

BAB II

DASAR TEORI

2.1. PENGERTIAN 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[1].

Korosi retak tegang merupakan sebuah sistem yang dipengaruhi oleh faktor material dan lingkungan. Gambaran berikut merupakan ciri-cirinya[2]:

1. Aksi Gabungan

Retakan disebabkan karena kombinasi sinergis antara tegangan dan lingkungan tertentu, biasanya dalam larutan.

2. Tegangan

Intensitas tegangan yang konstan pada sebuah *crack-opening mode*, K_1 , K_2 , atau K_3 , dapat menyebabkan terjadinya korosi retak tegang. Hal ini dapat terjadi akibat proses fabrikasi, kontraksi setelah pengelasan atau proses mekanik yang tidak sesuai. Tegangan yang dibutuhkan untuk menyebabkan korosi retak tegang biasanya berada di bawah tegangan luluh.

3. Lingkungan

Kondisi terjadinya korosi retak tegang hanya pada lingkungan tertentu dan untuk logam atau paduan yang diberikan, retakan terjadi bila terdapat agen tertentu saja.

4. Morfologi Retakan

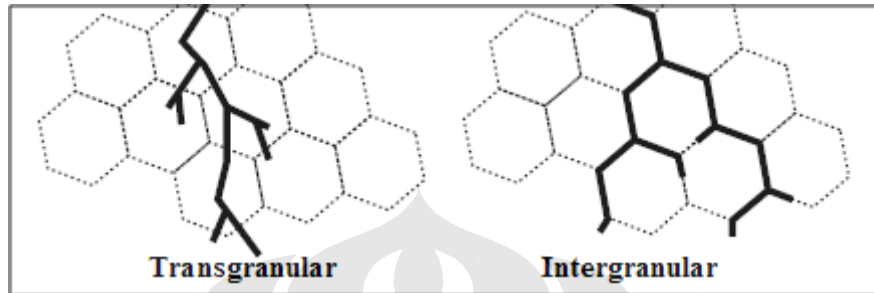
Retakan terlihat sebagai perpatahan getas dengan tidak adanya deformasi.

5. Usia Kegagalan

Umur pemakaian berkurang dengan meningkatnya tegangan dan merupakan penjumlahan dari dua bagian, yaitu (a) waktu penyebab timbulnya retakan, yang paling menentukan umur pemakaian, yaitu minggu atau tahun dan (b) waktu perambatan retak yang sangat cepat, biasanya jam atau menit.

6. Perambatan Retak

Alur perpatahan merupakan karakteristik dari beberapa logam atau paduan. Untuk sebagian logam, alur perpatahannya merupakan *intergranular*, yaitu retak di sepanjang batas butir antara kristal material; dan sebagian yang lainnya merupakan *transgranular*, yaitu memotong bidang kristal.



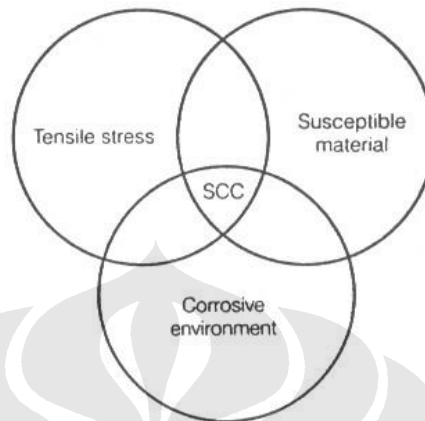
Gambar 2.1. Pola retakan *transgranular* dan *intergranular*

Salah satu yang sering menjadi kesalahpahaman bahwa SCC merupakan hasil dari konsentrasi tegangan pada cacat permukaan yang disebabkan karena korosi (yang diukur dengan faktor intensitas tegangan, K); ketika nilai kritis dari konsentrasi tegangan, K_{crit} , dicapai, perpatahan mekanik akan terjadi. Meskipun konsentrasi tegangan muncul pada cacat tersebut, namun nilainya belum melebihi nilai kritis yang diperlukan untuk menyebabkan perpatahan mekanik dari material di sebuah lingkungan yang inert ($K_{SCC} < K_{crit}$).

Pre-corrosion yang diikuti oleh pembebanan dalam lingkungan yang inert tidak akan memperlihatkan adanya perambatan retak yang terjadi, sedangkan ekspos lingkungan dan aplikasi tegangan yang terjadi bersama-sama akan menyebabkan perambatan retak. Istilah sinergis digunakan untuk menggambarkan bahwa proses ini merupakan kombinasi dari interaksi yang terjadi secara bersamaan dari gaya mekanik dan kimia yang akan menyebabkan terjadinya perambatan retak, sedangkan bila keduanya terpisah dan terjadi sendiri-sendiri, maka efek yang sama tidak akan terjadi. Intinya adalah korosi retak tegang terjadi ketika faktor tegangan dan serangan dari lingkungan terjadi secara bersamaan, bukan karena ekspos lingkungan yang diikuti oleh pembebanan.

2.2. PENYEBAB TERJADINYA KOROSI RETAK TEGANG

Korosi retak tegang dapat terjadi ketika tiga kondisi muncul secara bersamaan, antara lain adanya lingkungan kritis yang bersifat korosif, logam paduan yang rentan dan adanya faktor tegangan yang diberikan.



Gambar 2.2. Tegangan tarik, Kondisi material yang rentan serta adanya media korosif yang diperlukan untuk terjadinya korosi retak tegang[1].

Berikut merupakan beberapa faktor yang turut mempengaruhi kerentanan dari suatu material antara lain:

1. Sifat alami dan komposisi logam
2. Struktur kristal logam
3. Perlakuan panas dan mekanik yang diberikan terhadap logam
4. Unsur-unsur yang terdapat dalam lingkungan
5. Temperatur
6. Besarnya tegangan

2.2.1. 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, perunggu dapat mengalami korosi retak tegang pada lingkungan yang mengandung amonia dan tidak pada lingkungan yang mengandung klorida[3].

Merubah temperatur, derajat aerasi, dan/atau konsentrasi ionik akan merubah 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.

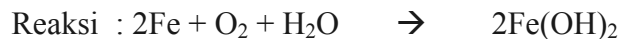
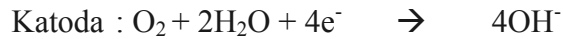
Tabel 2.1 Sistem Paduan-Lingkungan yang Menyebabkan Korosi Retak Tegang[3]

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

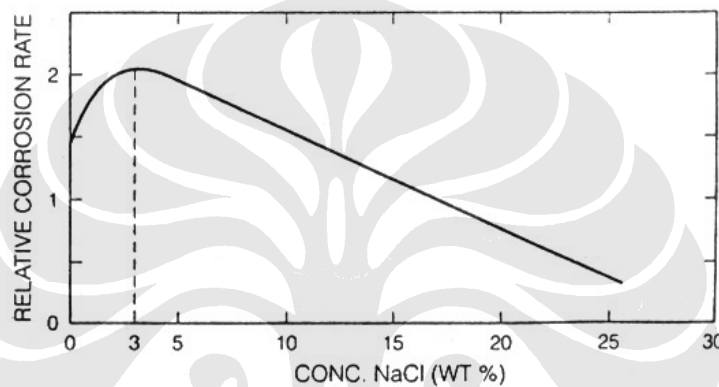
Sumber : ASM Handbook Volume 13, Corrosion, hal. 313

Reaksi reduksi dan oksidasi (reaksi redoks) yang terjadi ketika dilakukan pengukuran arus dapat ditulis sebagai berikut : (sebagai contoh untuk Fe)





Konsentrasi NaCl dalam larutan air laut sangat mempengaruhi terjadinya proses korosi. Terlihat pada Gambar 2.3 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.



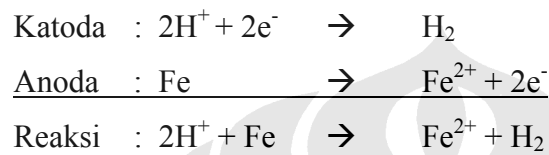
Gambar 2.3. Efek konsentrasi NaCl terhadap korosi baja[1].

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.

Pengaruh lingkungan lainnya yaitu pH pada korosi baja. 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.

Pada lingkungan asam, Fe cenderung teroksidasi menghasilkan ion Fe^{2+} dan Fe^{3+} . Dengan mengacu pada diagram Pourbaix, pada pH dan potensial tersebut, unsur Fe akan teroksidasi menghasilkan ion Fe^{2+} . Reaksi yang terjadi pada daerah asam ($\text{pH} < 7$) adalah :



Daerah-daerah yang terdapat dalam diagram Pourbaix terdiri 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 Fe^{2+} dan ion Fe^{3+} . Reaksi yang terjadi adalah :

Reaksi Oksidasi (Anoda) :



Reaksi Reduksi (Katoda) :



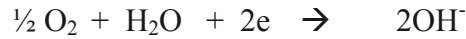
- Pada lingkungan pH basa

Logam Fe akan berada dalam daerah *immun*, terbentuk lapisan pasif Fe₂O₃ atau terkorosi (HFeO₂⁻). Reaksi yang terjadi adalah :

Reaksi Oksidasi (Anoda) :



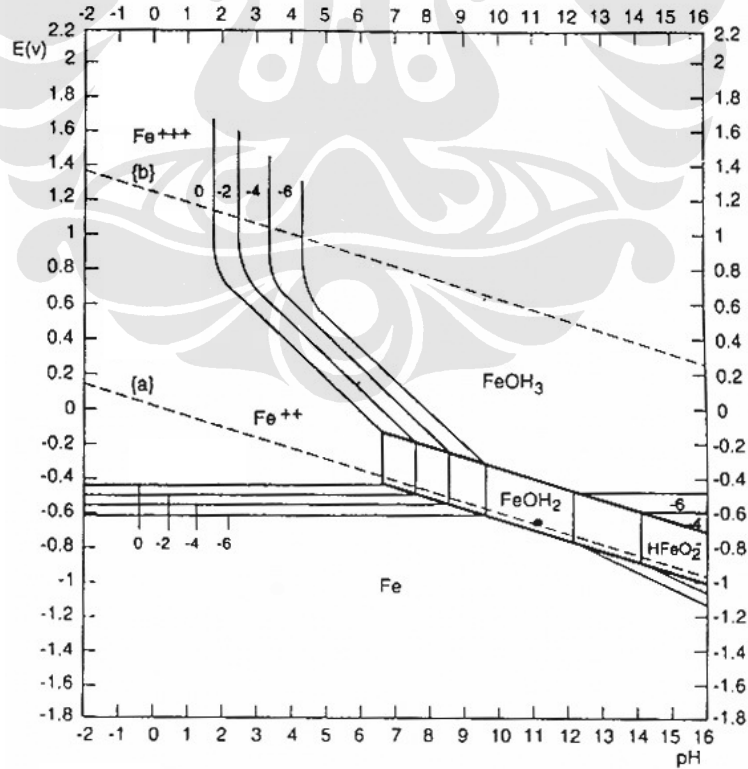
Reaksi Reduksi (Katoda) :



- Pada lingkungan pH netral

Logam Fe akan berada dalam daerah *immun* dan membentuk lapisan pasif memiliki bentuk Fe₂O₃ dan Fe₃O₄ 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 2.4. Diagram Pourbaix Fe[1].

Beberapa hal yang patut diperhatikan dalam pencegahan korosi dalam air laut adalah sebagai berikut :

- a. Adanya ion Cl^- dalam air laut yang merupakan ion agresif yang dapat merusak lapisan pasif yang terbentuk, sehingga akan memicu terjadinya *pitting corrosion*.
- b. Semakin banyak unsur penstabil lapisan pasif, maka daerah pasif yang terbentuk akan semakin besar sehingga ketahanan terhadap korosi juga akan semakin meningkat. Seperti perbedaan material baja stainless steel tipe 304 dan tipe 316, dimana Pada baja stainless steel unsur penstabil lapisan pasifnya adalah Mo, N dan Cr. Semakin tinggi kandungan unsur penstabil lapisan pasif maka kestabilan lapisan pasif yang terbentuk akan semakin meningkat. Sehingga ketahanan terhadap korosi *pitting* akan semakin meningkat pula.

Baja SS 316 juga memiliki kandungan Mo 2-3 % sehingga membuat kestabilan lapisan film meningkat, lebih tahan terhadap serangan Cl^- dan tahan terhadap korosi *pitting*.

Selain itu juga dapat dipertimbangkan adanya beberapa faktor yang mempengaruhi korosi pada air laut :

- a. Kadar oksigen

Meningkatnya kadar oksigen yang terlarut akan mempertinggi laju korosi. Hal ini dibuktikan pada korosi yang terjadi antara zona *splash* dengan zona *mudline*. Korosi pada zona *splash* lebih tinggi karena kandungan oksigen sangat tinggi dibandingkan dengan zone *mudline*.

- b. Velocity

Pitting biasanya terjadi pada elektrolit dengan kondisi yang *stagnant* seperti pada tangki atau cairan yang terperangkap pada part dan sistem pipa yang tidak aktif. Sehingga peningkatan kecepatan atau *velocity* akan menghambat terjadinya *pitting corrosion*.

- c. Temperatur

Semakin tinggi temperatur maka akan semakin tinggi laju korosi yang terjadi.

- d. Organisme biologis yang hidup dalam kedalaman laut tertentu

Jenis organisme yang ada pada lingkungan laut akan mempengaruhi laju korosinya. Seperti pada daerah *mudline*, walaupun kadar oksigen yang terlarut rendah namun pada daerah coastal banyak mengandung *sulfate-reducing bacteria* yang dapat meningkatkan laju korosi.

Dalam tiap kedalaman permukaan laut memiliki kecepatan korosi yang berbeda. Hal ini dipengaruhi oleh kadar oksigen yang terlarut dalam air laut dan mikroorganisme yang hidup pada kedalaman tersebut.

- Bahwa air laut mengandung 3.4 % garam, dan merupakan larutan basa dengan kadar pH 8. Merupakan elektrolit yang baik dan dapat menyebabkan *galvanic* dan *crevice corrosion*, sehingga pengendalian korosi galvanik dapat dilakukan misal dengan anoda korban atau *impressed current* untuk proteksi katodik. Selain itu hindarkan semua sel korosi galvanik yang tidak perlu terpasang pada air laut.

- Pada material yang digunakan pada air laut terdapat beberapa zona yang dipengaruhi, yaitu sebagai berikut :

Zone 1 : *Atmospheric Corrosion*

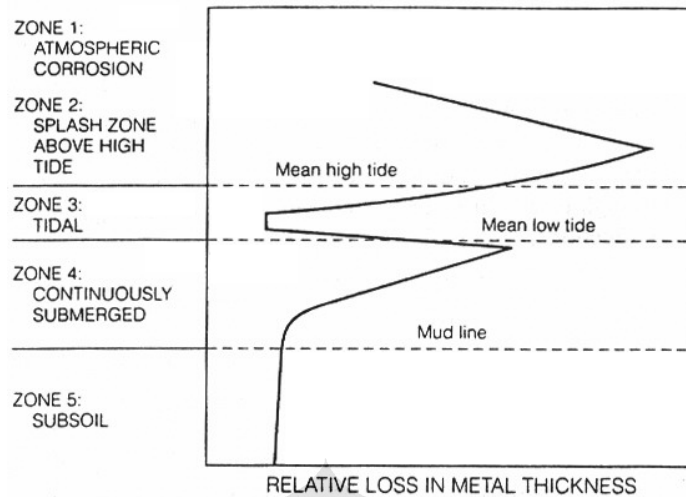
Zone 2 : *Splash Zone (Above High Tide)*

Zone 3 : *Tidal*

Zone 4 : *Continuously Submerged*

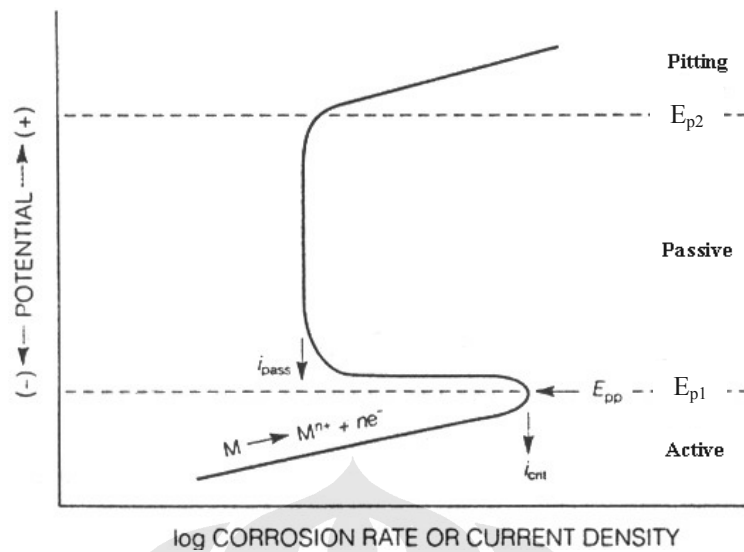
Zone 5 : *Subsoil*

Korosi berlangsung maksimum pada *splash zone*, dimana oksigen terlarut memiliki akses yang mudah untuk masuk dan klorida terkonsentrasi dipermukaan akibat proses spray atau cipratan air laut. Maka pengendalian korosi atau pencegahannya dapat difokuskan pada daerah ini[1].



Gambar 2.5. Efek kedalaman air laut pada korosi baja[1].

Potensial elektrokimia juga memiliki pengaruh yang kritis pada SCC di setiap material. Pada besar potensial tertentu material akan mengalami rapat arus yang nilainya tetap walaupun besar potensial ditambahkan, yaitu pada daerah pasif, dimana pada saat lapisan pasif tersebut terbentuk, pada material tidak terlihat tanda-tanda SCC. Ketika melewati daerah pasif, material akan mengalami korosi yang cepat. Pada banyak logam seperti besi, aluminum, nikel, krom, kobalt dan titanium, korosi akan menurun pada daerah di atas titik kritis E_{p1} , yang ditunjukkan oleh gambar ketahanan korosi di atas titik $E_{p1} - E_{p2}$, dimana daerah tersebut disebut sebagai daerah pasifasi. Pada potensial di atas E_{p2} maka material akan mengalami korosi sumuran. Korosi pada daerah pasif memiliki laju yang rendah, yaitu sekitar 10^3 sampai 10^6 kali dibawah laju korosi pada daerah aktif.



Gambar 2.6. Skema polarisasi aktif-pasif[1]

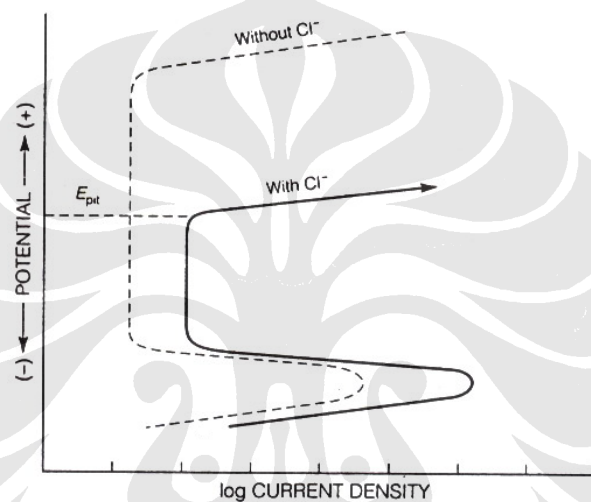
Salah satu aplikasi dari sifat pasif adalah pada proses perlindungan logam dari korosi dengan pematuan. Logam yang sering dimanfaatkan sebagai pembentuk lapisan adalah kromium. Meskipun tidak dapat digunakan sendiri karena bersifat rapuh, krom dapat menyediakan lapisan pasif bila dipadukan dengan logam lain seperti besi atau nikel. Hal yang harus diperhatikan, perlindungan logam dengan lapisan pasif bukan berarti tanpa kelemahan. Lapisan pasif sangat tipis dan bersifat rapuh sehingga sangat mungkin untuk terkelupas. Hal tersebut dapat menyebabkan terjadinya korosi lokal yang sulit untuk diperkirakan seperti *pitting*, *crevice corrosion*, atau *korosi retak tegang*.

Selain itu pengaruh ion klor pada larutan garam NaCl juga mempengaruhi korosi di lapisan pasif baja. Dimana ion klor dapat merusak lapisan pasif dengan meningkatkan konsentrasi lokal. Kandungan klor pada larutan untuk terjadi SCC pada uji *immersion* cukup berpengaruh besar. Namun hubungan ini tidak sederhana karena pada temperatur elevasi, konsentrasi klor tidak begitu berpengaruh tanpa didukung oleh konsentrasi oksigen yang terlarut di dalam larutan. Tetapi kehadiran oksigen tidak diperlukan untuk terjadi SCC pada *boiling chloride concentrate solution* pada tekanan standar atmosfer. Karena lingkungannya sudah cukup korosi dan adanya perlakuan panas yang akan mempercepat laju reaksi. Jadi semua sangat berkaitan yaitu ion klor dengan temperatur dan reaksi larutan lain.

Pitting initiation memiliki nilai *pitting* potensial kritis, E_{pitt} , dimana mengukur ketahanan korosi sumuran, yaitu dengan *pitting* index (PI).

$$PI = \%Cr + 3,3\%Mo + 11\%Ni + 1,5(\%W + \%Cb)$$

Bila *pitting* index besar maka kemampuan material dalam ketahanan korosi sumuran tinggi. Adanya klorida dalam larutan asam menyebabkan kenaikan potensiostatik atau potensiodinamik arus anodik pada semua potensial. Kehadiran klorida dapat mengecilkan ruang pasifasi pada diagram potensiostatik atau potensiodinamik, sehingga ketahanan korosi menurun, dapat ditunjukkan pada gambar berikut.



Gambar 2.7. Pengaruh penambahan ion klor pada diagram potensial dinamik[1]

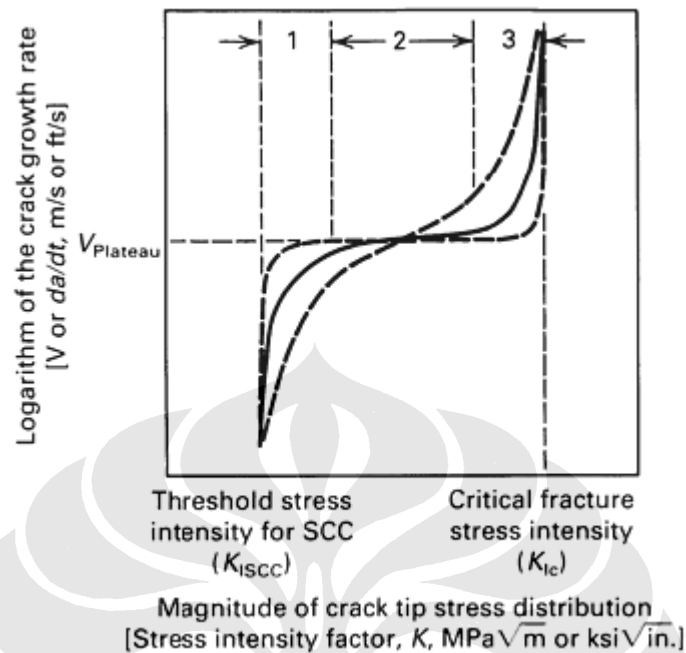
2.2.2. Faktor Tegangan

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. Peristiwa yang terjadi dalam proses korosi retak tegang biasanya dibagi ke dalam tiga tahap, antara lain:

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

Pada aplikasinya, sebagian besar kegagalan karena korosi retak tegang terjadi di bawah kondisi beban yang konstan dimana intensitas tegangan meningkat seiring dengan perambatan retakan. Dengan demikian, selalu

diasumsikan bahwa intensitas tegangan meningkat seiring dengan meningkatnya panjang retakan[3].



Gambar 2.8. Skema diagram laju perambatan retak sebagai fungsi dari intensitas tegangan ujung retakan menggambarkan daerah tahap perambatan retak 1, 2, dan 3 yang diidentifikasi dengan *plateau velocity* dan *threshold stress intensity*[3].

Biasanya hubungan antara tiga tahap laju perambatan retak dengan tingkat intensitas tegangan diketahui melalui percobaan perambatan retak. 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 seperti halnya, tingkatan ini berhubungan dengan besarnya tegangan minimum yang dibutuhkan untuk interaksi yang sinergis dengan lingkungan.

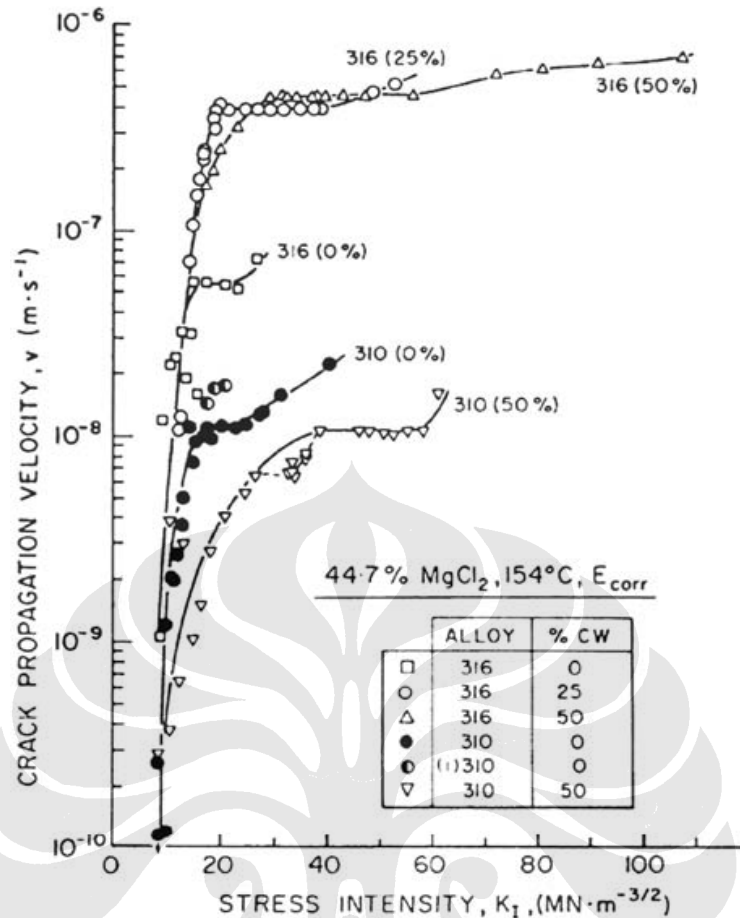
Pada tingkat tegangan yang rendah (tahap 1), laju perambatan retak meningkat secara drastis seiring dengan meningkatnya faktor intensitas tegangan. Pada tingkat intensitas tegangan menengah (tahap 2), laju perambatan retak mendekati kecepatan yang konstan dimana secara virtual tidak bergantung pada gaya 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} .

Fenomena korosi retak tegang kuningan dalam amonia encer disebut klasik karena peristiwa korosi tersebut terjadi pada tegangan yang relatif rendah dan laju yang sangat tinggi: 10^{-9} hingga 10^{-6} m/s atau 0.1 hingga 100 mm/hari. Kecepatan retak bervariasi menurut faktor intensitas tegangan (K_I) tahap I seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.8 [$K_I \approx \sigma(\pi a)^{1/2}$], dimana σ adalah tegangan dan a adalah panjang retakan. Kestabilan yang terdapat pada pertengahan nilai K_I mengindikasikan bahwa adanya suatu reaksi kimia, daripada mekanis, yang mengontrol kecepatan retak; hal tersebut misalnya pelarutan, difusi atau adsorpsi[4].

Korosi retak tegang tumbuh dengan kecepatan yang sangat rendah antara lain 10^{-12} m/s (0.1 μ m/hari, atau 1 mm setiap 30 tahun).

Nilai yang sangat penting yang ditunjukkan oleh Gambar 2.8 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.

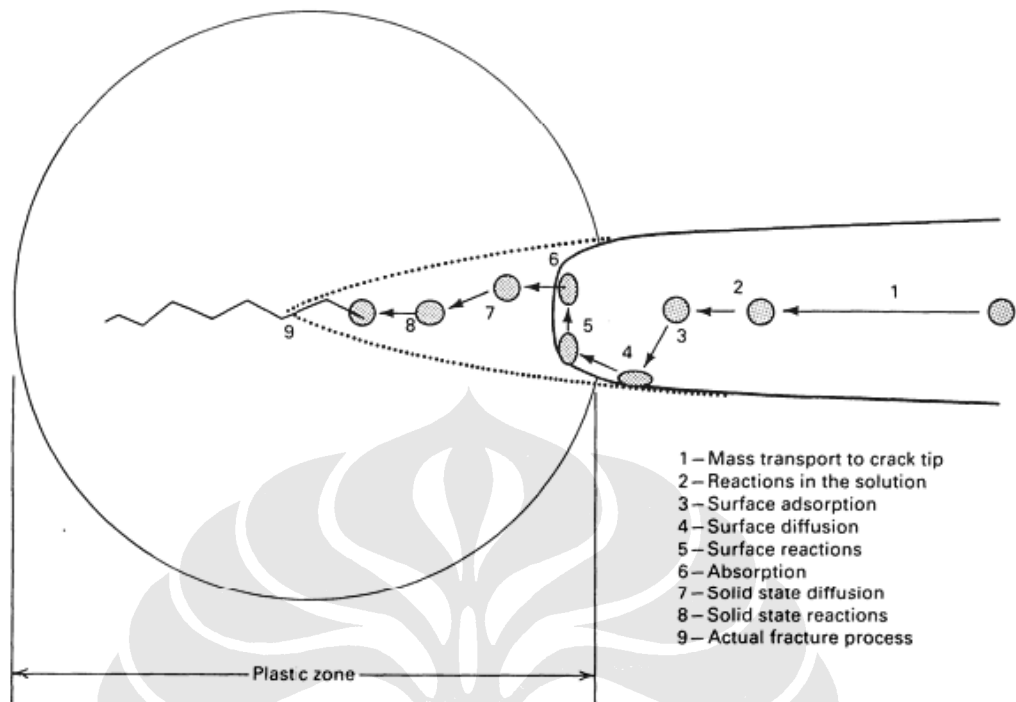


Gambar 2.9. Contoh kurva kecepatan retak-intensitas tegangan dari korosi retak tegang, menunjukkan efek dari komposisi paduan dan *cold work* pada korosi retak tegang *austenitic stainless steels* di dalam sebuah larutan klorida panas[3].

Gambar 2.9 menggambarkan sebuah ujung retakan dimana perambatan retak dihasilkan dari reaksi pada logam sebelum perambatan retak terjadi. Melalui Gambar 2.9 diketahui bahwa ada beberapa tahap yang terjadi, antara lain:

- Perpindahan massa sepanjang retakan menuju ujung retakan
- Reaksi pada larutan yang dekat dengan retakan
- Penyerapan permukaan pada atau dekat dengan ujung retakan
- Difusi permukaan
- Reaksi permukaan
- Absorpsi ke dalam *bulk*
- *Bulk diffusion* menuju daerah plastis
- Reaksi kimia di dalam *bulk*

- Laju pemutusan ikatan antar atom



Gambar 2.10. Skema dari proses ujung retakan pada lingkungan yang dibantu oleh perambatan retak[3].

Perubahan dalam lingkungan yang mengubah tahapan laju reaksi akan mempengaruhi laju dari perambatan retak.

Beberapa parameter lingkungan yang berbeda diketahui dapat mempengaruhi laju pertumbuhan retak dalam larutan encer antara lain[3]:

1. Temperatur
2. Tekanan
3. Unsur-unsur terlarut
4. Aktivitas dan konsentrasi larutan
5. pH
6. Potensial elektrokimia
7. Viskositas larutan
8. Pengadukan atau pencampuran

Perubahan dari parameter-parameter tersebut dapat merubah laju dari tahap-tahap yang telah dijelaskan sebelumnya, baik meningkatkan maupun mengurangi

laju perambatan retak. Selain itu, kita juga dapat menahan maupun mempercepat perambatan retak dengan mengubah laju reaksi lingkungan.

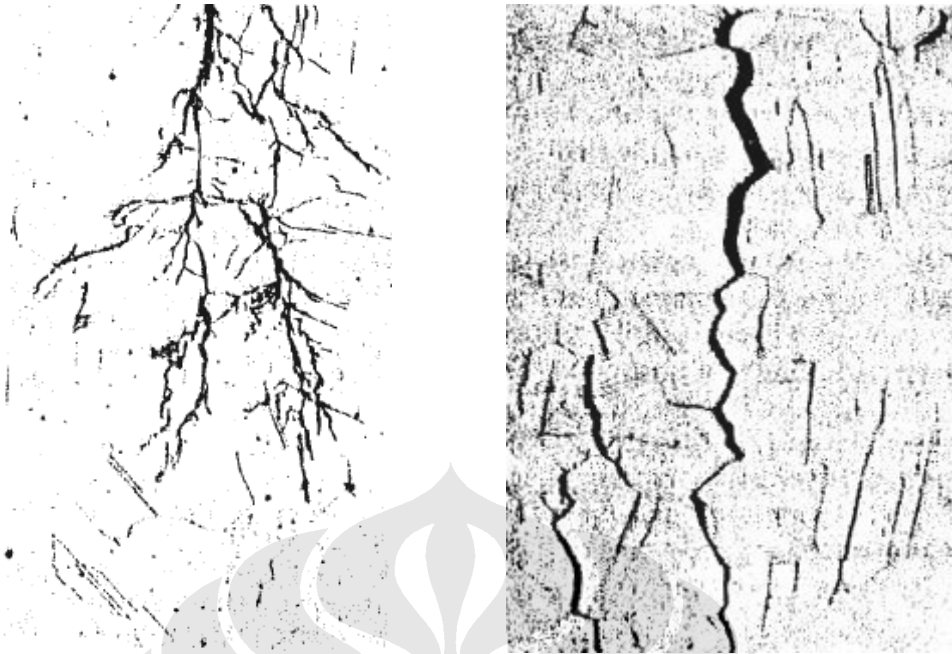
Selain parameter-parameter di atas, laju perambatan retak dari korosi retak tegang juga dapat dipengaruhi oleh:

- a. Besar tegangan yang diberikan atau faktor intensitas tegangan
- b. Komposisi paduan, antara lain (1) komposisi nominal, (2) komposisi terperinci (seluruh konstituen yang ada), dan (3) komposisi elemen pengotor
- c. Kondisi metalurgi, antara lain (1) tingkat tegangan, (2) fasa kedua (*second phase*) yang ada pada matriks dan batas butir, (3) komposisi fasa, (4) ukuran butir, (5) segregasi batas butir, dan (6) tegangan sisa
- d. Geometri retakan, antara lain (1) panjang, lebar, dan aspek rasio, dan (2) awal dan ujung retakan

Variabel-variabel penting yang mempengaruhi korosi retak tegang antara lain temperatur, komposisi larutan, komposisi logam, tegangan dan struktur logam[5].

a. Morfologi Retakan

Retakan dari korosi retak tegang memperlihatkan perpatahan getas yang merupakan hasil dari proses korosi. Retakan dari proses korosi retak tegang dapat berupa retakan *intergranular* dan *transgranular*. Retakan *intergranular* terjadi di sepanjang batas butir, sedangkan retakan *transgranular* merambat dengan memotong batas butir. Gambar 2.11 merupakan sebuah contoh dari perpatahan *transgranular* dan *intergranular*. Retakan *intergranular* dan *transgranular* sering muncul pada paduan yang sama, tergantung pada lingkungan atau struktur logam.

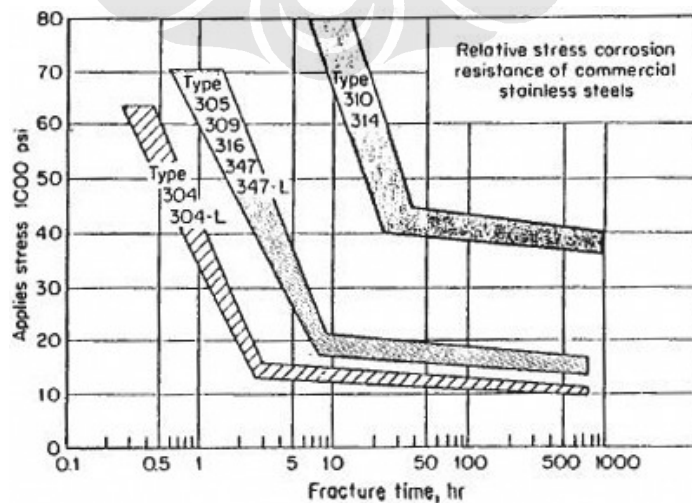


Gambar 2.11. Pola retakan *transgranular* pada *stainless steel* (kiri). Pola retakan *intergranular* pada perunggu (kanan)[1].

Retakan pada umumnya terjadi tegak lurus terhadap tegangan yang diberikan. Pola retakan juga dapat beragam dari yang retakannya tidak bercabang hingga yang bercabang banyak. Tergantung dari struktur dan komposisi logam serta komposisi lingkungan, morfologi retakan dapat bervariasi mulai dari retak yang tunggal hingga yang bercabang banyak.

b. Efek Tegangan

Meningkatkan tegangan akan mengurangi waktu sebelum retakan terjadi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.12.



Gambar 2.12. Kurva ketahanan relatif terhadap korosi retak tegang dari

beberapa *stainless steels* komersial pada larutan panas magnesium klorida 42%[1].

Ada beberapa dugaan mengenai tegangan minimum yang dibutuhkan untuk mencegah terjadinya retakan. Tegangan minimum ini tergantung pada temperatur, komposisi paduan, dan komposisi lingkungan. Pada beberapa kasus ditemukan bahwa nilainya berada sekitar 10% dari tegangan luluh material. Pada beberapa kasus lainnya, retakan tidak terjadi di sekitar 70% dari tegangan luluh. Untuk setiap kombinasi paduan-lingkungan terdapat tegangan minimum efektif atau *threshold*. Nilai *threshold* ini harus digunakan dengan pertimbangan bahwa kondisi lingkungan dapat berubah selama operasi berlangsung.

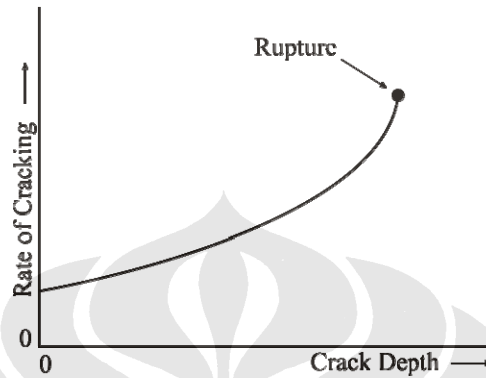
Kriteria tegangan berupa tegangan tarik dengan besar yang mencukupi untuk terjadinya retakan. Tegangan ini dapat muncul dari beberapa sumber: tegangan aplikasi, tegangan sisa, tegangan *thermal*, atau pengelasan. Pada kenyataannya, ada beberapa kasus dari korosi retak tegang dimana tidak ada tegangan aplikasi dari luar yang diberikan. Misalnya karena tegangan sisa yang dihasilkan setelah proses pengelasan dimana besarnya mendekati titik luluh material.

c. Waktu untuk retakan

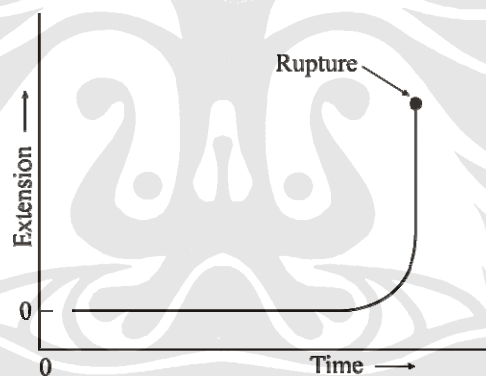
Parameter waktu pada fenomena korosi retak tegang sangat penting karena kerusakan fisik selama korosi retak tegang muncul selama tahap berikutnya. Ketika retakan berpenetrasi ke dalam material, luas penampang material akan berkurang dan kegagalan akhir akan terjadi yang seluruhnya dihasilkan dari aksi mekanis. Hal ini diilustrasikan dengan gambar 2.13 dan 2.14. Gambar 2.13 mengilustrasikan hubungan laju perpatahan dengan kedalaman retakan untuk sebuah spesimen yang diberikan pembebanan yang konstan. Pada awalnya, laju pergerakan retakan kurang lebih konstan, namun seiring dengan makin berkembangnya retakan, luas penampang menjadi berkurang dan tegangan tarik semakin meningkat. Sebagai hasilnya, laju pergerakan retakan bertambah seiring dengan kedalaman retakan sampai terjadinya perpatahan.

Luas penampang material berkurang hingga mencapai suatu titik dimana tegangan yang diberikan bernilai sama atau lebih besar dari kekuatan tarik maksimum dari logam, dan perpatahan terjadi melalui mekanisme perpatahan mekanis. Gambar 2.14 menggambarkan hubungan antara waktu ekspos material

dan penambahan panjang spesimen selama korosi retak tegang berlangsung. Lebar retakan pada awalnya sangat kecil selama tahap awal retakan, dan perpanjangan yang terjadi sangat kecil pada saat diamati. Selama tahap berikutnya, lebar retakan bertambah. Sebelum terjadi kegagalan, terjadi deformasi plastis dan perubahan perpanjangan yang cukup besar.



Gambar 2.13. Kurva laju perambatan retak korosi retak tegang sebagai fungsi dari kedalaman retakan selama pembebanan tarik[3].



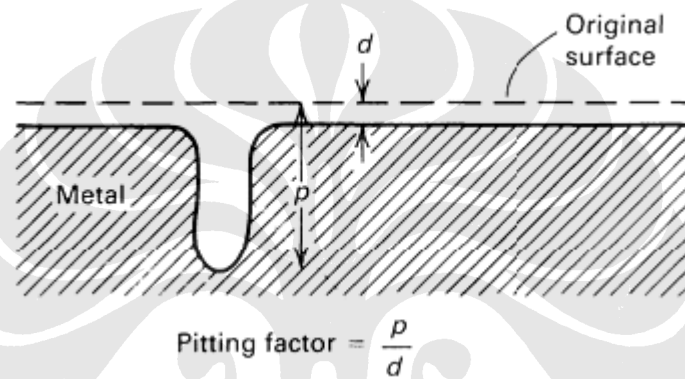
Gambar 2.14. Perpanjangan spesimen sebagai fungsi dari waktu selama pengujian korosi retak tegang dengan pembebanan yang konstan[3].

Pertanyaan penting yang sering ditanyakan berkaitan dengan korosi retak tegang ialah: Berapa lama seharusnya pengujian korosi retak tegang dilakukan? Gambar 2.13 dan 2.14 mengindikasikan bahwa sebaiknya pengujian dilakukan hingga perpatahan terjadi. Pengujian korosi retak tegang dalam waktu yang singkat harus dihindari karena penampakan retakan baik secara fisik maupun mekanis sangat kecil sampai terjadinya kegagalan.

2.3. JENIS KOROSI YANG TERJADI

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[3].

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.

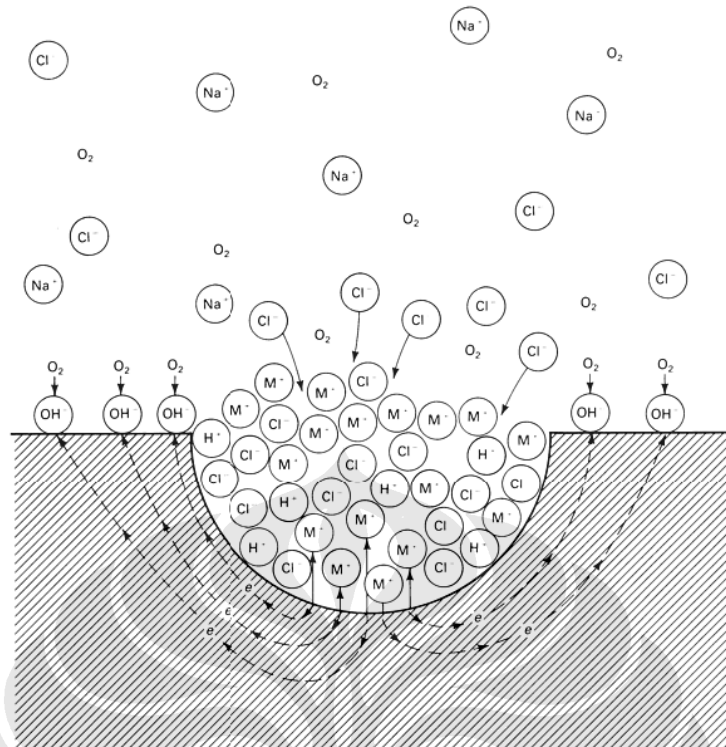


Gambar 2.15. Gambaran mengenai *pitting factor* (p/d)[3]

2.3.1. Mekanisme dan Teori

Diketahui bahwa lubang dimulai dengan pecahnya lapisan pasif pada permukaan logam. Perpecahan kemudian diikuti dengan pembentukan sebuah sel elektrolit. Sekali lubang terbentuk, lubang-lubang tersebut akan terus tumbuh dengan sendirinya secara autokatalis yaitu proses dimana sebuah lubang yang terbentuk menghasilkan kondisi yang menstimulasi sekaligus meneruskan aktivitas pembentukan lubang.

Proses ini digambarkan pada Gambar 2.16. Pertumbuhan lubang dikontrol oleh laju depolarisasi pada area katoda. Dalam air laut, kontrolnya dipegang oleh jumlah dan ketersediaan oksigen terlarut.



Gambar 2.16. Proses Autokatalis yang terjadi pada sebuah lubang korosi. logam, M terlubangi oleh sebuah larutan NaCl yang teraerasi. Oksidasi yang sangat cepat terjadi pada lubang, sedangkan reduksi oksigen terjadi pada batas permukaan[5].

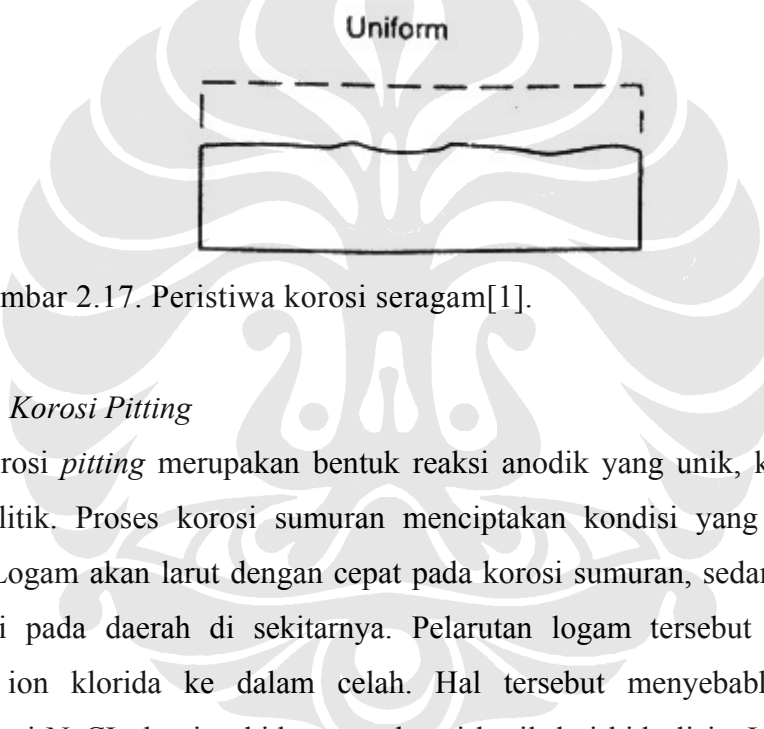
Perambatan retak melibatkan pemutusan logam dan penjagaan tingkat keasaman yang tinggi pada dasar lubang dengan cara hidrolisis dari pelarutan ion logam. Reaksi pemutusan logam yang bersifat anodik pada dasar lubang ($M \rightarrow M^{n+} + ne^-$) diseimbangkan oleh reaksi katodik pada batas permukaan ($O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$). Peningkatan konsentrasi dari M^{n+} di dalam lubang menyebabkan terjadinya migrasi ion klorida (Cl^-) untuk menjaga netralitas. Logam klorida yang terbentuk, M^+Cl^- , kemudian dihidrolisis oleh air menjadi hidroksida dan asam bebas ($M^+Cl^- + H_2O \rightarrow MOH + H^+Cl^-$).

Pembentukan asam ini akan menurunkan nilai pH pada dasar lubang (pH mendekati 1,5 hingga 1), sedangkan pH pada *bulk solution* tetap netral.

2.3.1.1. Korosi Seragam

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, lihat Gambar 2.17.



Gambar 2.17. Peristiwa korosi seragam[1].

2.3.1.2. Korosi Pitting

Korosi *pitting* merupakan bentuk reaksi anodik yang unik, karena bersifat autokatalitik. Proses korosi sumuran menciptakan kondisi yang mempercepat korosi. Logam akan larut dengan cepat pada korosi sumuran, sedangkan oksigen tereduksi pada daerah di sekitarnya. Pelarutan logam tersebut menyebabkan migrasi ion klorida ke dalam celah. Hal tersebut menyebabkan tingginya konsentrasi NaCl, dan ion hidrogen sebagai hasil dari hidrolisis. Ion klorida dan hidrogen akan mempercepat pelarutan logam menjadi ionnya. Pada daerah permukaan, reduksi oksigen terus terjadi sehingga daerah permukaan akan terlindung dari korosi. Dengan kata lain, sumur memproteksi bagian lain dari logam secara katodik.

Korosi *pitting* merupakan bentuk korosi yang paling berbahaya karena dapat menyebabkan kegagalan pada suatu material hanya dengan kehilangan sedikit persen berat. Sangat sulit untuk mendeteksi korosi *pitting* karena ukurannya yang

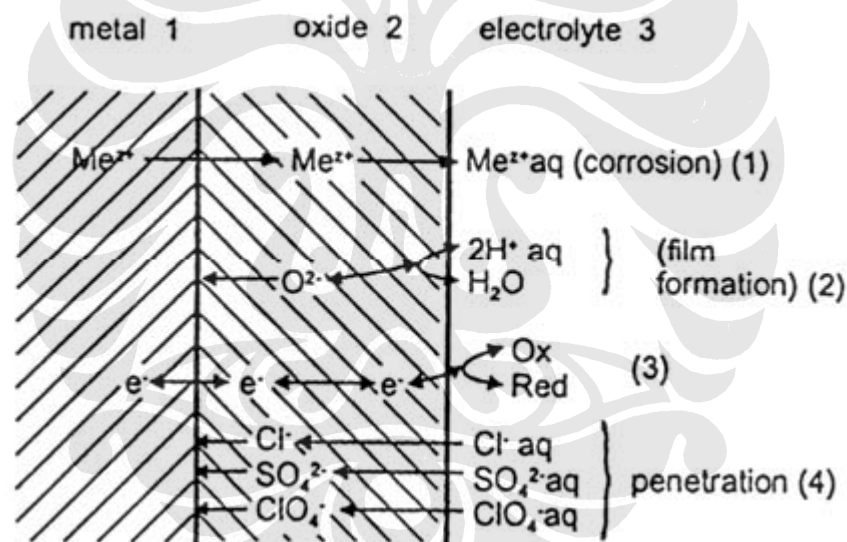
kecil dan sering tertutup oleh produk korosinya. Secara umum, mekanisme serangan *pitting* terdiri dari 3 tahap, yaitu :

A. Pecahnya lapisan pasif

Pecahnya lapisan pasif dari material terdiri dari 3 tahap yaitu :

a. Penetrasi

Pada tahap ini terjadi perpindahan kation 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 2.18. Mekanisme penetrasi ke lapisan pasif[4].

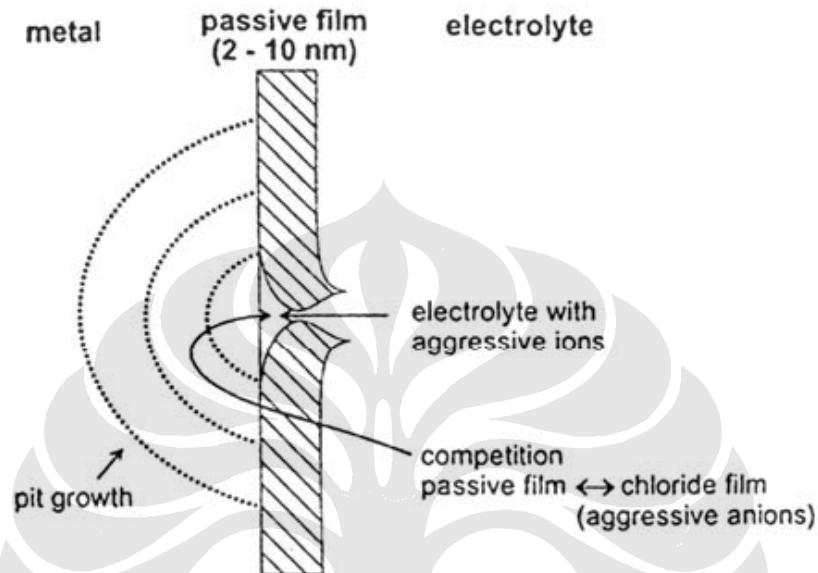
b. Pecahnya lapisan film

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 2.19.



Gambar 2.19. Mekanisme pemecahan lapisan pasif[4].

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.

B. Pertumbuhan Lubang

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*.

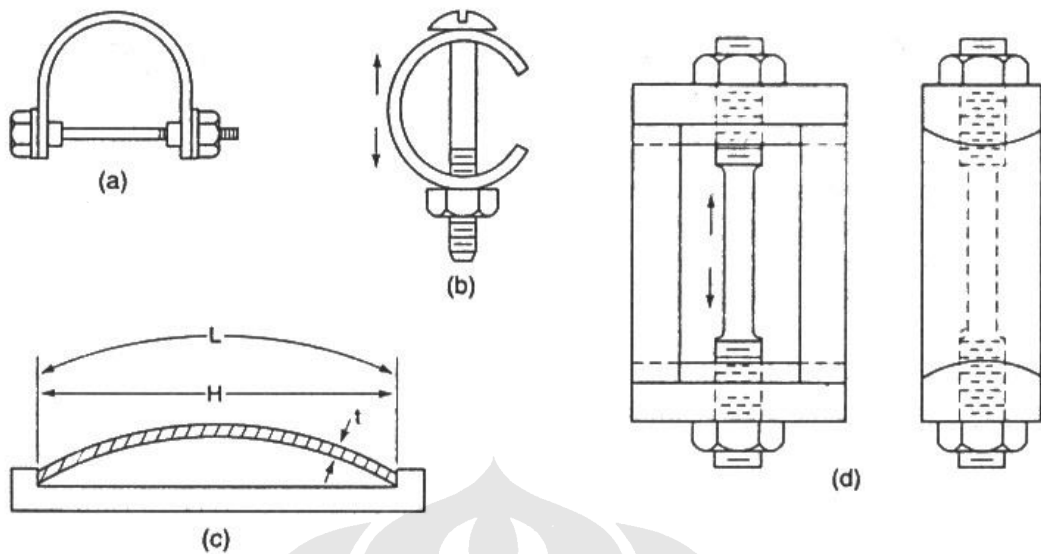
c. Repasivasi

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.

2.4. METODE PENGUJIAN KOROSI RETAK TEGANG

2.4.1. Mekanisme Pengujian Pada SCC

Material ditebuk 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 2.30 di bawah ini[6].



Gambar 2.30. Metode pengujian pembebanan untuk korosi retak tegang. (a) *U-bend* (b) *C-ring* (c) *Bent-beam* (d) *Tensile*[6].

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.

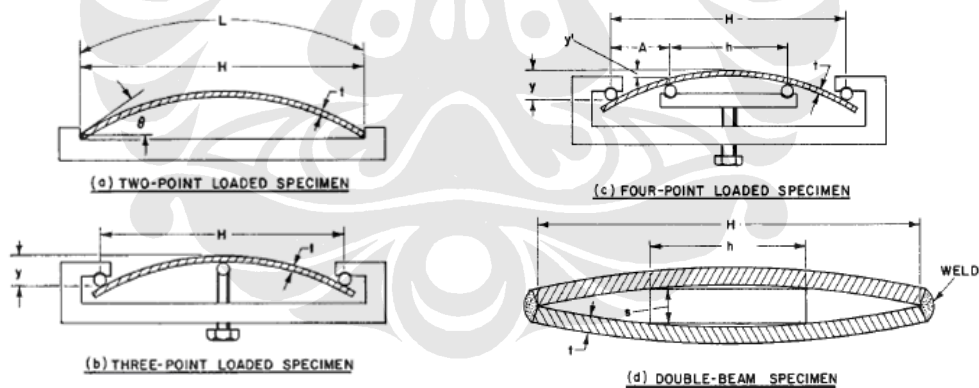
Tegangan yang dipakai ditentukan dari ukuran spesimen dan defleksi lekukan. Pada percobaan ini menggunakan panjang spesimen 10 inch dengan acuan ASTM G-39. Spesimen kemudian diekspos ke lingkungan korosif dan ditentukan waktu yang diperlukan untuk menghasilkan retak. Lingkungan tersebut

ialah lingkungan air taut (NaCl 3,5%). 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.

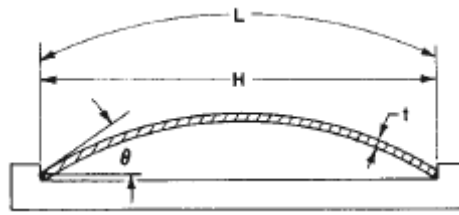
Ada beberapa metode *bent-beam specimen* yaitu *two point loaded specimen*, *three point loaded specimen*, *four point loaded specimen* dan *double-beam specimen* seperti Gambar 2.31.



Gambar 2.31. Skematik spesimen dan konfigurasi holder pada metode *bent-beam specimen*[6].

2.4.2. 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 2.32.



Gambar 2.32. Metode pengujian two-point loaded specimen[6]

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

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

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

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

σ = 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 ε 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 σ .

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 ε 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)

σ = maksimum tegangan (kg/mm²)

E = modulus elastis (kg/mm²)

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.

2.5. 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 (gr/cm^3)

A = luas permukaan yang terkorosi (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, untuk Satuan yang Berbeda[15]

Corrosion Rate Units Desired	Constant (K) in Corrosion Rate Equation
mils per year (mpy)	3.45×10^6
inches per year (ipy)	3.45×10^3
inches per month (ipm)	2.87×10^2
millimetres per year (mm/y)	8.76×10^4
micrometres per year ($\mu\text{m}/\text{y}$)	8.76×10^7
picometres per second (pm/s)	2.78×10^6
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[1]

Relative Corrosion Resistance ^a	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