

## BAB II

### DASAR TEORI

#### 2.1 DEFINISI DAN MEKANISME KOROSI

Korosi dapat didefinisikan sebagai kerusakan atau berkurangnya mutu suatu material baik material logam maupun non logam karena bereaksi dengan lingkungannya. Pada material logam, proses korosi melibatkan reaksi elektrokimia yaitu reaksi pelepasan elektron (reaksi oksidasi) dan penerimaan elektron (reaksi reduksi) <sup>[2]</sup>.

Korosi pada logam dapat terjadi karena logam cenderung mencari bentuk senyawa yang lebih stabil seperti bentuk aslinya di alam. Bila dianalogikan, logam yang terkorosi seperti kebalikan dari proses ekstraksi logam tersebut. Besi yang pada awalnya adalah bijih besi (senyawa oksida) yang diolah akan terkorosi oleh air dan oksigen menjadi senyawa oksida.

Untuk mengontrol pertumbuhan korosi maka diperlukan pembelajaran pada ilmu termodinamika yang mempelajari tentang spontan atau tidaknya jalannya suatu reaksi sehingga dapat diprediksi apakah secara teoritis reaksi korosi dapat terjadi. Selain itu pembelajaran kinetika elektroda juga diperlukan untuk menghitung kecepatan reaksi korosi pada suatu material.

Reaksi elektrokimia yang dapat menyebabkan korosi pada logam dalam lingkungan air (*aqueous*) memiliki empat variabel yaitu <sup>[3]</sup>:

1. Anoda

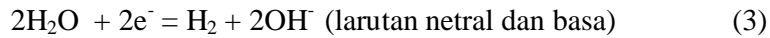
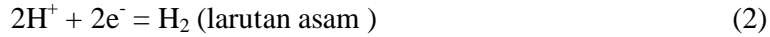
Anoda adalah logam (M) yang akan terkorosi sehingga pada anoda akan terjadi reaksi oksidasi:



## 2. Katoda

Katoda merupakan material yang akan tereduksi sehingga akan menggunakan elektron dari reaksi yang dihasilkan oleh anoda. Reaksi yang umumnya terjadi di katoda adalah:

a. Evolusi H<sub>2</sub> dari larutan asam atau netral:



b. Reduksi pelarutan oksigen pada larutan asam atau netral:



c. Reduksi dari oksidator yang terlarut pada reaksi *redox* seperti:



3. Larutan elektrolit sebagai media penghantar listrik.

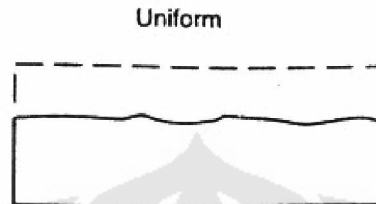
4. Adanya hubungan listrik antar anoda dan katoda sehingga arus dalam sel korosi dapat mengalir.

Korosi dapat terjadi dalam beberapa macam bentuk. Macam-macam bentuk korosi antara lain adalah korosi seragam, korosi galvanik, korosi celah, korosi sumuran, korosi intergranular, serta korosi yang dipicu oleh lingkungan seperti korosi retak tegang, korosi fatik, dan *hydrogen embrittlement*. Pada bagian ini yang akan dibahas hanyalah bentuk-bentuk korosi yang berhubungan dengan penelitian ini, yaitu korosi seragam, korosi sumuran dan korosi retak tegang.

## 2.2 KOROSI SERAGAM <sup>[4]</sup>

Korosi ini merupakan bentuk yang paling umum dijumpai pada peristiwa korosi. Korosi seragam adalah kerusakan logam dari permukaannya akibat korosi secara merata. Agar terjadi korosi yang seragam, lingkungan harus memiliki akses yang sama ke seluruh permukaan logam dan logam harus sejenis dari segi metalurgi dan komposisi, dengan adanya keseragaman maka pelepasan elektron akan merata pada seluruh permukaan. Meskipun demikian syarat tersebut tidak mutlak dan derajat ketidakseragaman masih dapat ditoleransi sampai batas tertentu untuk terjadinya korosi yang seragam.

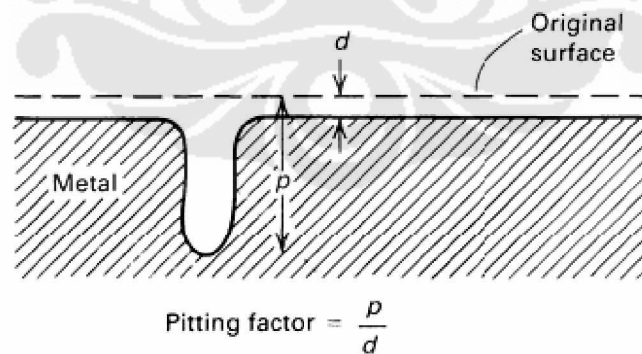
Korosi atmosferik mungkin adalah contoh yang paling mudah diamati dari korosi seragam, contohnya korosi seragam dari baja dalam larutan yang bersifat asam. Bentuk korosi yang lain jauh lebih sulit diperkirakan dibandingkan korosi seragam. Oleh karena itu dari segi teknis, korosi seragam lebih diharapkan terjadi daripada bentuk korosi yang lain, karena lebih mudah diperkirakan.



**Gambar 2.1.** Peristiwa korosi seragam <sup>[5]</sup>.

### 2.3 KOROSI SUMURAN (*PITTING*)

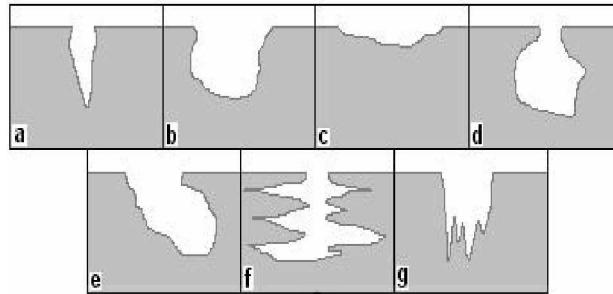
Korosi lubang atau *pitting* didefinisikan sebagai serangan korosif yang terlokalisasi. Sederhananya, *pitting* merupakan jenis korosi terlokalisasi yang menghasilkan lubang pada material, yaitu pada daerah serangan korosi dimana luasnya relatif lebih kecil dibandingkan dengan keseluruhan permukaan yang terekspos <sup>[6]</sup>. Kedalaman *pitting* sering disimbolkan dengan *pitting factor* yaitu perbandingan dari penetrasi pada logam yang terdalam terhadap penetrasi logam rata-rata yang ditentukan oleh kehilangan berat spesimen.



**Gambar 2.2.** Gambaran mengenai *pitting factor* ( $p/d$ ) <sup>[7]</sup>.

*Pitting* tidak dapat diprediksi, khususnya pada kondisi pembentukan *pitting* yang dalam. Permukaan *pitting* biasanya tertutup oleh *deposit* dari aliran proses dan endapan produk korosi. Berdasarkan bahan penyusun logam dan

kondisi kimia lingkungan, *morfologi pitting* akan bermacam-macam seperti ditunjukkan **Gambar 2.3**.



**Gambar 2.3.** Morfologi *pitting* <sup>[8]</sup>:  
 (a) narrow, deep, (b) elliptical, (c) wide, shallow, (d) subsurface,  
 (e) undercutting, (f) horizontal, (g) vertical.

### 2.3.1 Mekanisme Korosi Sumuran

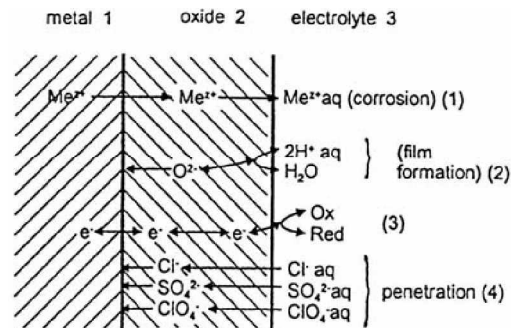
Mekanisme terbentuknya korosi *pitting* dapat dibagi menjadi dua tahapan, yaitu pecahnya lapisan pasif dan kemudian diikuti pertumbuhan lubang.

#### 1. Pecahnya Lapisan Pasif

Pecahnya lapisan pasif dari material terdiri dari 3 tahap yaitu :

##### a. Penetrasi

Pada tahap ini terjadi perpindahan kation  $\text{Cl}^-$  yang agresif dari larutan elektrolit melewati lapisan oksida menuju ke permukaan material. Jika kecepatan kation dalam berpenetrasi ke permukaan logam lebih rendah daripada kecepatan perpindahan kation dari elektrolit ke lapisan oksida logam, maka kation elektrolit akan berkumpul pada lapisan oksida logam dan menyebabkan peningkatan konsentrasi lokal. Peningkatan konsentrasi ini akan menyebabkan tegangan pada lapisan film yang pada akhirnya akan merusak lapisan film logam dan lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar berikut:



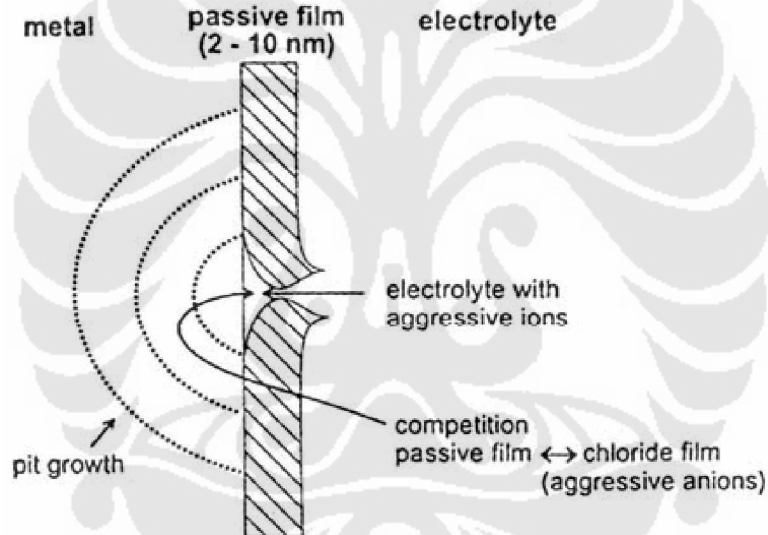
**Gambar 2.4.** Mekanisme penetrasi ke lapisan pasif <sup>[9]</sup>.

b. Pecahnya lapisan film

Pada tahap ini lapisan film dari logam akan pecah dan memberikan jalan bagi anion ( $H^+$ ) menuju logam yang sudah tidak terlindungi lagi. Pada kondisi ini lapisan pasif membentuk ion  $Fe^{2+}$  yang berada dalam kondisi teroksidasi.

Adanya ion  $Cl^-$  yang berasal dari lingkungan, akan meningkatkan kecepatan reaksi pelepasan  $Fe^{2+}$  dari lapisan pasif ke lapisan luar sehingga lapisan pasif besi pecah. Ion klor akan terurai lagi dan akan bereaksi kembali dengan lapisan pasif besi.

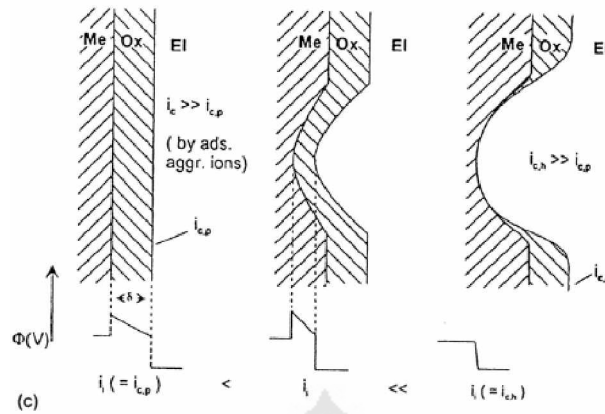
Dengan rusaknya lapisan pasif akan terbentuk daerah anodik dan katodik dan mulai terjadi reaksi antara material dengan lingkungan air laut sehingga terbentuk awal sumuran, perusakan dapat dilihat pada **Gambar 2.5**.



**Gambar 2.5.** Mekanisme pemecahan lapisan pasif<sup>[10]</sup>.

c. Adsorpsi

Pada tahap ini terjadi adsorpsi anion oleh lapisan oksida dan terjadinya perpindahan kation dari logam menuju ke elektrolit. Dimana lapisan oksida logam akan terbentuk secara kontinu, sampai menyebabkan penipisan lapisan pasif hingga habis sama sekali dan pelarutan setempat akan dimulai. Mekanisme adsorpsi dapat dilihat pada **Gambar 2.6**. berikut ini:



**Gambar 2.6.** Mekanisme adsorpsi<sup>[11]</sup>.

## 2. Pertumbuhan Lubang<sup>[12]</sup>

### a. Tahap inisiasi

Tahap ini yang memegang peranan penting adalah potensial *pitting*. Potensial *pitting* adalah potensial dimana *pitting* mulai tumbuh ditandai dengan rusaknya lapisan pasif. Rusaknya lapisan ini dapat dilihat dimana rapat arus akan meningkat tajam. Jadi lubang-lubang baru mulai tumbuh jika potensialnya lebih besar daripada potensial *pitting* logamnya. Bila logam memiliki potensial lebih kecil maka cenderung melepas elektron yang akan menyebabkan oksidasi. Semakin tinggi potensial *pitting* suatu material berarti material tersebut semakin tahan terhadap serangan *pitting*.

### b. Tahap propagasi

Tahap ini merupakan tahap potensial proteksi yang pada daerah logamnya mengalami pasifasi atau membentuk lapisan pasif. Potensial proteksi menentukan apakah *pits* yang mulai tumbuh itu dapat terus tumbuh atau tidak. Jika potensial lebih besar daripada potensial proteksi maka *pits* baru dapat terus tumbuh, namun jika potensial lebih rendah daripada potensial proteksi maka berarti logam akan tetap pasif. Jadi *pits* yang baru dapat tumbuh jika potensialnya lebih besar daripada potensial *pitting*.

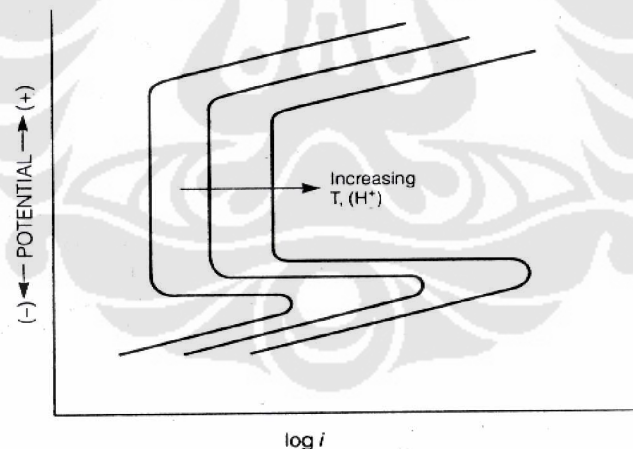
### c. Repasivasi

Repasivasi merupakan proses dan permukaan logam untuk kembali menjadi pasif. Kinetika repasivasi dari sumuran pada tahap awal sangat tergantung dari transport anion yang agresif dari elektrolit ke permukaan logam. Jadi jika

cukup banyak akumulasi dari anion yang agresif pada permukaan logam maka proses pertumbuhan *pits* pada tahap awal akan stabil karena pembentukan lapisan pasif dapat dihindari.

### 2.3.2 Pengaruh Ion Klorida, Temperatur dan pH Terhadap Korosi Sumuran

Korosi sumuran dalam air laut pada baja dipengaruhi oleh konsentrasi ion klorida, temperatur dan pH. Konsentrasi ion klorida yang makin tinggi akan makin meningkatkan kecenderungan terjadinya korosi sumuran. Temperatur yang makin tinggi akan meningkatkan kecenderungan terjadinya korosi sumuran dan juga makin meningkatkan kecepatan korosinya. Sedangkan suasana asam (pH rendah) dapat meningkatkan terjadinya kemungkinan terjadi korosi sumuran karena ion sulfida dapat membantu menimbulkan korosi sumuran pada lingkungan ini, walaupun ion sulfida tidak dapat menyebabkan korosi sumuran dengan sendirinya. Hal ini dapat ditunjukkan dari menurunnya besar daerah pasifasi dan meningkatnya rapat arus dengan meningkatnya temperatur dan konsentrasi ion  $H^+$ .

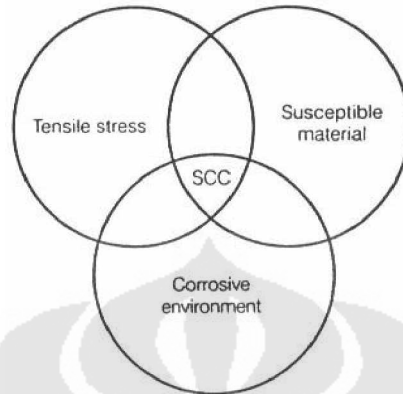


**Gambar 2.7.** Pengaruh temperatur dan pH terhadap pasifitas <sup>[13]</sup>.

## 2.4 KOROSI RETAK TEGANG

Korosi retak tegang merupakan perpatahan getas yang terjadi karena tegangan tarik konstan yang relatif rendah terhadap sebuah logam paduan di lingkungan yang bersifat korosif <sup>[14]</sup>. Dari definisi tersebut, dapat dikatakan bahwa korosi retak tegang terjadi karena adanya tiga kondisi yang terjadi pada saat yang

bersamaan, yaitu adanya tegangan tarik pada material, lingkungan kritis yang bersifat korosif, dan logam paduan yang rentan terhadap lingkungan korosif tersebut <sup>[15]</sup>.



**Gambar 2.8.** Faktor penyebab korosi retak tegang <sup>[16]</sup>.

Ketiga hal tersebut merupakan syarat utama terjadinya korosi retak tegang. Ketika ketiga kondisi tersebut ada pada saat yang bersamaan, terjadilah fenomena korosi retak tegang. Fenomena kegagalan ini dimulai dengan terbentuknya inisiasi retakan pada material, kemudian terjadi penjalaran retakan, dan pada akhirnya terjadi kegagalan dimana material akan mengalami perpatahan.

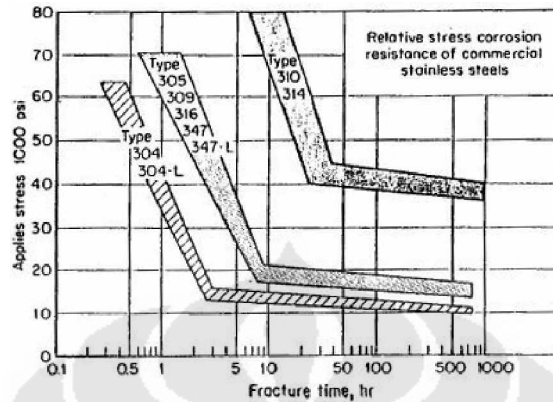
## **2.4.1 Faktor Penyebab Korosi Retak Tegang**

### *2.4.1.1 Faktor Tegangan*

Korosi retak tegang dapat terjadi karena adanya faktor tegangan pada logam paduan. Kriteria tegangan adalah tegangan tarik dengan besar yang mencukupi untuk terjadinya retakan. Tegangan ini dapat muncul dari beberapa sumber: tegangan aplikasi, tegangan sisa, tegangan *thermal*, atau pengelasan. Tegangan aplikasi adalah tegangan dari luar yang diberikan pada logam, biasanya berupa beban. Sedangkan tegangan sisa adalah tegangan yang terkunci di dalam logam meskipun semua gaya luar diabaikan. Tegangan sisa dapat berasal dari proses pengelasan, proses pengerjaan dingin, maupun proses perlakuan panas. Pada kenyataannya, ada beberapa kasus dari korosi retak tegang dimana tidak ada tegangan aplikasi dari luar yang diberikan. Misalnya karena tegangan sisa yang dihasilkan setelah proses pengelasan dimana besarnya mendekati titik luluh material <sup>[17]</sup>.



Pada peristiwa korosi retak tegang, semakin besar tegangan yang diberikan/terdapat pada material maka semakin cepat perpatahan terjadi. Hal ini seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 2.9**.



**Gambar 2.9.** Kurva ketahanan relatif korosi retak tegang dari beberapa *stainless steels* komersial pada larutan panas magnesium klorida 42% <sup>[18]</sup>.

#### 2.4.1.2 Faktor Lingkungan

Lingkungan yang dapat menyebabkan korosi retak tegang biasanya larutan atau juga dapat berupa lapisan kondensasi dari uap maupun *bulk solutions*. Biasanya, korosi retak tegang dari sebuah paduan merupakan hasil dari keberadaan zat kimia tertentu dalam lingkungan. Namun, lingkungan yang menyebabkan korosi retak tegang di suatu paduan mungkin tidak dapat menyebabkan korosi retak tegang pada paduan lainnya.

Sebagai contoh, *stainless steel* dapat mengalami korosi retak tegang pada lingkungan yang mengandung klorida, namun pada lingkungan yang mengandung amonia, hal ini tidak terjadi. Sebaliknya, paduan tembaga dapat mengalami korosi retak tegang pada lingkungan yang mengandung amonia dan tidak pada lingkungan yang mengandung klorida.

Mengubah temperatur, derajat aerasi, dan/atau konsentrasi ionik akan mengubah lingkungan yang tidak korosif menjadi lingkungan yang dapat menyebabkan terjadi korosi retak tegang. Selain itu, sebuah paduan dapat menjadi bersifat imun ketika diberikan perlakuan panas tertentu namun juga dapat rentan terhadap korosi untuk paduan yang lain <sup>[19]</sup>. Daftar kombinasi paduan dan lingkungan yang dapat menghasilkan korosi retak tegang dapat dilihat pada **Tabel 2.1**.

**Tabel 2.1.** Kombinasi Paduan dan Lingkungan yang Menyebabkan Korosi Retak Tegang <sup>[20]</sup>

Alloy	Environment
Carbon steel	Hot nitrate, hydroxide, and carbonate/bicarbonate solutions
High-strength steels	Aqueous electrolytes, particularly when containing H <sub>2</sub> S
Austenitic stainless steels	Hot, concentrated chloride solutions; chloride-contaminated steam
High-nickel alloys	High-purity steam
Q1-brass	Ammoniacal solutions
Aluminum alloys	Aqueous Cl <sup>-</sup> , Br <sup>-</sup> , and I <sup>-</sup> solutions
Titanium alloys	Aqueous Cl <sup>-</sup> , Br <sup>-</sup> , and I <sup>-</sup> solutions; organic liquids; N <sub>2</sub> O <sub>4</sub>
Magnesium alloys	Aqueous Cl <sup>-</sup> solutions
Zirconium alloys	Aqueous Cl <sup>-</sup> solutions; organic liquids; I <sub>2</sub> at 350 °C (660 °F)

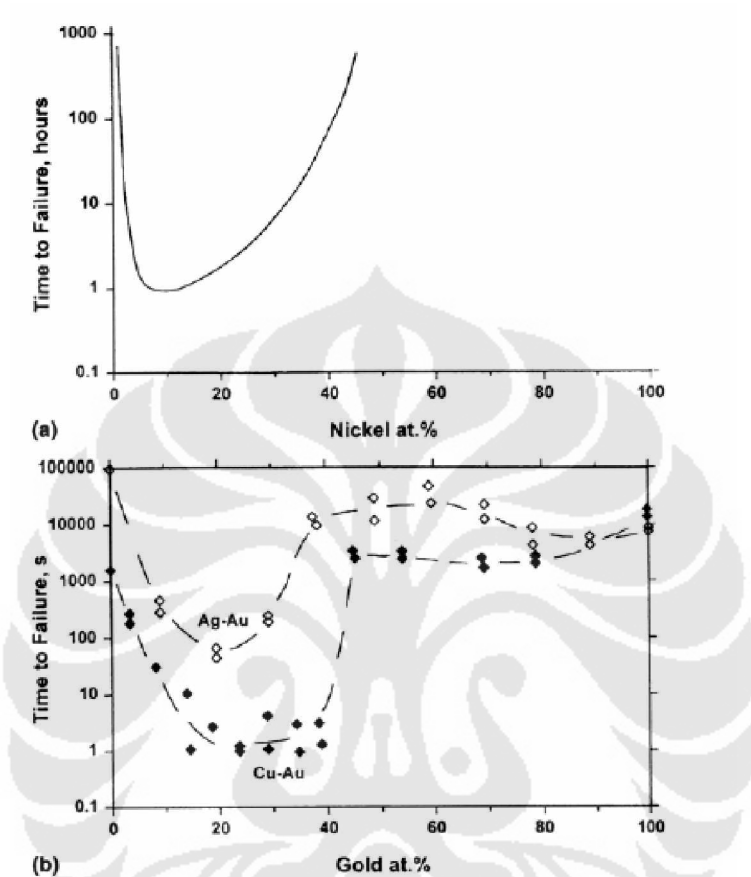
Sumber: ASM Handbook Volume 13, Corrosion, hal. 313

#### 2.4.1.3 Faktor Metalurgi Material

Faktor metalurgi suatu material juga berpengaruh terhadap terjadinya korosi retak tegang. Beberapa faktor metalurgi yang berpengaruh terhadap korosi retak tegang di antaranya adalah komposisi paduan material, orientasi butir, komposisi dan distribusi presipitat, interaksi dislokasi, dan perkembangan transformasi fasa atau derajat metastabilitas <sup>[21]</sup>.

**Gambar 2.10.** menunjukkan pengaruh komposisi paduan terhadap korosi retak tegang. Pada gambar tersebut terlihat logam murni ternyata memiliki ketahanan korosi retak tegang yang lebih baik bila dibandingkan logam paduan. Penambahan paduan nikel (a) dan emas (b) akan menurunkan ketahanan korosi retak tegang hingga kadar tertentu, dan kemudian ketahanan korosi retak tegang

akan meningkat kembali. Ini menunjukkan komposisi paduan berpengaruh terhadap ketahanan korosi retak tegang.



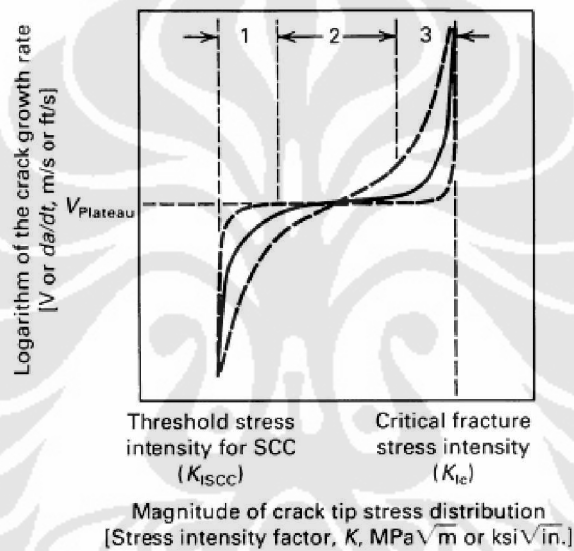
**Gambar 2.10.** Pengaruh komposisi paduan terhadap ketahanan korosi retak tegang: (a) kurva Copson, pengaruh kadar nikel pada *austenitic stainless steel*; (b) pengaruh kadar emas pada paduan emas <sup>[22]</sup>.

Pada paduan aluminium kekuatan tinggi, aluminium yang memiliki orientasi butir yang tegak lurus terhadap arah *rolling* akan lebih mudah mengalami korosi retak tegang daripada aluminium yang memiliki orientasi butir yang searah dengan arah *rolling* <sup>[23]</sup>. Pada *weldsensitized austenitic steel* yang diekspos pada air bertemperatur tinggi, adanya presipitat karbida kromium pada batas butir merupakan penyebab terjadinya korosi retak tegang <sup>[24]</sup>.

### 2.4.2 Mekanisme Korosi Retak Tegang

Korosi retak tegang merupakan proses kegagalan yang lajunya lambat, dimana inisiasi dan perambatan retak berlangsung dalam laju yang sangat lambat (misalnya  $10^{-6}$  m/s) hingga tegangan aplikasi melebihi kekuatan patah dari material [25]. Peristiwa yang terjadi dalam proses korosi retak tegang biasanya dibagi ke dalam tiga tahap, antara lain:

- Ø Inisiasi retak dan perambatan retak tahap 1
- Ø Tahap 2 atau *steady-state crack propagation*
- Ø Perambatan retak tahap 3 atau *final failure*.



**Gambar 2.11.** Skema diagram laju perambatan retak dan tahapan dalam korosi retak tegang [26].

**Gambar 2.11.** merupakan diagram skema laju perambatan retak dan tahapan-tahapan yang terjadi dalam korosi retak tegang. Daerah 1 merupakan inisiasi retak (tahap 1), daerah 2 ialah perambatan retak (tahap 2), dan daerah tiga adalah perambatan retak hingga *failure* (tahap 3). Skema diagram ini merupakan skema percobaan perambatan retak, yang biasanya digunakan untuk mengetahui hubungan antara tiga tahap laju perambatan retak dengan tingkat intensitas tegangan. Tahap-tahap tersebut diidentifikasi sebagai tahap perambatan retak faktor 1, 2, atau 3. Tidak ada perambatan retak yang muncul jika di bawah batas (*threshold*) tingkat tegangan,  $K_{ISCC}$ . Batas tingkatan tegangan ini ditentukan tidak hanya oleh paduan tetapi juga oleh lingkungan dan kondisi metalurgi dari paduan,

dan sepertinya, tingkatan ini berhubungan dengan besarnya tegangan minimum yang dibutuhkan untuk interaksi yang sinergis dengan lingkungan.

Pada tingkat tegangan yang rendah (tahap 1), laju perambatan retak meningkat secara drastis seiring dengan meningkatnya faktor intensitas tegangan. Pada tingkat intensitas tegangan menengah (tahap 2), laju perambatan retak mendekati kecepatan yang konstan dimana secara virtual tidak bergantung pada gaya gerak mekanik. Kecepatan stabil (*plateau velocity*) ini merupakan karakteristik dari kombinasi paduan-lingkungan dan merupakan hasil dari proses lingkungan yang lajunya terbatas seperti transportasi massa dari unsur-unsur lingkungan dari atas hingga ujung retakan. Pada tahap 3, laju perambatan retak melebihi kecepatan stabil dimana tingkat intensitas tegangan mendekati tingkat tegangan kritis untuk terjadinya perpatahan mekanis dalam lingkungan yang inert,  $K_{Ic}$ .

Nilai yang sangat penting yang ditunjukkan oleh **Gambar 2.11.** adalah batas intensitas tegangan (*threshold stress intensity*)  $K_{th}$  atau  $K_{ISCC}$ , dan kecepatan retak tahap II,  $v_{II}$ . Pada material yang kuat yang dapat mengalami perpatahan yang cepat, intensitas tegangan kritis atau *fracture toughness*,  $K_{IC}$ , mengakhiri umur dari sebuah komponen secara *catastrophic*, dimana paduan yang bersifat ulet akan mengalami kegagalan dengan menunjukkan adanya *leakage* atau pengurangan luas penampang.

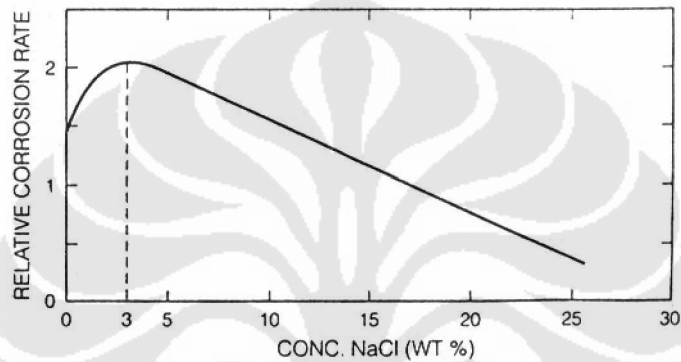
## 2.5 KOROSI PADA BAJA KARBON RENDAH

Baja karbon rendah adalah baja dengan kadar karbon sekitar 0,05 – 1%. Baja karbon rendah mempunyai elemen paduan lainnya, sekitar 2%, sebagian besar untuk meningkatkan sifat mekanis. Baja karbon rendah relatif tidak mahal, namun kekuatan dan kekerasan dapat diperoleh dengan variasi kandungan karbon, unsur paduan, dan perlakuan panas.

Penambahan elemen paduan seperti Cu, Ni, Si, dan Cr pada baja karbon rendah menunjukkan pengaruh terhadap korosi sumuran. Unsur Cr, Ni, dan Mo akan meningkatkan ketahanan terhadap korosi sumuran. Sedangkan penambahan unsur Si, Ti, S, Se, dan C akan menurunkan ketahanan.

### 2.5.1 Pengaruh Kadar NaCl Pada Baja Karbon Rendah

Konsentrasi NaCl dalam larutan air laut sangat mempengaruhi terjadinya proses korosi. Terlihat pada **Gambar 2.12.** di bawah bahwa seiring dengan peningkatan konsentrasi NaCl terlarut sampai dengan 3% akan menyebabkan peningkatan laju korosi. Namun setelah melewati titik 3 % laju korosi mengalami penurunan seiring dengan bertambahnya konsentrasi NaCl. Penyebabnya adalah konsentrasi yang terlalu tinggi dan telah melewati titik optimum, sehingga akan menyebabkan turunnya kadar oksigen terlarut dan laju korosi akan menurun.



**Gambar 2.12.** Efek konsentrasi NaCl terhadap korosi baja <sup>[27]</sup>.

Pada awalnya, peningkatan laju korosi pada peningkatan kadar NaCl disebabkan oleh peningkatan konduktivitas dari larutan tersebut. Konduktivitas yang rendah hanya memberikan ruangan yang kecil untuk anoda dan katoda, dan produk dari reaksi anodik cenderung untuk membatasi reaksi katodik reduksi oksigen. Dengan adanya peningkatan konduktivitas, maka memungkinkan polarisasi yang lebih rendah dengan arus korosi yang lebih tinggi antara *adjoining* anoda dan katoda. Namun demikian ada saatnya dimana konsentrasi garam yang semakin tinggi justru akan menurunkan oksigen terlarut laju korosi cenderung turun setelah melewati konsentrasi maksimum 3 % NaCl.

Pada larutan dengan konsentrasi gas terlarut yang tinggi akan menyebabkan kecepatan korosi logam meningkat. Saat konsentrasi garam bertambah maka kelarutan dari gas – gas dalam larutan akan berkurang, akibatnya kecepatan korosi dari logam akan berkurang.

### 2.5.2 Pengaruh pH Pada Baja Karbon Rendah

Pengaruh lingkungan lainnya pada korosi baja yaitu pH. Perubahan pH suatu larutan akan menimbulkan kecenderungan korosi yang berbeda-beda untuk potensial tertentu. Semakin kecil pH (asam) maka semakin korosif lingkungan sehingga logam akan dengan mudah terkorosi. Daerah-daerah yang terdapat dalam diagram Pourbaix terdiri dari tiga bagian, yaitu:

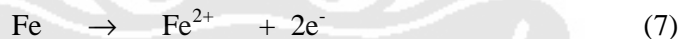
- Daerah imun yaitu daerah dimana logam tetap dalam keadaannya untuk logam murni dan logam Fe tidak mengalami korosi.
- Daerah korosif (aktif) yaitu daerah dimana logam Fe akan membentuk ion logam yang larut dalam elektrolit.
- Daerah pasif yaitu daerah dimana logam Fe akan terkorosi secara lambat karena pada permukaan logam Fe akan membentuk lapisan film oksida/hidrat pasif yang menghambat laju korosi selanjutnya.

Adapun sifat dan karakteristik logam Fe pada masing-masing kondisi lingkungan dengan tingkat keasaman (pH) yang berbeda adalah sebagai berikut :

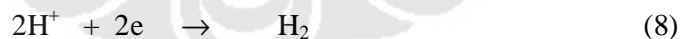
- Pada lingkungan pH asam

Logam Fe akan berada dalam kondisi imun dan jika berada dalam beda potensial yang tinggi maka logam Fe memiliki kecenderungan untuk terkorosi secara merata membentuk ion  $\text{Fe}^{2+}$  dan ion  $\text{Fe}^{3+}$ . Reaksi yang terjadi adalah :

Reaksi Oksidasi (Anoda) :



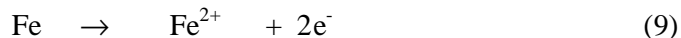
Reaksi Reduksi (Katoda) :



- Pada lingkungan pH basa

Logam Fe akan berada dalam daerah *immun*, terbentuk lapisan pasif  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  atau terkorosi ( $\text{HFeO}_2^-$ ). Reaksi yang terjadi adalah :

Reaksi Oksidasi (Anoda) :

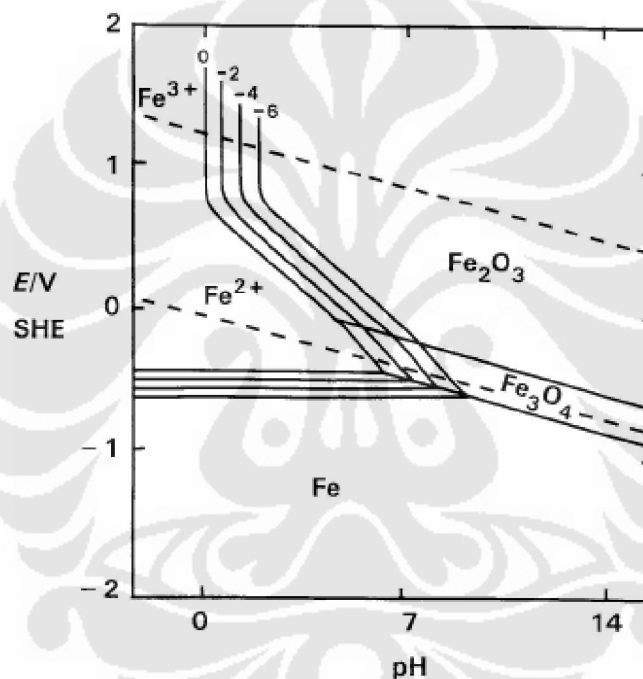


Reaksi Reduksi (Katoda) :



- Pada lingkungan pH netral

Logam Fe akan berada dalam daerah *immun* dan membentuk lapisan pasif memiliki bentuk  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  dan  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  meskipun kemungkinan berada dalam daerah aktif terkorosi masih ada. Pada daerah pasif material tersebut tetap terkorosi, namun laju korosi yang terjadi sangat lambat, karena cenderung membentuk suatu lapisan pasif di permukaan yang akan menghambat korosi. Kondisi logam Fe dalam berbagai kondisi lingkungan dengan tingkat keasaman (pH) yang berbeda-beda seperti yang telah dijelaskan diatas dapat digambarkan melalui diagram Pourbaix.



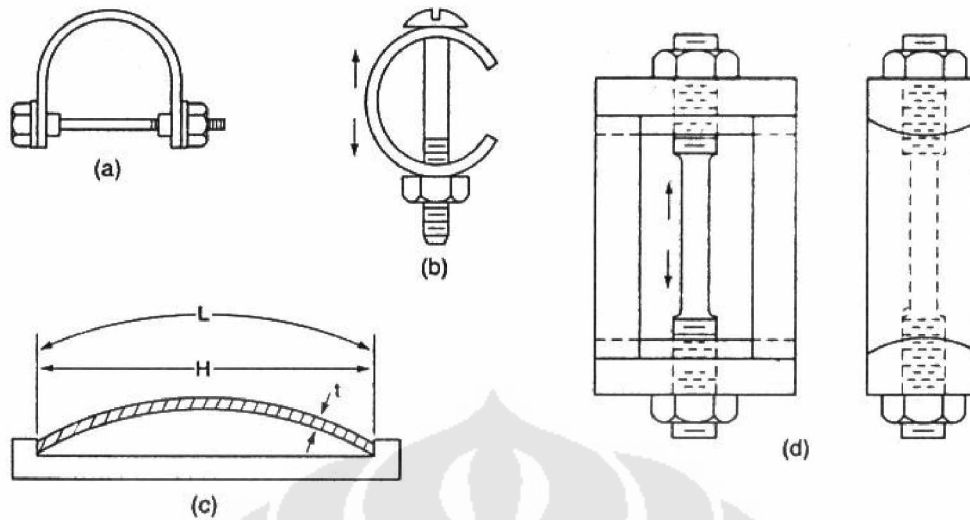
Gambar 2.13. Diagram Pourbaix Fe pada suhu 25 °C [28].

## 2.6 METODE PENGUJIAN KOROSI RETAK TEGANG

### 2.6.1 Mekanisme Pengujian Pada SCC [29]

Material ditekuk membentuk lekukan dengan *holder* sebagai penahan kemudian material diekspos pada suatu lingkungan korosif seperti pada air laut. Alat dibuat seperti *slow strain rate testing*. Metode pengujian dapat dilihat pada Gambar 2.14. di bawah ini.





**Gambar 2.14.** Metode pengujian pembebanan untuk korosi retak tegang: (a) U-bend (b) C-ring (c) Bent-beam (d) Tensile <sup>[29]</sup>.

Salah satu metode pengujian adalah metode *bent-beam specimen*. Pengujian ini untuk *korosi retak tegang* pada lingkungan cair atau gas. Pengujian *bent beam* cocok untuk produk yang datar seperti *sheet*, *strip*, atau *plate*. Untuk material *plate*, spesimen *bent beam* lebih sulit untuk digunakan, karena spesimen holder yang kasar harus dibuat untuk mengakomodasi spesimen. Karena tebal sudah ditentukan pada ASTM G-39. Metode *bent beam* secara umum merupakan pengujian dengan regangan yang konstan atau defleksi yang konstan. Saat retakan telah mulai, bagian ujung retakan sama dengan bagian tidak retak, oleh karena itu nilai tegangan yang dihitung pada metode ini dipakai hanya untuk tegangan sebelum terjadinya retak. Pengujian dimulai pada saat tegangan diberikan pada spesimen sampai terlihat terjadi korosi dan spesimen yang terkena tegangan diekspos di lingkungan korosif untuk mendapatkan material yang korosi. Retak yang lebih diamati adalah bagian tengah, dimana memiliki tegangan yang sangat besar karena gaya dorong ke arah kanan dan kiri akan berpusat dan berkonsentrasi pada bagian tengah sampel.

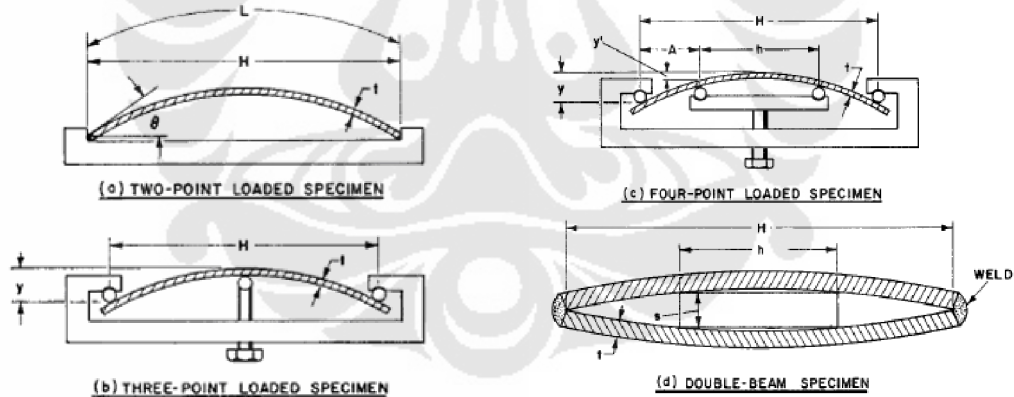
Tegangan yang dipakai ditentukan dari ukuran spesimen dan defleksi lekukan. Pada percobaan ini menggunakan panjang spesimen 10 inch dengan acuan ASTM G-39. Spesimen kemudian diekspos ke lingkungan korosif dan ditentukan waktu yang diperlukan untuk menghasilkan retak Waktu retak diukur

dari ketahanan korosi retak tegang dari material dalam lingkungan korosif pada tegangan yang digunakan.

Setelah itu spesimen yang terkorosi akan diamati dengan cara diambil bagian yang terkena korosi dan akan diamati melalui metode pengamatan metalografi. Diamati korosi yang terjadi, transgranular atau intergranular, serta *pitting* yang terjadi.

Spesimen bent-beam didisain untuk pengujian pada tingkat tegangan di bawah batas elastik dari paduan. Untuk pengujian pada daerah plastis, yang digunakan adalah metode spesimen *U-bend*. Walaupun memungkinkan untuk menggunakan spesimen *stress bent-beam* pada daerah plastis, tetapi tegangannya tidak dapat dihitung untuk tegangan plastis dengan menggunakan metode tiga dan empat titik pembebanan sebaik *double beam*. Oleh karena itu, kegunaan *bent-beam specimen* dalam daerah plastis tidak direkomendasikan.

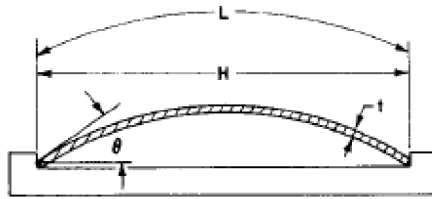
Ada beberapa metode *bent-beam specimen* yaitu *two point loaded specimen*, *three point loaded specimen*, *four point loaded specimen* dan *double-beam specimen* seperti **Gambar 2.15**.



**Gambar 2.15.** Skematik spesimen dan konfigurasi holder pada metode bent beam specimen <sup>[29]</sup>.

### 2.6.2 Rumus Pada *Two-Point Loaded Specimen*

Spesimen ini dapat digunakan untuk material yang tidak berdeformasi secara plastis ketika dibending dengan rumus  $(L-H)/H = 0.01$ . Spesimen harus sekitar 25-254 mm flat strip dipotong dengan panjang yang tepat untuk mendapatkan tegangan yang diinginkan setelah bending, dimana L dan H dapat dilihat pada **Gambar 2.16**.



**Gambar 2.16.** Metode pengujian *two-point loaded* spesimen <sup>[29]</sup>.

Perhitungan tegangan elastis pada fiber bagian luar di bagian tengah spesimen *two-point loaded* diperoleh dari analisa besarnya defleksi secara teori yaitu:

$$\varepsilon = 4(2E - K) \left[ \frac{k}{2} - \frac{2E - K}{12} \left( \frac{t}{H} \right) \right] \frac{t}{H} \dots\dots\dots (2.1)$$

$$\frac{L - H}{H} = \left[ \frac{K}{2E - K} \right] - 1 \dots\dots\dots (2.2)$$

dimana :

L = panjang spesimen (mm)

H = jarak antara penopang (mm)

t = ketebalan spesimen (mm)

e = *tensile strain* maksimum

0 = maksimum kemiringan spesimen

z = parameter integrasi

$$k = \sin \left( \frac{\theta}{2} \right)$$

$$K = \int_0^{\pi/2} (1 - k^2 \sin^2 z)^{-1/2} dz \text{ (integral elips pertama)}$$

$$E = \int_0^{\pi/2} (1 - k^2 \sin^2 z)^{1/2} dz \text{ (integral elips kedua)}$$

$\sigma$  = tegangan yang dicari ( $\frac{Kg}{mm^2}$ )

Em = modulus Young yang didapat dari pengujian tarik ( $\frac{Kg}{mm^2}$ )

Analisa matematika dari Persamaan 2.1 dan 2.2 menunjukkan adanya hubungan antara  $\varepsilon$  dan  $(L-H)/H$  dalam bentuk parameter. Parameter umum dalam persamaan ini adalah modulus  $k$  dari integral eliptik. Prosedur berikutnya dapat digunakan untuk menentukan panjang spesimen  $L$  yang diperlukan untuk memperoleh nilai tegangan maksimum  $\sigma$ .

Dengan membagi tegangan dengan modulus elastis  $E_m$  sehingga didapatkan regangan dengan rumus:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_m} \dots\dots\dots (2.3)$$

Dari Persamaan 2.1 tentukan nilai  $k$  yang tepat dengan nilai  $\varepsilon$  yang diperlukan.

Dengan menggunakan nilai  $k$  yang telah diperoleh dari persamaan 2,1, maka selanjutnya persamaan 2.2 kita selesaikan untuk memperoleh nilai  $L$ .

Hitung defleksi dari spesimen dengan persamaan sebagai berikut :

$$\frac{y}{H} = \frac{k}{2E - K} \dots\dots\dots (2.4)$$

dimana :  $y$  = maksimum defleksi

Hubungan ini dapat digunakan untuk memastikan bahwa tegangan maksimum tidak melebihi batas proporsional. Jika melebihi batas, pengukuran defleksi akan lebih besar daripada yang diperhitungkan.

Sebagai metode alternatif, berikut ini merupakan persamaan yang dapat digunakan untuk menghitung panjang spesimen :

$$L = \left( \frac{ktE}{\sigma} \right) \sin^{-1} \left( \frac{H\sigma}{ktE} \right) \dots\dots\dots (2.5)$$

dimana

- L = panjang spesimen (mm)
- $\sigma$  = maksimum tegangan (kg/mm<sup>2</sup>)
- E = modulus elastis (kg/mm<sup>2</sup>)
- H = holder span (mm)
- t = ketebalan specimen (mm)
- k = 1.280 , konstanta empirik

Persamaan ini dapat dipecahkan dengan komputer, dengan *trial* dan *error*, atau dengan menggunakan ekspansi dari fungsi sinus. Persamaan 2.5 dapat digunakan jika nilai dari  $(H\sigma)/ktE$  kurang dari 1.

Pilih ketebalan material dan panjang dan *holder span*, untuk mendapatkan nilai dari  $(L-H)/H$  berada di antara 0.01 - 0.5. Hal tersebut dapat menjaga kesalahan tegangan pada batas yang masih dapat ditoleransi. Ketebalan spesimen sekitar 0.8 - 1.8 mm dan holder span sekitar 177.8 - 215.9 mm memberikan hasil yang tepat ketika bekerja pada baja berkekuatan tinggi dan paduan aluminum dengan tegangan aplikasi sekitar 205 MPa untuk aluminum dan 1380 MPa untuk baja. Dimensi spesimen dapat dimodifikasi sesuai dengan yang diinginkan. Pada *two point loaded* spesimen, tegangan maksimum terjadi pada bagian tengah spesimen dan minimum pada akhir spesimen.

## 2.7 PERHITUNGAN KECEPATAN KOROSI

Kecepatan korosi dapat dihitung menurut rumus berikut:

$$\text{Laju Korosi} = \frac{K.W}{D.A.T} \dots\dots\dots (2.6)$$

Dimana:

K = konstanta (lihat tabel 2.2)

W = berat yang hilang selama percobaan (gram)

D = densitas material ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )

A = luas permukaan yang terkorosi ( $\text{cm}^2$ )

T = lamanya waktu ekspos (jam)

Banyak satuan yang berbeda digunakan untuk menggambarkan laju korosi dari suatu material. Dengan menggunakan satuan untuk T, A, W dan D, laju korosi dapat dihitung dengan menggunakan satuan yang berbeda dengan menggunakan nilai K yang tepat.

**Tabel 2.2.** Perbandingan Nilai Konstanta (K) Pada Persamaan Laju Korosi

Corrosion Rate Units Desired	Constant (K) in Corrosion Rate Equation
mils per year (mpy)	$3.45 \times 10^6$
inches per year (ipy)	$3.45 \times 10^3$
inches per month (ipm)	$2.87 \times 10^2$
millimetres per year (mm/y)	$8.76 \times 10^4$
micrometres per year ( $\mu\text{m}/\text{y}$ )	$8.76 \times 10^7$
picometres per second (pm/s)	$2.78 \times 10^6$
grams per square meter per hour ( $\text{g}/\text{m}^2\cdot\text{h}$ )	$1.00 \times 10^4 \times D$
milligrams per square decimeter per day (mdd)	$2.40 \times 10^6 \times D$
micrograms per square meter per second ( $\mu\text{g}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ )	$2.78 \times 10^6 \times D$

Sumber : ASTM G1-03 Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens

**Tabel 2.3.** Perbandingan Ketahanan Korosi Material Berdasarkan Nilai Laju Korosi

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

Sumber : Denny A. Jones, Principles and Prevention of Corrosion, hal. 34