracking)

Korosi retak tegang terjadi pada baja tahan karat akibat adanya kombinasi antara lingkungan korosif (lingkungan yang mengandung klorida) dan terjadinya tegangan tarik akibat pembebanan atau adanya tegangan sisa, serta temperatur di atas  $60^{\circ}\text{C}$ .

c. Korosi intergranular (intergranular corrosion)

Korosi intergranular terjadi jika disekitar daerah batas butir menjadi kekurangan unsur krom akibat pembentukan krom karbida pada temperatur antara  $550^{\circ}\text{C}$ - $850^{\circ}\text{C}$  yang kita sebut dengan proses "*sensitisasi*". Kejadian ini timbul akibat proses pengelasan, dan kasus ini disebut dengan "*weld decay*".

d. Korosi galvanik

Korosi ini terjadi jika penggunaan baja tahan karat digabungkan dengan logam yang lebih aktif seperti mild steel, dan lainnya (ingat deret galvanik).

Guna memenuhi kebutuhan akan sifat dari baja tahan karat, maka dikembangkan jenis-jenis baja tahan karat, dan pada umumnya klasifikasi dari jenis baja tahan karat dibagi dalam 5 klasifikasi, yaitu:

a. Baja tahan karat feritik (ferritic stainless steel)

Baja tahan karat feritik adalah jenis baja yang mengandung 11-20% krom dan hanya mengandung sejumlah kecil unsur paduan lainnya. Jenis baja tahan karat feritik, komposisi, dan penggunaannya ditunjukkan pada tabel di bawah ini.

Tabel 1 Jenis baja tahan karat feritik, komposisi, dan penggunaannya.

AISI	Komposisi (%)				Penggunaan
	C	Cr	Ni	Lainnya	
409	0,06	11,5	-	0,5 To	Baja tahan panas, Mudah dibentuk dan dilas. Utamanya digunakan saluran gas buatan mesin otomotif atau aplikasi pengelasan, dimana unjuk kerjanya seperti baja galvanis
410S	0,06	12,5			Digunakan untuk keperluan peralatan tahan panas sampai $650^{\circ}\text{C}$ pada power plant dan penyulingan minyak, di mana kekuatan yang tinggi tidak diperlukan pada temperatur tinggi.

430	0,06	17			Untuk komponen interior pada bidang arsitektur, otomotif, dan jika di las cenderung getas.
444	0,02	18,5		2,0 Mo dan 0,4 Ti	Untuk peratan pemindah panas dan tangkin air panas, tidak mudah terkena korosi retak tegang akibat adanya klorida dan sangat tahan terhadap korosi sumuran, celah, dan korosi intergranular.
3CR 12	0,02	11,6	0,65	25Ti	Digunakan pada lingkungan korosif menengah dan lingkungan yang basah dan mempunyai sifat mampu las sampai ketebalan 25 mm.

b. Baja Tahan Karat Martensitik

Baja tahan karat martensitik dapat dikeraskan dengan proses periakuan panas seperti kebanyakan baja karbon. Baja tahan karat martensitik mengandung 12-18% kromi, tetapi hanya mengandung sedikit atau bahkan tidak sama sekali bahan pemadu lainnya. Meskipun demikian untuk dapat dikeraskan maka kandungan karbonnya sedikit lebih besar dibandingkan dengan baja tahan karat feritik. Seperti halnya baja tahan karat feritik baja tahan karat martensitik ini juga bersifat magnetik, mempunyai tegangan tarik yang tinggi, tetapi kurang ketahanan korosinya.

Baja tahan karat martensitik ini banyak digunakan sebagai sudu-sudu turbin gas, rumah katup dan bodinya, baut dan mur, pisau, pegas, peralatan bedah dan peralatan kimia. Baja ini tidak cocok untuk pembentukan dengan proses pengelasan. Khusus untuk jenis 402C banyak digunakan untuk peralatan bedah dan keperluan rekayasa permesinan. Jenis baja tahan karat martensitik dan penggunaannya ditunjukkan pada tabel 2.

Tabel 2. Jenis, komposisi, dan pemakaian baja tahan karat martensitik.

AISI	Komposisi (%)				Penggunaan
	C	Cr	Ni	Lainnya	
410	0,10	12,5	-		Pemakaian umum untuk lingkungan korosif menengah
416	0,10	12,5		0,2 S	Keperluan permesinan
420	0,25	12,5			Keperluan rekayasa seperti untuk katup pada pompa dan poros.