

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 DEFENISI DAN MEKANISME KOROSI

Korosi merupakan proses merusak yang disebabkan oleh reaksi kimia antara logam atau paduannya dengan lingkungannya. Fenomena ini dapat terjadi dengan cepat atau lambat. Pada setiap material memiliki bentuk korosi yang berbeda – berbeda untuk aplikasi yang berbeda pula. Bentuk – bentuk korosi antara lain korosi seragam (*uniform*), sumuran (*pitting*), *intergranular*, *stress corrosion cracking* dan lain – lain.

2.2 KOROSI SERAGAM

Korosi *uniform* merupakan kerusakan logam dari permukaannya karena korosi secara merata. Jenis korosi ini merupakan bentuk korosi yang paling umum terjadi pada peristiwa korosi. 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. Korosi seragam dapat dilihat dengan menghitung *weight loss* dari ketebalan yang terdegradasi.

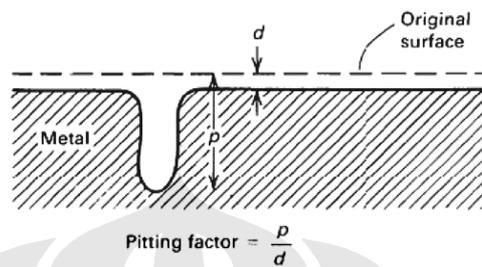
2.3 KOROSI INTERGRANULAR

Korosi *Intergranular* merupakan korosi yang terjadi pada batas butir material. Jenis korosi ini dapat terjadi karena adanya *impurities*, kelebihan unsure paduan atau pengurangan salah satu dari unsure paduan. Sedikit jumlah paduan besi pada aluminium, dimana kelarutan besi yang rendah, akan memberikan segregasi pada batas butirnya dan akan menyebabkan terjadinya korosi *intergranular*. Hal lain ditunjukkan pada kekurangan paduan kromium pada *stainless steel* yang menyebabkan korosi *intergranular* pada batas butirnya.

2.4 KOROSI SUMURAN (PITTING)

Pitting Corrosion disebabkan adanya lapisan film yang pecah/hancur dan hanya dapat terjadi dengan adanya *anionic*, ion klorida yang agresif. Klorida merupakan sebuah anion dari asam kuat, dan relative kecil dengan tingkat difusi

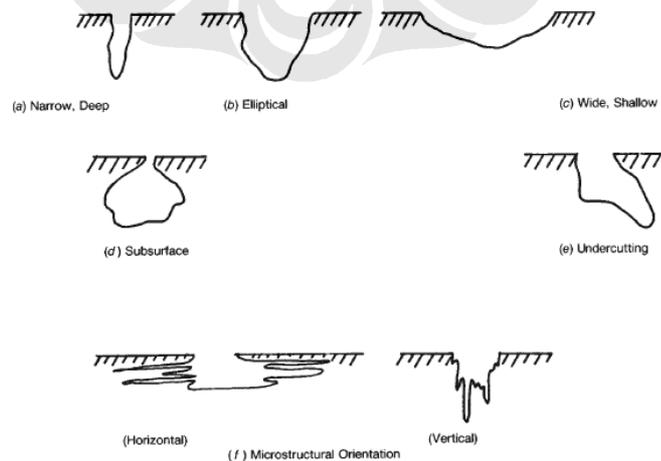
yang tinggi dan dapat bercampur dengan pasivasi dan dimana-mana merupakan *contaminant*. Kedalaman *pitting* sering disimbolkan dengan *pitting factor* yaitu perbandingan dari penetrasi pada logam yang terdalam terhadap penetrasi logam rata-rata yang ditentukan oleh kehilangan berat spesimen.



Gambar 2.1 Gambaran mengenai *pitting factor*.^[1]

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.

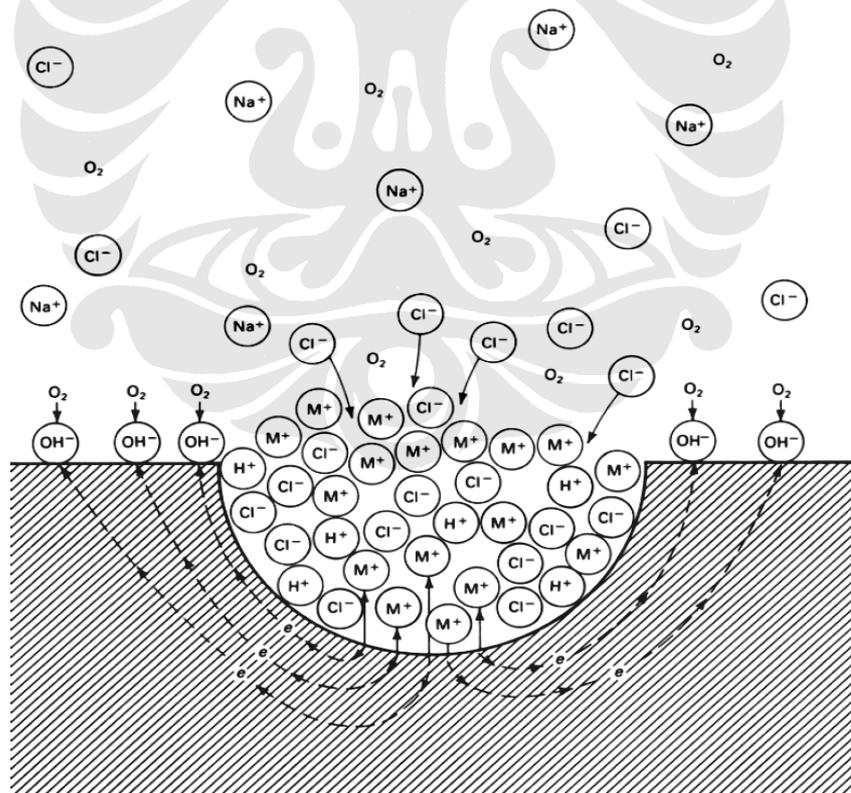
Pitting tidak dapat diprediksi, khususnya pada kondisi pembentukan *pitting* yang dalam. Permukaan *pitting* biasanya tertutup oleh *deposit* dari aliran proses dan endapan produk korosi. Berdasarkan bahan penyusun logam dan kondisi kimia lingkungan, *morfologi pitting* akan bermacam-macam seperti ditunjukkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Variasi bentuk morfologi *pitting* di permukaan.^[2]

Untuk mengukur kedalaman *pit*, dapat dilakukan dengan beberapa cara, termasuk pemeriksaan *metallographic*, menggunakan micrometer atau alat ukur kedalaman, dan dengan metode mikroskop. Dengan metode secara mikroskopik, mikroskop metalurgi difokuskan pada bibir *pit* dan pada dasar dari *pit*. Perbedaan antara pembacaan awal dan akhir pada alat focus mikroskop merupakan kedalaman dari *pit*. Pembacaan dengan metode ini secara umum merupakan indicator yang lebih baik dari pada menghitung besar pitting dengan metode menghitung berat yang hilang.

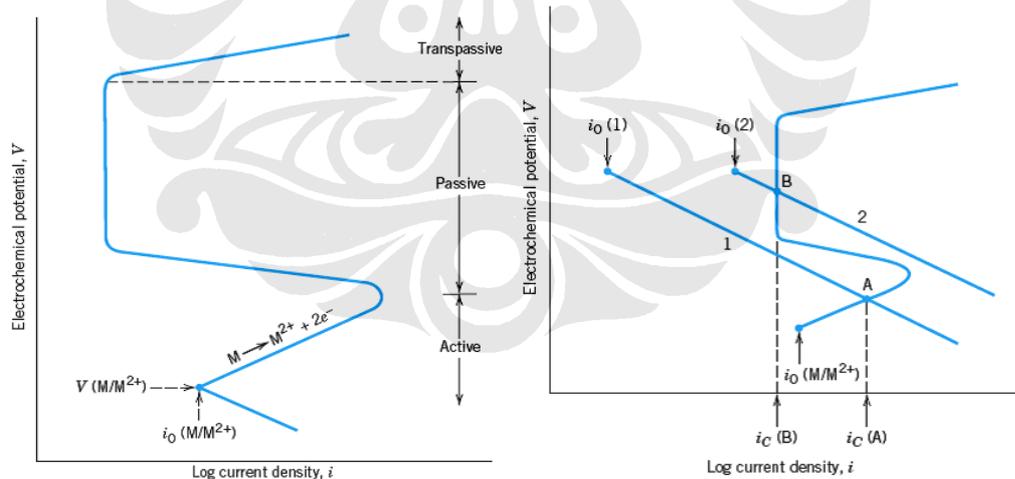
Adanya perantara oksidasi pada lingkungan klorida sering mengganggu sekali dan lebih lanjut akan mempertinggi *localized corrosion*. Hampir semua perantara oksidasi mencegah tingginya terjadi pitting corrosion dengan memberikan reaksi katodik ekstra dan meningkatkan potensial lokal. Tentu, oksigen terlarut merupakan perantara oksidasi yang paling umum. Reaksi dimana reduksi oksigen terjadi adalah $O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$ (kondisi basa atau netral).



Gambar 2.3 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.^[3]

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, sedangkan pH pada *bulk solution* tetap netral.

Fenomena pasifasi dapat dijelaskan pada kurva polarisasi (potensial – log current density). Gambar 2.4(a) menunjukkan kurva polarisasi logam M, dimana pada potensial yang rendah, keadaan logam berada dalam wilayah aktif. Dengan bertambahnya nilai potensial, laju korosi berkurang sampai nilai yang paling rendah. Hal ini disebut dengan wilayah pasif. Akhirnya, pada nilai potensial yang makin tinggi, laju korosi akan meningkat lagi dengan potensial pada wilayah *transpassive* dan pada wilayah inilah peristiwa korosi *pitting* mulai terjadi.



Gambar 2.4 Polarisasi logam M (a) Menggambarkan aktif, pasif, dan transpasif. (b) Pada kondisi lingkungan yang berbeda.^[4]

Gambar 2.4(b) menggambarkan bagaimana logam dapat mengalami kondisi aktif dan pasif tergantung dari lingkungan korosi. Dapat dilihat juga adanya kurva polarisasi oksidasi untuk aktif – pasif logam M, dan adanya kurva

polarisasi reduksi untuk dua larutan yang berbeda, dimana ditunjukkan proses reduksi 1 dan 2. Kurva pertama memotong pada polarisasi oksidasi di wilayah aktif di titik A. Titik potong polarisasi reduksi yang kedua yaitu pada titik B, dimana berada pada wilayah pasif. Maka laju korosi pada larutan 1 lebih besar dari pada larutan 2 karena i_c (A) lebih besar dari pada i_c (B).

Penambahan *Molybdenum* (lebih dari 2%) pada *stainless steel* akan memberikan ketahanan terhadap *pitting*. AISI 316 merupakan campuran yang disukai dengan ditambahkan *molybdenum*. Konsentrasi klorida yang tinggi (lebih dari 1000 ppm) kekurangan sirkulasi akan menyebabkan *pit* pada SS 316. Untuk media *pitting* yang agresif, kadar nikel yang lebih tinggi dan *molybdenum* yang lebih tinggi dibutuhkan. Campuran yang memiliki ketahanan paling tinggi aktualnya adalah merupakan *nickel-based* dengan penambahan *molybdenum* dan *chromium*.^[5]

2.5 KOROSI RETAK TEGANG

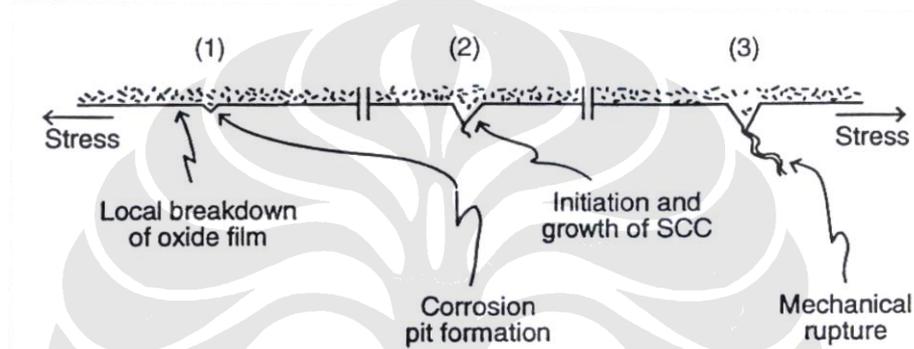
SCC didefinisikan sebagai kegagalan dari *alloys* yang terjadi dengan adanya *cracking* ketika terkena lingkungan dan seiring dengan adanya tegangan *tensile* yang statis.

Secara umum, SCC diamati pada kombinasi dari paduan dan lingkungan yang menghasilkan pembentukan sebuah film pada permukaan logam. Film ini dapat berupa lapisan pasif, atau berupa lapisan paduan. Dalam beberapa kasus, film-film ini mengurangi laju dari korosi umum atau *uniform*, membuat *alloy* diperlukan untuk ketahanan terhadap korosi *uniform* pada lingkungan. Hasilnya, SCC menjadi perhatian yang paling besar terhadap ketahanan korosi paduan bila terkena lingkungan air yang agresif.

2.5.1 Mekanisme Pertumbuhan Korosi Retak Tegang

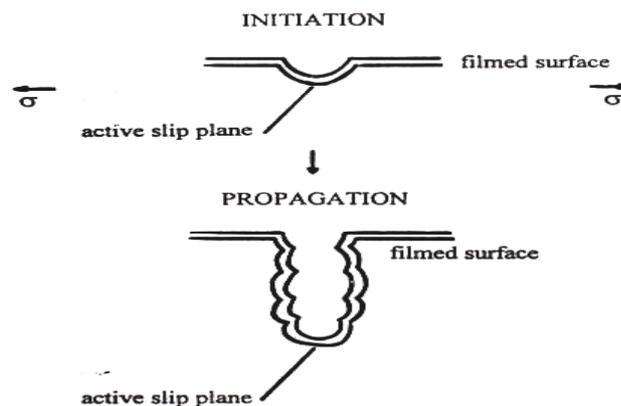
Stress Corrosion Cracking merupakan proses kegagalan material yang terjadi dengan lambat. Pada awal akan terbentuk inisiasi *crack*, selanjutnya proses perambatan/penyebaran dengan laju yang sangat lambat (contoh : 10 m/s), hingga tegangan sisa dari logam yang melewati kekuatan retak/patah.

Bila dilihat secara mikrostruktur, pertumbuhan retak pada material terbagi menjadi tiga tahap. Tahap pertama merupakan *initiation period*. Pada tahap ini, terjadi serangan korosi secara lambat akibat terekspos lingkungan korosif yang menyebabkan terbentuknya *pit* ataupun *stress concentration* yang memungkinkan untuk terbentuknya retak. Tahap kedua merupakan *propagation crack*. Pada tahap ini terjadi kombinasi antara tegangan dan konsentrasi media agresif yang dapat memicu terjadinya pertumbuhan retak dimana lebih besar dari *stress intensity* pada ujung retak. Tahap ketiga merupakan tahap peningkatan *stress intensity* yang melebihi batas untuk terjadinya kegagalan (Gambar 2.5).



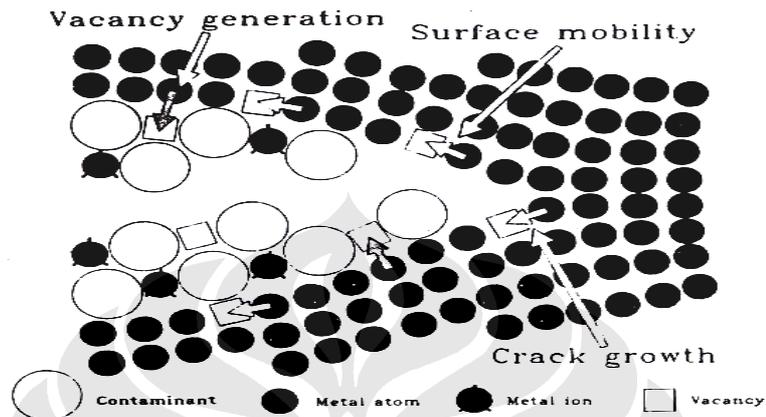
Gambar 2.5. Pertumbuhan Retak yang Terjadi pada Proses SCC.^[6]

Pertumbuhan retak pada SCC dengan cara *slip-dissolution* yaitu retak akan tumbuh pada daerah anodic yang terlokalisasi. Retak yang terlindungi oleh oksida kemudian menghasilkan ujung retakan (*stress konsentrasi*). Ketika diaplikasikan tegangan, maka retak akan menjalar dan oksida kembali akan terbentuk, seperti terlihat pada Gambar 2.6. Pertumbuhan retak ini dapat terjadi secara *intergranular* ataupun *transgranular*.



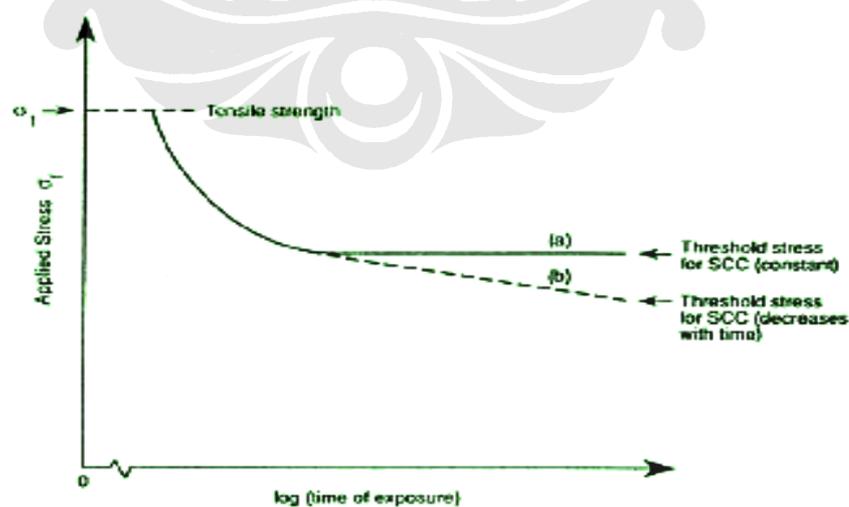
Gambar 2.6 Pertumbuhan retak dari adanya inisiasi retak dengan cara *slip-dissolution*.^[7]

Mekanisme pertumbuhan retak yang lain adalah *Galvele's surface mobility model*. Pada model ini retak tumbuh akibat difusi permukaan atom logam yang berkombinasi dengan ion atau molekul dari lingkungan di ujung retak yang tajam (Gambar 2.7).



Gambar 2.7 Pertumbuhan retak *Galvele's surface mobility model*.^[8]

Penjalaran retak merupakan fungsi dari waktu, dimana akan terjadi perpatahan pada akhir dari proses. Pada Gambar 2.8, hubungan antara waktu dan penjalaran retak yaitu bertambahnya waktu akan meningkatkan kecepatan penjalaran retak. Laju penjalaran pada masing-masing paduan umumnya berbeda, tergantung dari komposisi dan struktur bahan.



Gambar 2.8 Penjalaran retak sebagai fungsi waktu.^[9]

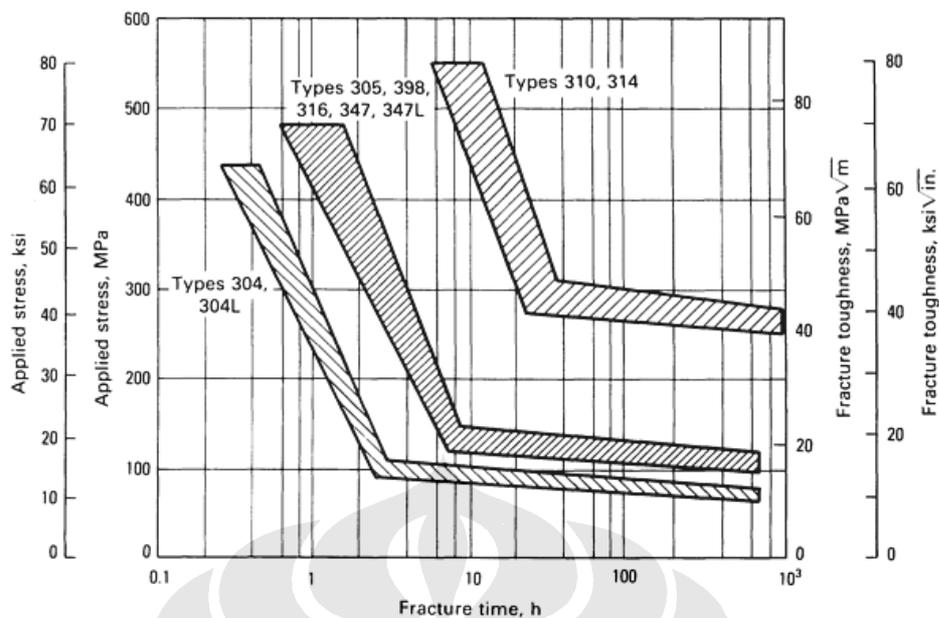
Kemampuan material untuk terjadi SCC dipengaruhi oleh rata-rata komposisi kimia, orientasi butir, komposisi dan distribusi endapan serta interaksi dislokasi. Faktor-faktor tersebut akan berkombinasi dengan komposisi lingkungan dan pengaruh tegangan untuk menyebabkan retakan. Sebagai contoh logam murni biasanya lebih tahan terhadap SCC daripada logam paduan. *High Strength* paduan aluminium lebih rentan terhadap terjadinya SCC pada arah tegak lurus *rolling* daripada arah sejajar *rolling*.

2.5.2 Faktor Penyebab Terjadinya Korosi Retak Tegang

2.5.2.1 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.

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.^[10]

Pada umumnya retak yang disebabkan oleh adanya klorida telah dilakukan dengan media tes yang cepat yaitu pada larutan panas magnesium klorida. Semua *stainless steel* memiliki kerentanan terhadap *chloride cracking* seperti yang terlihat pada Gambar 2.9. Hal yang penting bagaimanapun, paduan nikel yang lebih tinggi seperti pada tipe SS 310 dan 314, lebih memiliki ketahanan yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan yang lain.

2.5.2.2 Faktor Lingkungan

Stress Corrosion Cracking adalah suatu proses korosi yang melibatkan material yang spesifik, adanya tegangan tarik dan didukung oleh lingkungan yang korosif. Ketiga kondisi tersebut harus bergerak simultan yang dapat menimbulkan adanya perambatan retak. Beberapa lingkungan korosif tidak dapat menyebabkan SCC pada suatu paduan. Dan sebaliknya meskipun berada pada lingkungan korosif, tetapi paduan bukan paduan spesifik (*susceptible material*) maka proses SCC tidak akan terjadi. Beberapa paduan dan lingkungan yang mungkin terjadi SCC terlihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Kombinasi Paduan dan Lingkungan yang menyebabkan Korosi Retak Tegang.^[11]

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)

2.5.2.3 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.

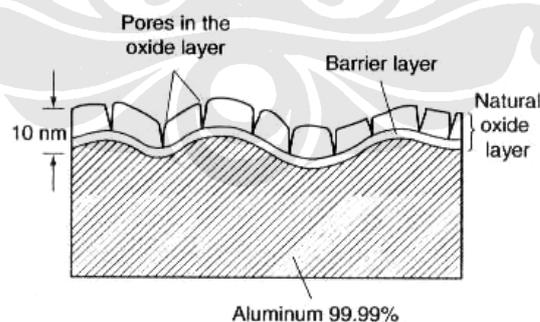
Pada paduan aluminium kekuatan tinggi, aluminium yang memiliki orientasi butir yang tegak lurus terhadap arah *rolling* akan lebih mudah mengalami korosi retak tegang daripada aluminium yang memiliki orientasi butir yang searah dengan arah *rolling*.^[12] Pada *weldsensitized austenitic steel* yang diekspos pada air bertemperatur tinggi, adanya presipitat karbida kromium pada batas butir merupakan penyebab terjadinya korosi retak tegang.^[13]

Paduan yang terkandung dalam *stainless steel*, terutama sekali *nickel*, menentukan sensitivitas logam untuk terjadinya SCC. *Ferritic stainless steel* dimana memiliki paduan dengan *nickel-free* dan *high-nickel*, tidak merupakan subjek untuk terjadinya SCC. Paduan dengan kandungan *nickel* yang lebih besar dari 30% merupakan *immune* untuk terjadinya SCC. Tipe – tipe yang paling umum dari *stainless steel* (304, 304L, 316, 316L, 321, 347, 303, dan 301) yang memiliki kandungan *nickel* berkisar antara 7 – 10% paling rentan untuk terjadinya SCC.^[14]

2.6 KOROSI PADA ALUMINIUM ALLOY

2.6.1 Lapisan Pasif *Aluminium Alloys*

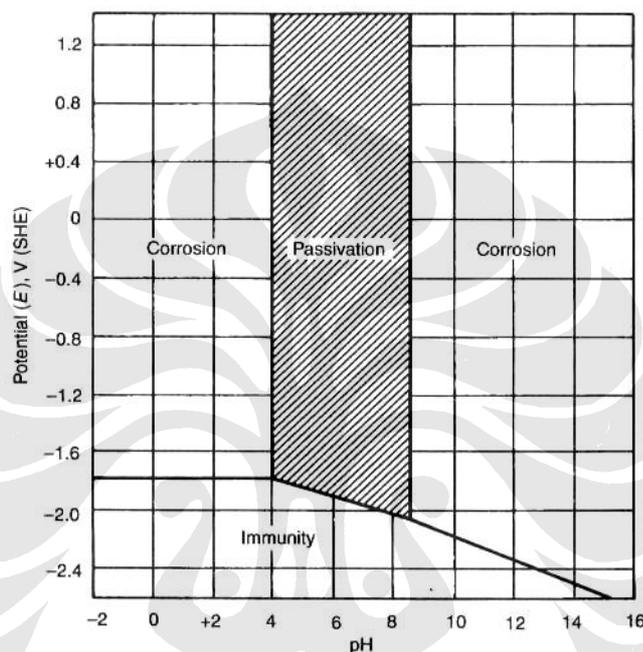
Aluminium merupakan logam yang reaktif secara termodinamika. Seperti yang diketahui, aluminium memperlihatkan ketahanan korosi yang baik dan lebih dipilih dari logam lain dalam perdagangan karena lapisan film oksida yang memiliki ikatan yang kuat pada permukaannya. Normalnya permukaan film terbentuk diudara pada temperature ruang dan hanya memiliki ketebalan sekitar 5 nm (50 Å). Jika lapisan tersebut rusak (terabrasi), film yang tipis ini terbentuk kembali secara cepat pada lingkungan umumnya dan selanjutnya memproteksi aluminium dari korosi.



Gambar 2.10 Skema lapisan pasif oksida yang terbentuk pada aluminium.^[15]

Komposisi, struktur, dan ketebalan dari lapisan film oksida tergantung dari elektrolit yang mana menyebabkan pertumbuhan film. Pada air suling setelah dicelup selama 20 hari, ketebalan film mencapai $55 \times 10^3 \text{ \AA}$.^[16]

Kondisi untuk termodinamika secara stabil dari film oksida dapat dilihat pada diagram *pourbaix* (potensial vs pH) pada Gambar 2.11 seperti yang dapat dilihat dari diagram tersebut, aluminium berada dalam kondisi pasif (dilindungi oleh lapisan oksida) di pH berkisar antara 4 – 8,5. Batas dari rentang tersebut bagaimanapun berubah dengan meningkatnya temperatur, dengan pembentukan lapisan oksida yang lebih spesifik dan dengan adanya zat yang dapat membentuk pecahnya lapisan tersebut.



Gambar 2.11 Diagram *pourbaix* aluminium yang memperlihatkan kondisi korosi, imun, dan pasif dari aluminium pada temperature 25°C. Asumsi lapisan pasif yang melindungi adalah *bayerite*, $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$.^[15]

2.6.2 Pengaruh Ion Cl Pada Aluminium alloys

Pengaruh ion klorida pada kerentanan terjadinya korosi *pitting* telah banyak dipelajari pada banyak logam dan paduannya. Pada logam aluminium, ion klorida dapat menyebabkan kerusakan pada lapisan film oksida aluminium. Aluminium klorida (AlCl_3) selalu terbentuk pada larutan dengan adanya *pits*.

Aluminium murni (99,00% atau lebih) memiliki ketahanan yang lebih tinggi dari pada paduan aluminium yang lain. Kerusakan yang cepat dapat terjadi pada larutan yang bersifat asam yang tinggi atau basa yang tinggi. Aluminium yang memiliki kemurnian yang lebih tinggi (99,990% atau lebih murni) memiliki ketahanan terhadap *pitting* karena terkhusus pada lebih besarnya tingkat kemurnian dari logam.^[17]

Paduan aluminium 1xxx, 3xxx, 5xxx, dan 6xxx banyak digunakan untuk aplikasi sebagai struktur, pipa, boat, kapal, memperlihatkan ketahanannya dan umur yang panjang dalam kondisi sebagian dicelup atau dicelup semuanya dalam air laut. Paduan aluminium tipe 2xxx dan 7xxx, dimana mengandung paduan tembaga, ketahanannya rendah sekali pada air laut jika dibandingkan dengan paduan 3xxx, 5xxx, dan 6xxx.

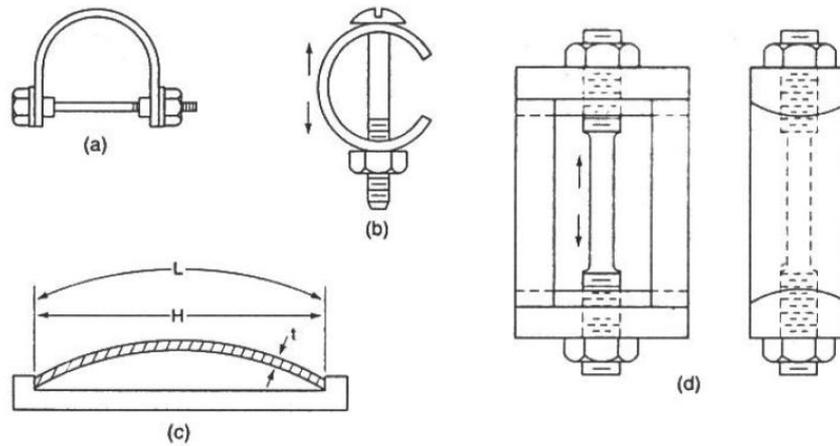
Tipe paduan 5xxx memiliki ketahanan yang paling baik dan banyak digunakan karena kekuatannya dan *weldability* yang baik. Paduan 3xxx juga memiliki ketahanan yang tinggi dan sesuai dimana memiliki kekuatan yang cukup baik. Dengan paduan 3xxx dan 5xxx, lapisan tipis akibat korosi *uniform* dapat diabaikan, dan laju korosi berdasarkan *weight loss* tidak melebihi $5 \mu\text{m/year}$ ($0,2 \text{ mil/year}$). Tipe korosi yang terjadi sebagian besar adalah *pitting* atau *crevice*.

Paduan *aluminum-magnesium-silica* 6xxx kadang memiliki ketahanan yang rendah. Walaupun lapisan tipis tidak terbentuk, namun *weight loss* dapat dua atau tiga kali lebih besar dari pada paduan 5xxx. Korosinya dapat dilihat dengan menggambarkan besar dan banyak *pits* yang terjadi.

2.7 METODE PENGUJIAN RETAK TEGANG

2.7.1 Mekanisme Pengujian Retak Tegang

Pengujian korosi retak tegang mensyaratkan adanya pengaplikasian tegangan tarik maupun tegangan sisa dan pengaplikasian dilingkungan korosif. Metode pengujian korosi retak tegang yang sederhana ada bermacam-macam, antara lain *U-bends*, *Bent-beams*, dan *C-rings*. Untuk pengujian dalam penelitian ini yang digunakan adalah metode *bent beams*.



Gambar 2.12 Metode Pengujian Pembebanan untuk Korosi Retak Tegang; (a) U-Bend (b) C-Rings (c) Bent-Beam (d) Tensile.^[18]

Pengujian dengan metode bent beam ini didasarkan pada ASTM G-39. Pengujian dengan metode *bent beam* merupakan pengujian korosi retak tegang dimana pada pengujian ini sampel yang digunakan berupa *sheet* atau *plate*. Pengujian metode *bent beam* mengaplikasikan tegangan di bawah batas *elastic material* atau paduan. Pengaplikasian tegangan tersebut ada beberapa macam yaitu *two point loaded*, *three point loaded*, *four point loaded*, dan *double beam specimens*.

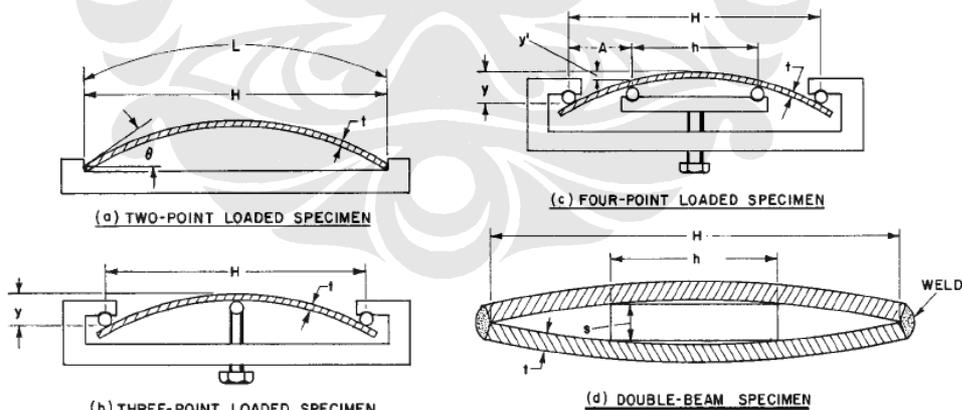


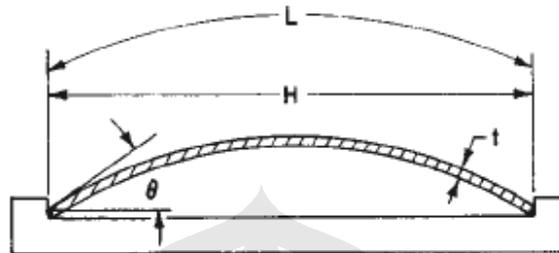
FIG. 1 Schematic Specimen and Holder Configurations

Gambar 2.13 Metode Pengujian dengan *Bent Beam*.^[19]

2.7.2 Pengujian dengan Metode *two – point loaded*

Pada penelitian ini digunakan metode *two – point loaded* dengan specimen sampel berupa plat dimana tidak terdeformasi secara plastis saat dibending dengan

syarat $(L - H)/H = 0,01$. Specimen harus berkisar antara 25 – 254 *mm flat strip* dipotong dengan panjang yang tepat untuk mendapatkan tegangan yang diinginkan saat ditekuk. Sampel dengan panjang L diletakan pada suatu *holder* dengan panjang H dan membentuk sudut θ .



Gambar 2.14 Metode Pengujian dengan *two – Point Loaded*.^[19]

Untuk menghitung tegangan aplikasi dibawah batas elastik maka untuk metode ini maka dilakukan analisa defleksi sebagai berikut :

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

atau

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

Dimana :

L = Panjang specimen

H = Panjang *holder span*

t = Ketebalan specimen

ϵ = Maksimum *tensile strain*

θ = Maksimum kemiringan specimen

z = Parameter integrasi

$$k = \sin \frac{\theta}{2}$$

$$K = \int_0^{\frac{\pi}{2}} (1 - k^2 \sin^2 z)(1 - k^2 \sin^2 z)^{-1/2} dz$$

$$E = \int_0^{\frac{\pi}{2}} (1 - k^2 \sin^2 z)(1 - k^2 \sin^2 z)^{1/2} dz$$

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 untuk memperoleh nilai tegangan maksimum σ . Nilai tegangan σ didapat dari :

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

Dimana E_m merupakan modulus elastisitas material uji.

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/mm^2)
- E = Modulus elastis (kg/mm^2)
- H = *Holder span* (mm)

- t = Ketebalan specimen (*mm*)
- k = 1.280 , konstanta empirik

Dalam perhitungan pengujian, persamaan-persamaan tersebut dipecahkan melalui komputer dan *trial and error* untuk mendapatkan nilai L, H, dan θ sehingga dalam pengujian didapatkan nilai aplikasi tegangan yang tidak melebihi batas elastik. Persamaan 2.5 dapat digunakan jika nilai dari $(H\sigma)/ktE$ kurang dari 1.

Sampel pengujian korosi retak tegang dapat diletakan pada 3 tipe lingkungan yang berbeda yaitu *actual service* (lansung di lapangan), *simulated service* (di laboratorium), dan *accelerated service* (laboratorium). Untuk lingkungan *accelerated service* digunakan untuk memodifikasi lingkungan agar lebih agresif misalnya dengan cara mengubah temperatur, pH, dan konsentrasi yang dapat mempercepat proses korosi retak tegang.

2.8 PERHITUNGAN LAJU KOROSI

Terdapat beberapa macam metode untuk menghitung laju korosi. Diantaranya adalah dengan menggunakan metode *weight loss*. Perhitungan laju korosi dengan menggunakan metode *weight loss* dilakukan dengan menghitung perubahan berat yang terjadi pada material selama material diaplikasikan pada lingkungan yang korosif.

Kecepatan korosi dapat dihitung menggunakan rumus :

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

Dimana:

- K = Konstanta (lihat tabel 2.2)
- W = Berat yang hilang selama percobaan (*gr*)
- D = Densitas material (*gr/cm³*)
- A = Luas permukaan yang terkorosi (*cm²*)
- T = Lamanya waktu ekspos (*jam*)

Nilai K pada perhitungan laju korosi disesuaikan dengan satuan-satuan yang digunakan. Nilai K yang berbeda akan memberikan satuan yang berbeda pada laju korosi yang dihitung.

Tabel 2.2 Hubungan Satuan Laju Korosi sesuai dengan nilai K.^[20]

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 ($\mu\text{g}/\text{m}^2\cdot\text{s}$)	$2.78 \times 10^6 \times D$

Setiap material yang diekspos ke dalam lingkungan korosif akan menghasilkan laju korosi yang berbeda tergantung dari ketahanan korosi material tersebut. Laju korosi material dapat digunakan untuk menentukan dan mengklasifikasikan ketahanan material tersebut pada lingkungan tempat material diaplikasikan (Tabel 2.3).

Tabel 2.3 Perbandingan Ketahanan Korosi Material berdasarkan Laju Korosi.^[21]

Relative Corrosion Resistance ^a	Corrosion Rate Units				
	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+