

## **BAB II**

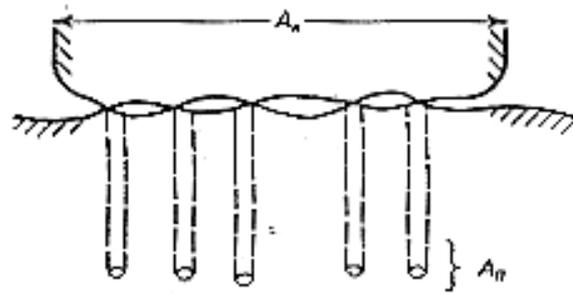
### **DASAR TEORI**

#### **2.1 Keausan dan Oksidasi**

Definisi dari korosi adalah perusakan atau penurunan mutu dari material akibat bereaksi dengan lingkungan [1], dalam hal ini adalah interaksi secara kimiawi. Sedangkan penurunan mutu yang diakibatkan interaksi secara fisik bukan disebut korosi, namun biasa dikenal sebagai erosi dan keausan. Keausan umumnya didefinisikan sebagai kehilangan material secara progresif atau pemindahan sejumlah material dari suatu permukaan sebagai suatu hasil pergerakan relatif antara permukaan tersebut dan permukaan lainnya. Keausan telah menjadi perhatian praktis sejak lama, tetapi hingga beberapa saat lamanya masih belum mendapatkan penjelasan ilmiah yang besar sebagaimana halnya pada mekanisme kerusakan akibat pembebanan tarik, impak, puntir atau fatigue. Hal ini disebabkan masih lebih mudah untuk mengganti komponen/part suatu sistem dibandingkan melakukan disain komponen dengan ketahanan/umur pakai (*life*) yang lama.

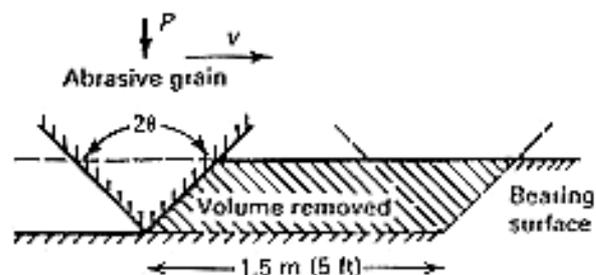
Pembahasan mekanisme keausan pada material berhubungan erat dengan gesekan (*friction*) dan pelumasan (*lubrication*). Ketiga subyek ini yang dikenal dengan nama ilmu *Tribologi*. Keausan bukan merupakan sifat dasar material, melainkan respons material terhadap sistem luar (kontak permukaan). Material apapun dapat mengalami keausan disebabkan mekanisme yang beragam. Keausan dapat dibagi menjadi [3] :

1. Keausan adhesive yaitu terjadi ketika kontak permukaan dari dua material atau lebih yang mengakibatkan adanya perlekatan satu sama lain dan pada akhirnya terjadi pelepasan/pengoyakan salah satu material, seperti diperlihatkan pada gambar 2.1.



Gambar 2.1 Ilustrasi skematis keausan adhesive [3]

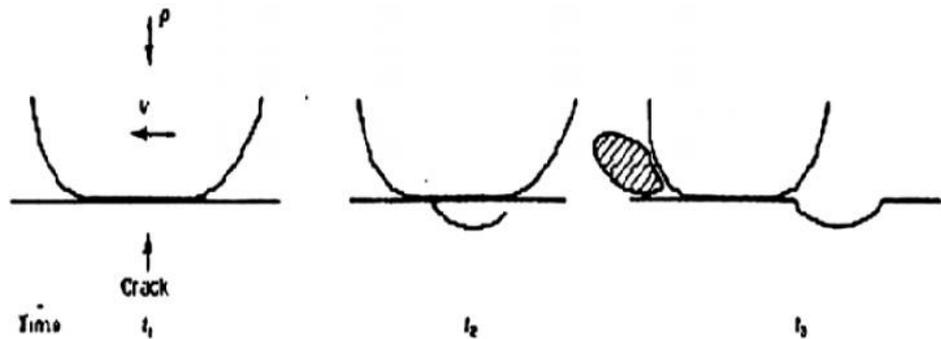
2. Keausan abrasif: yaitu terjadi ketika suatu partikel keras (*asperity*) dari material tertentu meluncur pada permukaan material lain yang lebih lunak sehingga terjadi penetrasi atau pemotongan material yang lebih lunak. Tingkat keausan pada mekanisme ini ditentukan oleh derajat kebebasan (*degree of freedom*) partikel keras atau *sperity* tersebut. Sebagai contoh partikel pasir silica akan menghasilkan keausan yang lebih tinggi ketika diikat pada suatu permukaan seperti pada kertas amplas, dibandingkan bila partikel tersebut berada di dalam sistem slury. Pada kasus pertama partikel tersebut kemungkinan akan tertarik sepanjang permukaan dan mengakibatkan pengoyakan sementara pada kasus terakhir partikel tersebut mungkin hanya berputar (*rolling*) tanpa efek abrasi, seperti pada gambar 2.2.



Gambar 2.2 Ilustrasi skematis keausan abrasif [3]

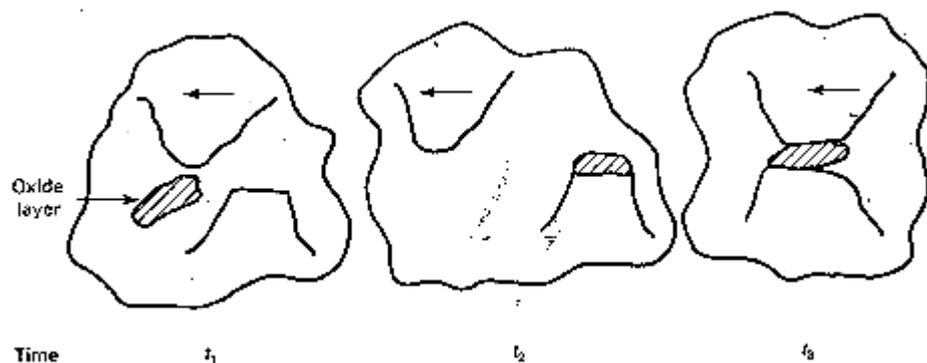
3. Keausan lelah: merupakan mekanisme yang relatif berbeda dibandingkan dua mekanisme sebelumnya, yaitu dalam hal interaksi permukaan. Baik keausan adhesive maupun abrasif melibatkan hanya satu interaksi sementara pada keausan lelah dibutuhkan interaksi multi. Permukaan yang mengalami beban berulang akan mengarah pada pembentukan retak-retak mikro. Retak-

retak tersebut pada akhirnya menyatu dan menghasilkan pengelupasan material. Tingkat keausan sangat tergantung pada tingkat pembebanan.



Gambar 2.3 skematis mekanisme keausan lelah [3]

4. Keausan oksidasi (keausan korosif): Pada prinsipnya mekanisme ini dimulai dengan adanya perubahan kimiawi material di bagian permukaan oleh faktor lingkungan. Kontak dengan lingkungan ini akan menghasilkan pembentukan lapisan pada permukaan dengan sifat yang berbeda dengan material induk. Sebagai konsekuensinya, material pada lapisan permukaan akan mengalami keausan yang berbeda. Hal ini selanjutnya mengarah kepada perpatahan interface antara lapisan permukaan dan material induk dan akhirnya seluruh lapisan permukaan itu akan tercabut.

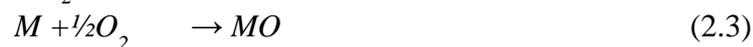


Gambar 2.4 Ilustrasi skematis keausan oksidasi [3]

Dalam reaksi kimia di mana oksigen ditambahkan pada unsur lain disebut oksidasi dan unsur yang menyebabkan terjadinya oksidasi disebut unsur pengoksidasi. Setiap reaksi di mana oksigen dilepaskan dari suatu senyawa merupakan reaksi reduksi

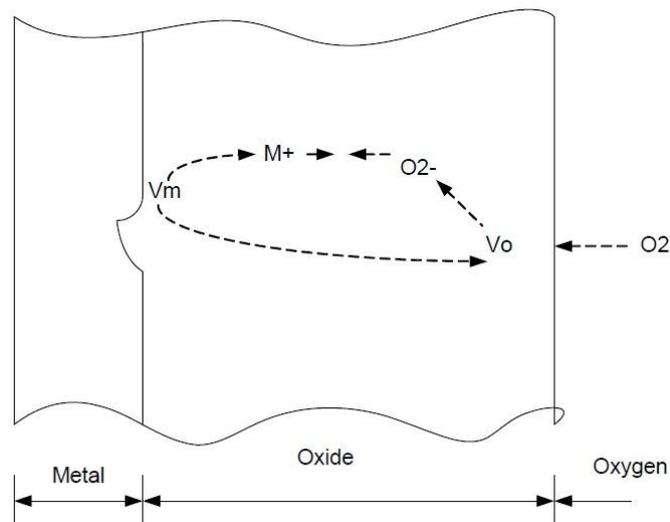
dan unsur yang menyebabkan terjadinya reduksi disebut unsur pereduksi. Jika satu materi teroksidasi dan materi yang lain tereduksi maka reaksi demikian disebut reaksi reduksi-oksidasi, disingkat reaksi redoks (*redox reaction*).

Reaksi redoks terjadi melalui tranfer elektron. Tidak semua reaksi redoks melibatkan oksigen. Akan tetapi semua reaksi redoks melibatkan transfer elektron dari materi yang bereaksi. Jika satu materi kehilangan elektron, materi ini disebut teroksidasi. Jika satu materi memperoleh elektron, materi ini disebut tereduksi. Dalam reaksi redoks, satu reagen teroksidasi yang berarti menjadi reagen pereduksi dan reagen lawannya tereduksi yang berarti menjadi reagen pengoksidasi. Oksidasi yang melibatkan logam (M) dengan oksigen, proses oksidasinya adalah sebagai berikut:



Pertumbuhan Oksida :

1. Awal proses oksida adalah pembentukan oksida dimana terjadi penarikan oksigen ke permukaan logam yang dapat dilihat pada gambar 2.5.
2. Reaksi antara oksigen dengan logam.
3. Oksidasi terbentuk di permukaan logam
4. Proses berikutnya adalah pertumbuhan oksida yang telah terbentuk.



Gambar 2.5 mekanisme pertumbuhan oksida [3]

Kecenderungan metal untuk bereaksi dengan oksigen didorong oleh penurunan energi bebas yang mengikuti pembentukan oksidanya. Kombinasi hukum termodinamika pertama dan kedua dengan menghubungkan fungsi keadaan entalpi (dengan proses pada tekanan tetap). Kombinasi ini dapat memberikan informasi yang sederhana kepada kita tentang apakah reaksi dapat berlangsung atau tidak berlangsung. Kombinasi ini menghasilkan Persamaan Energi bebas Gibbs yang didapat dari persamaan entropi dan entalpi. Hal ini mengindikasikan bahwa selisih atau tidak selisih dari kedua fungsi keadaan memberikan informasi baru tentang keadaan reaksi. Sehingga energi bebas Gibbs didefinisikan sebagai energi yang menyertai reaksi merupakan ukuran pasti kecenderungan reaksi. Nilai energi bebas Gibbs mengindikasikan apakah reaksi berlangsung sampai akhir atau tidak, dapat dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut [9]

$$G = H - TS \quad (2.4)$$

$$\Delta G_{T,p} \leq 0 \quad (2.5)$$

Persamaan Energi Bebas Gibbs :

$$\Delta G = \Delta H - T \Delta S \quad (2.6)$$

dimana  $\Delta G$  = Energi bebas Gibbs

Jika  $\Delta G$  sangat besar dan tandanya negatif menunjukkan bahwa reaksi berlangsung sampai akhir, sebaliknya jika  $\Delta G$  bernilai kecil dan bertanda negatif menunjukkan ada kemungkinan reaksi berlangsung pada satu arah sampai pada titik tertentu untuk reaksi selanjutnya akan menjadi nol dan reaksi berjalan pada arah balik. Pada kondisi  $\Delta G = 0$ , reaksi dikatakan secara termodinamika reversibel.

Perubahan energi bebas dalam pembentukan oksida untuk beberapa unsur dapat dilihat pada Tabel-2.1.

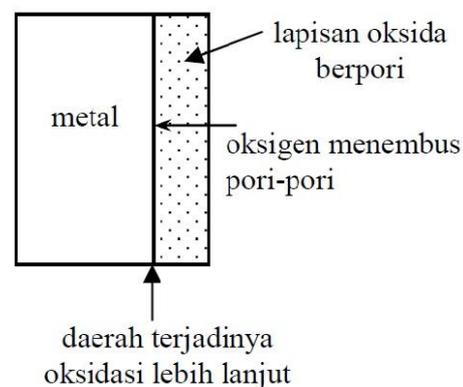
Tabel-2.1. Energi Bebas Pembentukan Oksida (per atom oksigen) pada 500K dalam Kilokalori [11]

Kalsium	-138,2		Hidrogen	-58,3
Magnesium	-130,8		Besi	-55,5
Aluminium	-120,7		Kobalt	-47,9
Titanium	-101,2		Nikel	-46,1
Natrium	-83,0		Tembaga	-31,5
Chrom	-81,6		Perak	+0,6
Zink	-71,3		Emas	+10,5

Kebanyakan unsur yang tercantum dalam Tabel-2.1 memiliki energi bebas pembentukan oksida bernilai negatif, yang berarti bahwa unsur ini dengan oksigen mudah berreaksi membentuk oksida.

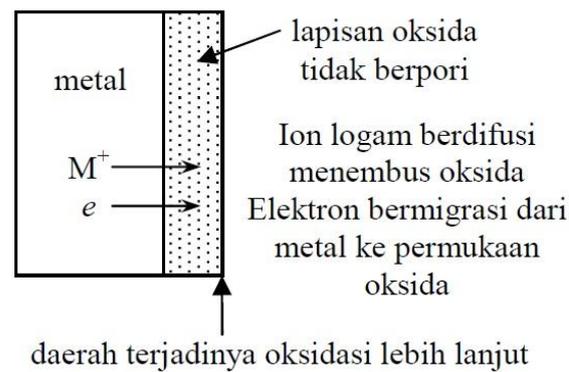
Pada umumnya lapisan oksida yang terjadi di permukaan metal cenderung menebal. Berikut ini beberapa mekanisme yang mungkin terjadi:

1. Jika lapisan oksida yang pertama-tama terbentuk adalah berpori, maka molekul oksigen bisa masuk melalui pori-pori tersebut dan kemudian bereaksi dengan metal di perbatasan metaloksida. Lapisan oksida bertambah tebal. Situasi ini terjadi jika rasio volume oksida-metal kurang dari satu. Lapisan oksida ini bersifat non-protektif, tidak memberikan perlindungan pada metal yang dilapisinya terhadap proses oksidasi lebih lanjut. Peristiwa ini digambarkan pada gambar 2.6



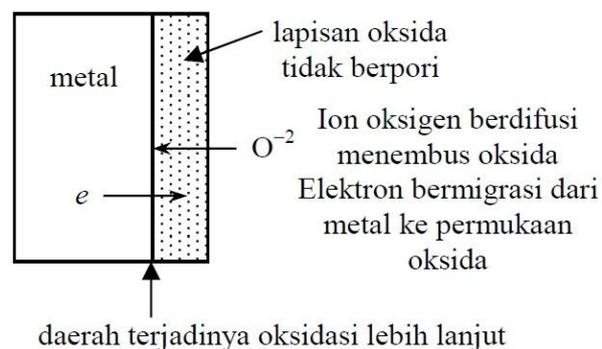
Gambar 2.6 lapisan oksida berpori [11]

2. Jika lapisan oksida tidak berpori, ion metal bisa berdifusi menembus lapisan oksida menuju bidang batas oksida-udara; dan di perbatasan oksida-udara ini metal bereaksi dengan oksigen dan menambah tebal lapisan oksida yang telah ada. Proses oksidasi berlanjut di permukaan. Dalam hal ini elektron bergerak dengan arah yang sama agar pertukaran elektron dalam reaksi ini bisa terjadi. Peristiwa ini digambarkan pada gambar 2.7



Gambar 2.7 lapisan oksida tak berpori [11]

3. Jika lapisan oksida tidak berpori, ion oksigen dapat berdifusi menuju bidang batas metal-oksida dan bereaksi dengan metal di bidang batas metal-oksida. Elektron yang dibebaskan dari permukaan logam tetap bergerak ke arah bidang batas oksida-udara. Proses oksidasi berlanjut di perbatasan metal-oksida. Peristiwa ini digambarkan pada gambar 2.8



Gambar 2.8 lapisan oksida tak berpori [11]

4. Mekanisme lain yang mungkin terjadi adalah gabungan antara 2) dan 3) dimana ion metal dan elektron bergerak ke arah luar sedangkan ion oksigen bergerak ke arah dalam. Reaksi oksidasi bisa terjadi di dalam lapisan oksida.

## 2.2 Korosi

Kata korosi berasal dari bahasa latin “corrodere” yang artinya merusak logam atau berkarat. Jadi jelas korosi sudah dikenal sejak lama dan sangat merugikan. Kalau kita definisikan, maka korosi itu adalah proses degradasi, deteorisasi, atau kerusakan material yang terjadi disebabkan oleh pengaruh lingkungan sekelilingnya. Ada definisi dari pakar lain :

1. Perusakan material tanpa perusakan mekanis.
2. Kebalikan dari metalurgi ekstratif.
3. Proses elektro kimia dalam mencapai kesetimbangan termodinamika suatu sistem. Jadi korosi adalah merupakan sistem termodinamika logam dengan lingkungan (air, udara, tanah), yang berusaha mencapai kesetimbangan. Sistem ini dikategorikan setimbang bila logam telah membentuk oksida atau senyawa kimia lain yang lebih stabil (berenergi paling rendah).[2]

Korosi secara elektrokimia dapat diilustrasikan dengan reaksi antar ion logam dengan molekul air. Mula-mula akan terjadi hidrolisis yang akan mengakibatkan keasaman meningkat [13]. Hal ini dapat diterangkan dengan persamaan berikut :

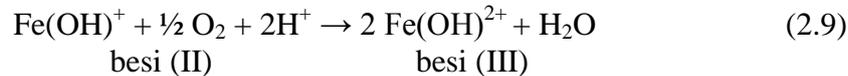


Persamaan ini menggambarkan reaksi hidrolisis yang umum, dimana pada elektrolit yang sebenarnya akan terdapat peran klorida yang penting tetapi akan menjadi rumit untuk diuraikan. Kecenderungan yang rendah dari klorida untuk bergabung dengan ion-ion hidrogen dalam air mendorong menurunnya pH larutan elektrolit.

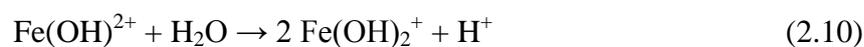
Persamaan reaksi jika reaksi di atas adalah ion besi dan molekul air adalah sebagai berikut :



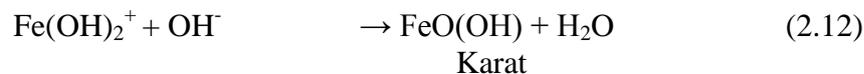
Kemudian reaksi ini dapat berlanjut dengan terjadinya reaksi oksidasi oleh kehadiran oksigen terhadap besi (II), sehingga akan terbentuk ion-ion besi (III). Persamaan reaksi tersebut dapat diuraikan sebagai berikut :



Reaksi-reaksi hidrolisis selanjutnya dimungkinkan, yang menyebabkan larutan semakin asam :



Untuk selanjutnya dapat diuraikan reaksi dari ion-ion kompleks sehingga terbentuk hasil korosi utama yaitu magnetit dan karat, berturut-turut dinyatakan dengan rumus  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  dan  $\text{FeO(OH)}$  Persamaan reaksi-reaksi tersebut adalah :



Laju korosi secara elektrokimia merupakan kecepatan rata-rata perubahan ketebalan atau berat dari logam yang mengalami korosi terhadap waktu melalui proses elektrokimia. [13]

Korosi disebut juga sebagai penyakit dalam lingkungan teknik, walaupun secara tidak langsung tidak termasuk dalam produk teknik. Studi dalam korosi adalah sejenis usaha pengendalian kerusakan supaya serangan korosi serendah mungkin dan dapat melampaui nilai ekonomisnya, atau jangan ada logam jadi rongsokan sebelum waktunya. Caranya adalah dengan pengendalian secara preventif supaya menghambat serangan korosi. Cara ini lebih baik daripada memperbaiki secara represif yang biayanya jauh lebih besar. [2]

Dalam korosi yang dimaksud dengan lingkungan sekelilingnya dapat berupa udara dengan sinar matahari, embun, air tawar, air laut, air danau, air sungai, dan tanah yang berupa tanah pertanian, tanah rawa, tanah kapur, dan tanah pasir berbatu-batu.

Kerugian yang disebabkan oleh korosi material akan lebih meningkat sebagai akibat pengembangan industri dan proses baru dengan kondisi kerja pada temperatur

dan tekanan yang lebih tinggi. Kemudian biaya perbaikan akan naik jauh lebih besar dari perkiraan sebelum pergantian proses. Biaya yang dikeluarkan diamping yang telah disebutkan, juga masih ada kerugian yaitu [2]:

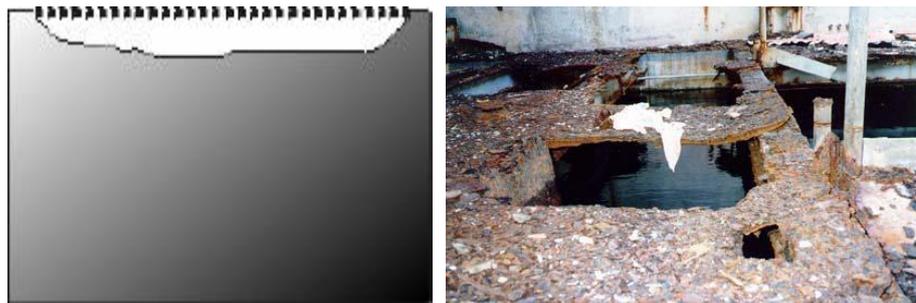
1. Kehilangan efisiensi karena produk korosi akan menyumbat saringan dan akan menjadi isolator panas, jika digunakan untuk pendingin.
2. Produk yang dihasilkan akan terontaminasi oleh produk korosi (dalam hal ini industri makanan).
3. Terjadinya penurunan dimensi dan kekuatan akibat penipisan oleh korosi.
4. Kerugian produksi selama pekerjaan terhenti akibat perbaikan.
5. Biaya penggantian komponen yang terkena korosi.

### 2.2.1 Macam – macam Korosi

Jenis –jenis korosi antara lain [2]:

#### 1. Korosi Merata/Seragam (*Uniform Corrosion*)

Jenis korosi yang dikarakterisasikan oleh reaksi kimia atau elektrokimia dengan penampakan produk korosi dan peronggaan skala besar dan merata. Contohnya pada pelat baja atau profil, permukaan bersih dan logamnya homogen, bila dibiarkan di udara biasa beberapa bulan maka akan berbentuk korosi merata pada seluruh permukaannya seperti terlihat pada gambar 2.9.



Gambar 2.9 Korosi seragam [8].

Usaha pengendaliannya:

1. Diberi lapisan pelindung yang mengandung inhibitor seperti minyak.
2. Bila sudah berbentuk barang jadi dilindungi dengan pengecatan.
3. Untuk dinding kapal laut yang luas diberi proteksi katodik.

4. Untuk jangka panjang pemakaian yang lebih panjang diberi logam berpaduan tembaga 0,4 %.

## 2. Korosi Dwi Logam (*galvanic corrosion*)

Jenis korosi yang terjadi antara dua buah logam dengan nilai potensial berbeda saat dua buah logam bersatu dalam suatu elektrolit yang korosif. Contohnya bila besi kontak langsung dengan tembaga dimana tembaga lebih mulia, maka besi akan bersifat anodik dan akan mengorbankan diri sehingga akan terjadi korosi yang berat pada besi, sedangkan tembaganya tetap utuh. Hal ini dapat dilihat pada gambar 2.10.



Gambar 2.10 Korosi dwi logam [4].

Usaha pengendaliannya dengan cara memberi isolator yang cukup tebal hingga tidak ada aliran elektron.

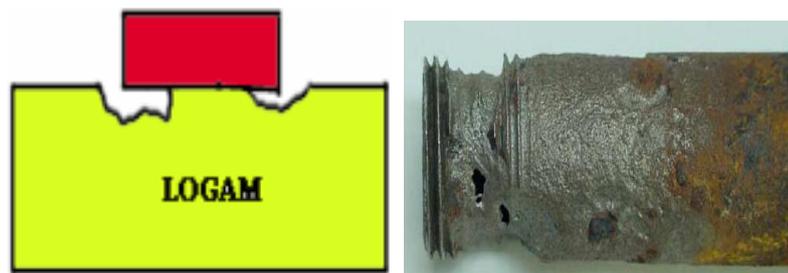
Tabel 2.2 dibawah ini menunjukkan reaktivitas relatif pada sejumlah logam dan paduan dalam air laut. Paduan di dekat bagian atas adalah katodik dan tidak reaktif, sedangkan pada bagian bawah yang paling anodik, tidak ada tegangan yang diberikan.

Tabel 2.2 Perbandingan nilai galvanik dari logam [5].

	Platinum
	Gold
	Graphite
	Titanium
	Silver
	[316 Stainless steel (passive)
	[304 Stainless steel (passive)
	[Inconel (80Ni-13Cr-7Fe) (passive)
	[Nickel (passive)
	[Monel (70Ni-30Cu)
	Copper-nickel alloys
	Bronzes (Cu-Sn alloys)
	Copper
	[Brasses (Cu-Zn alloys)
	[Inconel (active)
	[Nickel (active)
	Tin
	Lead
	[316 Stainless steel (active)
	[304 Stainless steel (active)
	[Cast iron
	[Iron and steel
	Aluminum alloys
	Cadmium
	Commercially pure aluminum
	Zinc
	Magnesium and magnesium alloys

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

Korosi yang terjadi pada logam yang berdekatan dengan logam lain atau non logam dan diantaranya ada celah yang dapat menahan kotoran dan air yang menjadi sumber korosi. Konsentrasi O<sub>2</sub> pada mulut lebih kaya dibandingkan pada bagian dalam, sehingga bagian dalam lebih anodik dan bagian mulut jadi katodik, maka akan timbul arah arus dari dalam ke mulut. (Gambar 2.11)



Gambar 2.11 Korosi Celah [4].

Usaha pengendaliannya adalah:

1. Memberi isolator pada celah.
  2. Mengeringkan celah.
  3. Bersihkan dari kotoran.
4. Korosi Sumuran (*Pitting Corrosion*)

Korosi sumuran merupakan jenis korosi yang menyerang secara lokal selektif yang menghasilkan bentuk-bentuk permukaan lubang-lubang di logam. Terjadinya korosi jenis ini disebabkan komposisi logam tidak homogen dan dapat menimbulkan korosi yang dalam pada beberapa tempat. Dapat juga karena ada kontak antara logam yang berlainan dan logam kurang mulia, maka pada daerah batas timbul korosi berbentuk sumur. (Gambar 2.12)



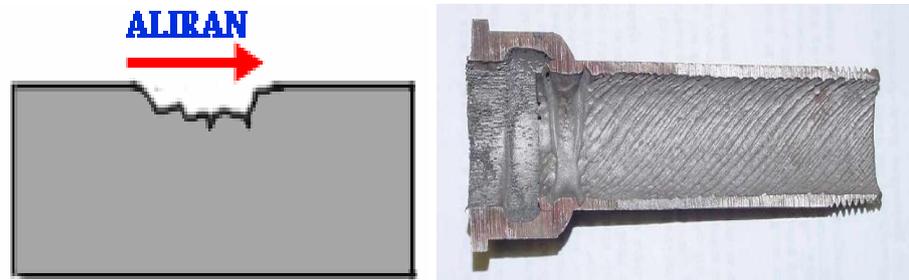
Gambar 2.12 Korosi Sumuran [8]

Usaha pengendaliannya antara lain :

1. Pilih bahan yang homogen.
  2. Melindungi dari zat agresif.
  3. Memberikan inhibitor.
5. Korosi Erosi (*erosion corrosion*)

Korosi erosi merupakan jenis korosi yang menggunakan proses mekanik melalui pergerakan relatif antara aliran gas atau cairan korosif dengan logam. Dalam hal ini perusakan karena erosi dan korosi saling mendukung. Logam yang telah terkena erosi akibat terjadi keausan dan menimbulkan bagian-bagian yang tajam dan kasar. Bagian-bagian inilah yang mudah terserang korosi dan bila ada gesekan akan menimbulkan abrasi lebih berat lagi dan seterusnya. Korosi erosi dapat juga disebabkan karena *impingment corrosion*, yaitu akibat

fluida sangat deras dan dapat mengikis film pelindung pada logam yang mengakibatkan korosi pada logam. (Gambar 2.13)



Gambar 2.13 Korosi Erosi [4].

Usaha pengendaliannya adalah:

1. Memberi pelindung dari zat yang agresif.
  2. Memberi inhibitor.
  3. Permukaan dies dihaluskan.
  4. Hindari aliran fluida yang terlalu deras.
  5. Mengurangi belokan fluida.
6. Korosi Retak Tegang (*stress corrosion cracking*)

Korosi retak tegang merupakan jenis korosi yang disebabkan kehadiran secara simultan tegangan tarik (*tensile stress*) dan media korosif yang menyebabkan terjadi penampakan retak di dalam logam. (Gambar 2.13)



Gambar 2.14 Korosi retak tegang [4].

Usaha pengendaliannya adalah:

1. Turunkan beban.
2. Lindungi dari senyawa yang korosif.
3. Memberi inhibitor.
4. Pada bagian yang terdapat streses harus direlaksasi.

### 7. Korosi Batas Butir (*intergranular corrosion*)

Korosi batas butir merupakan korosi yang menyerang secara lokal menyerang batas butir-butir logam sehingga butir-butir logam akan hilang atau kekuatan mekanik dari logam akan berkurang, Korosi ini disebabkan adanya kotoran (*impurity*) batas butir, adanya unsur yang berlebih pada sistem perpaduan atau penghilangan salah satu unsur pada daerah batas butir. (Gambar 2.15)

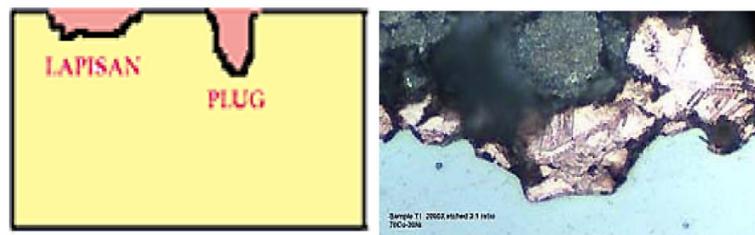


Gambar 2.15 Korosi batas butir [4].

Untuk pengendaliannya dapat dilakukan dengan cara menghindari terbentuknya karbida pada batas butir .

### 8. Hilangnya Unsur Paduan (*dealloying*)

Peluluhan selektif atau *dealloying* merupakan penghilangan salah satu unsur dari paduan logam oleh proses korosi. (Gambar 2.16)



Gambar 2.16 Korosi *Dealloying* [4].

### 9. Korosi Mikrobiologis

Korosi mikroba (*microbial corrosion*) adalah Korosi yang terjadi akibat aktivitas mikroba sebagai penyedia lingkungan yang korosif. Dalam hal ini biasanya terjadi pada pipa logam dalam tanah yang dibungkus oleh kain aspal yang terbuka dan menjadi koloni tempat bakteri sulfat. Bentuk korosinya pun sering menyerupai bekas lilitan kain pada pipa. (Gambar 2.17)



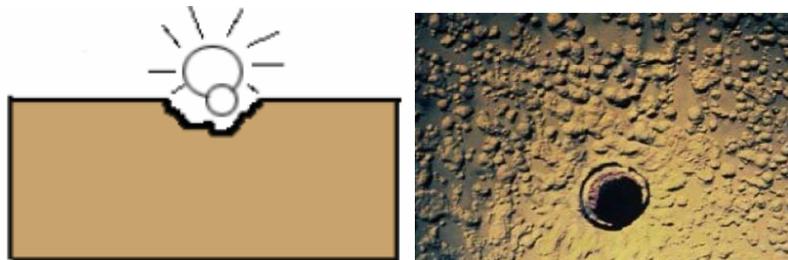
Gambar 2.17 Korosi mikrobiologis [4].

Untuk Pengendaliannya dapat dilakukan dengan :

1. Klorinasi supaya bakterinya mati.
2. Diberi cat anti fouling.

#### 10. Korosi Kavitasi

Peronggaan (*cavitation*) Peronggaan terjadi saat tekanan operasional cairan turun di bawah tekanan uap gelembung-gelembung gas yang dapat merusak permukaan logam dasar. (Gambar 2.18)



Gambar 2.18 Korosi kavitasi [4].

Pengendaliannya dapat dilakukan dengan :

1. *Surface finish* yang bagus dan dibuat licin.
2. Diberi pelapis atau pelindung.
3. Memperkecil tekanan hidrolis.
4. Menurunkan fibrasi.

#### 11. Korosi Lelah

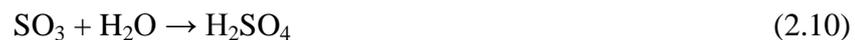
Bila logam mendapat beban siklus yang terus berulang tapi masih di bawah kekuatan luluh, maka setelah sekian lama akan patah karena terjadi kelelahan logam. Kelelahan dapat dipercepat dengan adanya serangan korosi yang sering menimbulkan kecelakaan seperti pada turbin uap.

Untuk pengendaliannya dapat dilakukan dengan :

1. Melicinkan permukaan hingga bebas dari tarikan.
2. Menggunakan inhibitor.
3. Dipilih material lain yang tahan korosi.
4. Memperkecil beban siklus.
5. Mempertebal benda kerja.
6. Menghilangkan konsentrasi tegangan.

## 12. Korosi Temperatur Tinggi

Terjadinya korosi pada temperatur tinggi diakibatkan oleh udara yang telah dicemari oleh gas  $\text{SO}_4$  dan  $\text{SO}_3$  yang berasal dari hasil pembakaran turbin gas. Di daerah pantai yang udaranya banyak mengandung  $\text{NaCl}$  pada sudut turbin yang bertekanan tinggi akan terkondensasi  $\text{NaSO}$  sebagai hasil reaksi :



$\text{Na}_2\text{SO}_4$  dalam keadaan temperatur tinggi menjadi cair dan akan menyerang logam sehingga larut dan menimbulkan korosi.

## 2.3 Korosi Erosi

Korosi erosi merupakan jenis korosi yang menggunakan proses mekanik melalui pergerakan relatif antara aliran gas atau cairan korosif dengan logam. Dalam hal ini perusakan karena erosi dan korosi saling mendukung. Logam yang telah terkena erosi akibat terjadi keausan dan menimbulkan bagian-bagian yang tajam dan kasar. Bagian-bagian inilah yang mudah terserang korosi dan bila ada gesekan akan menimbulkan abrasi lebih berat lagi dan seterusnya. Korosi erosi dapat juga disebabkan karena *impingment corrosion*, yaitu akibat fluida sangat deras dan dapat mengikis film pelindung pada logam yang mengakibatkan korosi pada logam [2].

### A. Penyebab Korosi Erosi

Ada beberapa penyebab korosi erosi antara lain :

## 1. Turbulensi aliran

Di dalam aliran yang turbulen gelembung udara akan semakin banyak dan bertekanan, sehingga serangan yang berupa benturan dan gesekan semakin kuat menyerang permukaan logam. Korosi erosi akibat turbulensi aliran ini terutama disebabkan oleh efek olakan dan peronggaan. Olakan atau turbulensi disebabkan oleh paking pemasangan yang tidak tepat, tonjolan akibat pengelasan, solder pada bagian dalam pipa atau sambungan, tikungan yang jari – jarinya terlalu kecil, dan sebagainya. Pada olakan atau turbulensi ini molekul–molekul fluida akan memberikan tekanan langsung pada logam sehingga terjadikeausan mekanik yang akan menyebabkan terjadinya korosi. Turbulensi aliran disebabkan oleh :

- a. Perubahan drastis pada diameter lubang bor atau arah pipa.



Gambar 2.19 Perubahan drastis diameter pipa [12].

- b. Penyekat pada sambungan yang buruk pemasangannya.



Gambar 2.20 Sambungan pipa, posisi seal tidak tepat [12].

- c. Adanya celah yang memungkinkan fluida mengalir di luar aliran utama.



Gambar 2.21 Ada celah, endapan (deposit) pada pipa [12].

2. Adanya produk korosi atau endapan lain yang dapat mengganggu aliran.
3. Peronggaan/Kavitasi

Kerusakan kavitasi merupakan bentuk khusus dari korosierosi yang disebabkan oleh terbentuknya gelembung–gelembung uap dan pecah pada permukaan logam. Biasanya terjadi pada propeller kapal laut, dimana fluida dengan kecepatan tinggi mengalir dibarengi terjadinya perubahan tekanan. Kavitasi disebabkan oleh pecahnya gelembung uap pada permukaan logam. Mekanismenya :

- a. Fluida menerjang permukaan logam.
- b. Tekanan hidrodinamika lokal turun.
- c. Timbul gelembung di permukaan logam.
- d. Aksi mekanik, misalnya adanya putaran, menyebabkan tekanan hidrodinamik lokal naik.
- e. Gelembung pecah, timbul gaya tekan yang besar pada permukaan logam. Terjadi deformasi plastic pada logam.

### **B. Mekanisme Pembentukan Korosi Erosi**

Proses terjadinya korosi secara umum adalah melalui beberapa tahap berikut :

1. Pada tahap pertama terjadi serangan oleh gelembung udara yang menempel di permukaan lapisan pelindung logam, karena adanya aliran turbulen yang melintas di atas permukaan logam tersebut.
2. Pada tahap kedua gelembung udara tersebut mengikis dan merusak lapisan pelindung.

3. Pada tahap ketiga, laju korosi semakin meningkat, karena lapisan pelindung telah hilang. Logam yang berada di bawah lapisan pelindung mulai terkorosi, sehingga membentuk cekungan, kemudian terjadi pembentukan kembali lapisan pelindung dan logam, menjadi tidak rata.

Bila aliran terus mengalir, maka akan terjadi serangan kembali oleh gelembung udara yang terbawa aliran. Serangan ini akan mengikis dan merusak lapisan pelindung yang baru saja terbentuk, rusaknya lapisan pelindung tersebut akan mengakibatkan serangan lebih lanjut pada logam yang lebih dalam sampai membentuk cekungan.

### C. Perhitungan Laju Korosi.

Laju korosi dapat dirumuskan sebagai berikut [1]:

$$mpy = \frac{534W}{DA t}$$

dimana:

W = kehilangan berat (mg)

D = densitas logam ( gram/cm<sup>3</sup>)

A = luas permukaan (in<sup>2</sup>)

t = lama waktu percobaan (jam)

mpy = *mils penetration per year*

Perbandingan tingkat klasifikasi laju korosi dapat dilihat pada tabel 2.3

Tabel 2.3 perbandingan tingkat klasifikasi laju korosi dengan tingkat ekspresi secara metrik [1]

Relative corrosion resistance	mpy	mm/y	µm/y	nm/hr	pm/s
Outstanding	< 1	< 0,02	< 25	< 2	< 1
Excellent	1 – 5	0,02 – 0,1	25 – 100	2 – 10	1 – 5
Good	5 – 20	0,1 – 0,5	100 – 500	10 – 50	5 – 20
Fair	20 – 50	0,5 – 1	500 – 1000	50 – 100	20 – 50
Poor	50 – 200	1 – 5	1000 – 5000	150 – 500	50 – 200
Unacceptable	200 +	5+	5000 +	500 +	200 +

## 2.4 Pengendalian Korosi Erosi

Hal-hal yang paling penting langkah-langkah untuk menghindari atau mengurangi tingkat korosi erosi adalah[6];

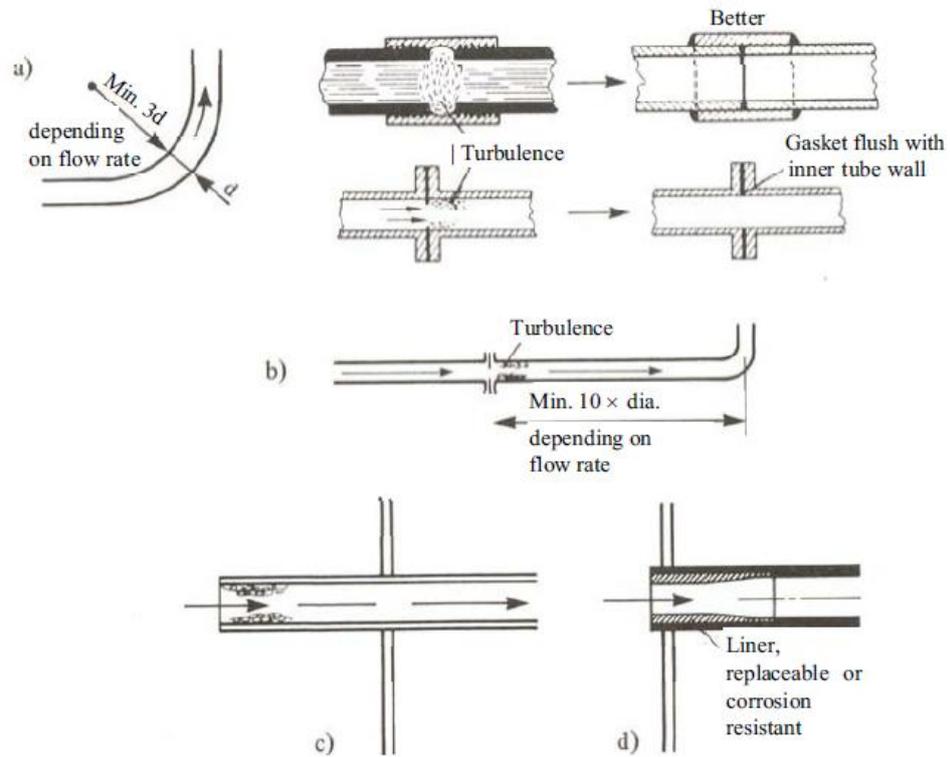
1. Pemilihan material yang sesuai
2. Menggunakan desain yang sesuai.

Banyak contoh-contoh desain yang baik dari sistem aliran dan peralatan lain yang sesuai. Dimensi pipa dan aliran harus dipilih dengan tujuan menjaga kecepatan aliran dibawah tingkat kritis. Perlu diperhatikan bahwa unsur-unsur geometris yang tidak sesuai dapat menyebabkan turbulensi dan serangan korosi. Oleh karena itu, elemen tersebut harus dihindari sejauh mungkin, dan setiap perubahan penampang atau arah aliran harus cukup halus dan efisien (gambar 2.22a).

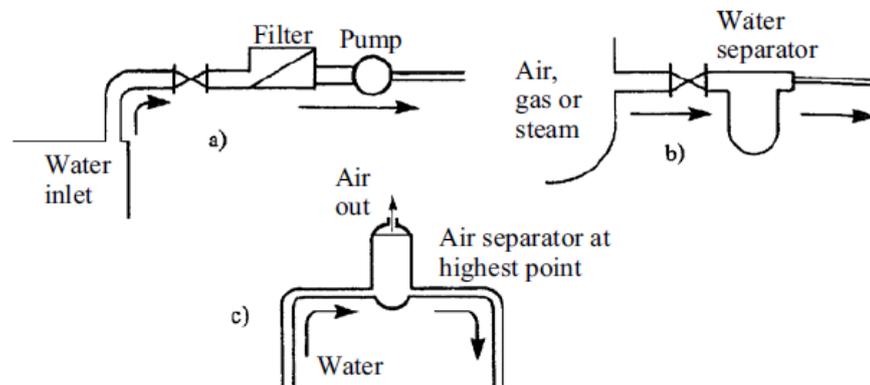
Turbulensi harus dihindari, terutama di bagian yang paling kritis dari sistem, misalnya dengan posisi belokan cukup jauh dari bagian yang dapat menghasilkan aliran turbulen (gambar 2.22b). Jika memungkinkan, daerah di mana korosi sulit untuk dihindari harus diposisikan sedemikian rupa sehingga korosi itu tidak menimbulkan kerugian, misalnya dengan memperluas pipa *outlet* yang berakhir ke dalam tangki, seperti yang ditunjukkan pada (gambar 2.22c).

3. Perubahan Lingkungan

Perubahan lingkungan, misalnya seperti yang ditunjukkan pada (gambar 2.23) filtrasi atau presipitasi partikel padat (gambar 2.23a), tetesan air hujan dari udara, gas atau uap (gambar 2.23b), dan penghilangan udara atau gas lainnya dari aliran cairan (gambar 2.23c). Dalam semua kasus ini adalah yang paling penting memiliki penyaring atau filter di awal proses. Dari titik awal ke titik penyaringan, diameter pipa harus besar (rendah kecepatan). Selain itu, penting juga untuk mengurangi suhu, menjaga tekanan tetap tinggi untuk menghindari gas dalam sistem cair. Penggunaan inhibitor dan penyaringan udara juga efektif tetapi tidak selalu bersifat ekonomis.



Gambar 2.22 Desain pencegahan korosi erosi [6]



Gambar 2.23 Pencegahan korosi erosi oleh pemisahan fasa yang berbeda [6];

4. Penerapan pelapis tahan korosi, misalnya logam pelapis dengan pengelasan, logam, logam-keramik dan lapisan keramik dengan cara penyemprotan termal, beton atau karet (polymer coating).
5. Pencegahan korosi erosi dengan pemisahan fasa yang berbeda.

Perlindungan katoda, masalah pada hal ini adalah bahwa kerapatan arus yang sangat tinggi biasanya diperlukan karena reaksi katodik terjadi secara

efisien di bawah kondisi kecepatan aliran tinggi. Anoda korban dalam bentuk seng atau baja plat telah digunakan untuk melindungi bagian *inlet* tabung pada penukar kalor. Anoda juga dapat digunakan sebagai *plug* di rumah pompa dan komponen lainnya.

## 2.5 Kecepatan Aliran

Bentuk aliran viskos diklasifikasikan sebagai laminar atau turbulen berdasarkan struktur aliran. Dalam bentuk laminar, struktur aliran ditandai dengan gerakan halus di laminae, atau lapisan. Sedangkan struktur aliran dalam bentuk turbulen dicirikan dengan bentuk acak.

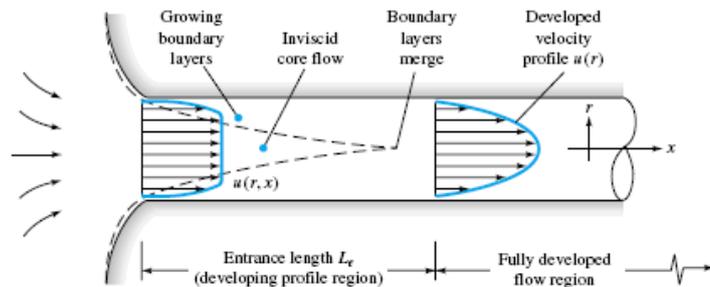
Aliran laminar kadang-kadang dikenal sebagai aliran streamline. Pada aliran laminar gerakan partikel cairan sangat teratur dengan semua partikel bergerak dalam garis lurus sejajar dengan dinding pipa. Aliran dengan fluida yang bergerak dalam lapisan-lapisan, atau lamina-lamina dengan satu lapisan meluncur secara lancar. Dalam aliran laminar ini viskositas berfungsi untuk meredam kecenderungan terjadinya gerakan relatif antara lapisan.

Aliran turbulen yaitu aliran dimana pergerakan dari partikel – partikel fluida sangat tidak menentu karena mengalami pencampuran serta putaran partikel antar lapisan, yang mengakibatkan saling tukar momentum dari satu bagian fluida ke bagian fluida yang lain dalam skala yang besar. Dalam keadaan aliran turbulen maka turbulensi yang terjadi membangkitkan tegangan geser yang merata diseluruh fluida sehingga menghasilkan kerugian – kerugian aliran.

Berdasarkan nilai bilangan *Reynold* ( $Re$ ) juga dapat ditentukan jenis aliran fluida. Untuk aliran fluida di dalam pipa dengan bilangan Reynold kurang dari 2300 dikategorikan sebagai aliran laminar. Sedangkan aliran turbulen memiliki bilangan Reynold yang lebih besar dari 2300 [15].

Fluida, setelah mengalir masuk ke dalam pipa akan membentuk lapis batas dan tebalnya akan bertambah besar sepanjang pipa. Pada suatu titik sepanjang garis tengah pipa, lapisan akan bertemu dan membentuk daerah yang terbentuk penuh di mana

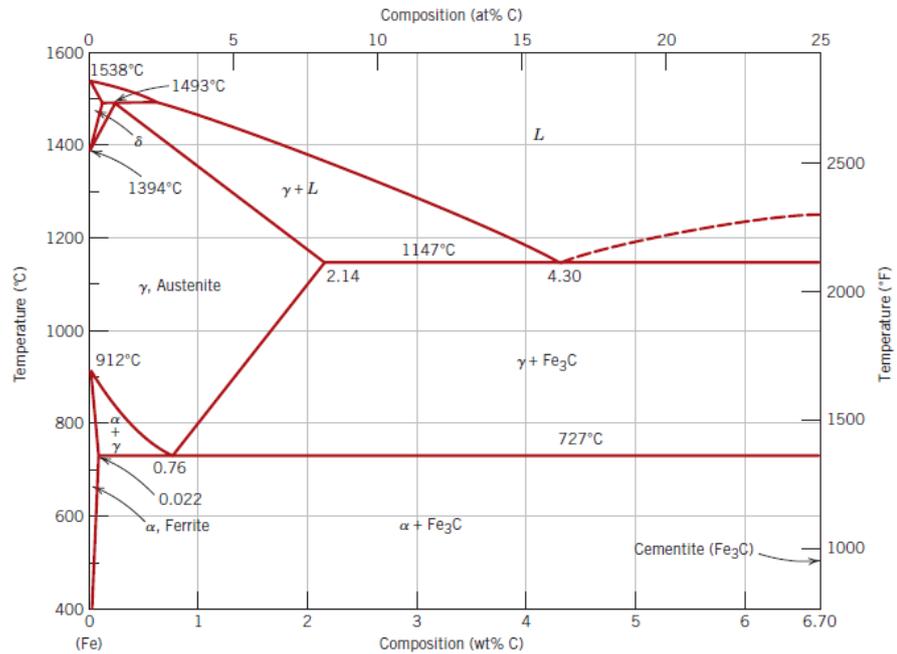
kecepatannya tidak berubah setelah melintasi titik tersebut. Jarak dari ujung masuk pipa ke titik pertemuan lapis batas tersebut dinamakan panjang masuk.



Gambar 2.24 Bentuk aliran dalam pipa[ 15].

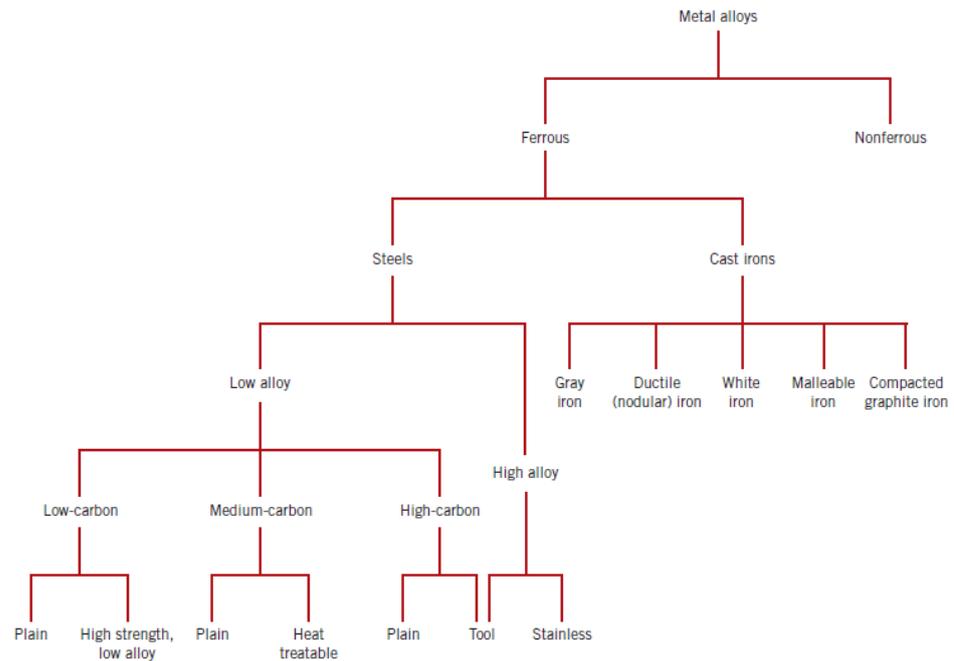
## 2.6 Baja Karbon

Baja adalah logam paduan, logam besi (Fe) sebagai unsur dasar dengan karbon (C) sebagai unsur paduan utamanya, serta unsur-unsur lain, seperti : Mn, Si, Ni, Cr, V dan lain sebagainya yang tersusun dalam prosentase yang sangat kecil. Dan unsur-unsur tersebut akan berpengaruh terhadap mutu dari baja tersebut.. Sifat baja pada umumnya sangat dipengaruhi oleh prosentase karbon dan struktur mikro. Struktur mikro pada baja karbon dipengaruhi oleh perlakuan panas dan komposisi baja. Kandungan unsur karbon dalam baja berkisar antara 0.2% hingga 2.1% berat sesuai *grade*-nya. Fungsi karbon dalam baja adalah sebagai unsur penguat dengan mencegah dislokasi bergeser pada kisi kristal (*crystal lattice*) atom besi.



Gambar 2.25 Diagram fasa baja karbon[5].

Unsur paduan lain yang biasa ditambahkan selain karbon adalah titanium, krom (*chromium*), nikel, vanadium, *cobalt* dan *tungsten* (*wolfram*). Dengan memvariasikan kandungan karbon dan unsur paduan lainnya, berbagai jenis kualitas baja bisa didapatkan. Penambahan kandungan karbon pada baja dapat meningkatkan kekerasan (*hardness*) dan kekuatan tariknya (*tensile strength*), namun di sisi lain membuatnya menjadi getas (*brittle*) serta menurunkan keuletannya (*ductility*). Beberapa baja lebih umum diklasifikasikan menurut konsentrasi karbon yaitu, baja karbon rendah, menengah, dan baja karbon tinggi [5].



Gambar 2.26 Klasifikasi untuk baja paduan[5]

Baja karbon menurut kadar karbonnya dapat dibedakan menjadi [17];

1. Baja Karbon Rendah (*low carbon steel*)

Baja karbon rendah memiliki kandungan karbon kurang dari 0,30% dan struktur mikronya terdiri dari ferit dan perlit. Metode penguatannya dengan *Cold Working*. Baja jenis ini memiliki sifat lunak, ulet dan tangguh. Selain itu sifat mampu mesin (*machinability*) dan mampu las (*weldability*) yang baik.

2. Baja Karbon Menengah (*medium carbon steel*)

Baja karbon menengah memiliki kandungan karbon antara 0,30% - 0,6%. Pada baja ini dapat dinaikkan sifat mekaniknya melalui perlakuan panas *austenitizing*, *quenching*, dan *tempering*. Baja ini banyak dipakai dalam kondisi hasil *tempering* sehingga struktur mikronya martensit dan memiliki sifat lebih kuat dari baja karbon rendah.

3. Baja Karbon Tinggi (*high carbon steel*)

Baja karbon tinggi memiliki kandungan karbon antara 0,6% - 1,4%. Baja ini adalah paling keras, paling kuat, paling getas di antara baja karbon lainnya serta tahan aus. Banyak dipakai dalam kondisi hasil *tempering* sehingga

struktur mikronya martensit, pada baja dapat dinaikkan sifat mekaniknya melalui perlakuan panas *austenitizing*, *quenching*, dan *tempering*.