

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Penelitian Sebelumnya

Golden (1998) melakukan penelitian tentang perambatan retak pada pelat *aluminium alloy* Al 2524-T3 dan Al 2024-T3 pada *fuslage* yang mengalami korosi. Dia menyatakan bahwa Al 2524-T3 memiliki ketahanan *multi site damage* (MSD) daripada Al 2024-T3, kekuatan *fatigue* Al 2524-T3 rata-rata lebih baik sekitar 10% dan umur retak sekitar 30-40% lebih baik dari Al 2024-T3.

Zang (2013) membandingkan umur retak pada sambungan pada badan pesawat dengan *friction stir welding joint* dan *lap joint*. penelitian dilakukan dengan percobaan dan simulasi menggunakan software element hingga ANSYS, hasil dari penelitian adalah sambungan dengan metode *friction stir welding* lebih memiliki ketahanan retak. Pada  $1 \times 10^5$  FSW lebih baik 61% daripada dengan metode *lap joint*.

Anindito (2010) meneliti tentang intensitas tegangan pada ujung retak dengan lubang penghambat retak. Menyimpulkan bahwa konfigurasi lubang dengan variasi diameter (D) jarak lubang dengan ujung retak (H) dan jarak antara lubang (B) masing-masing mempengaruhi nilai intensitas tegangan ujung retak ( $K_1$ ).

Fanni (2013) meneliti perilaku *striation* pada penampang patah pelat *aluminium* disekitar daerah *stop drilled hole*. Dapat disimpulkan bahwa perilaku ukuran jarak antara puncak striasi yang terjadi pada *aluminium* tanpa *stop drilled hole* lebih besar daripada pelat dengan tambahan *stop drilled hole*. *Stop drilled hole* dapat mengurangi intensitas tegangan siklus yang dapat mengurangi cepat rambat retak.

#### 2.2 Aluminium Alloy 2524-T3

*Aluminium* adalah salah satu logam yang banyak digunakan dalam perindustrian terutama dalam industri pesawat terbang, hal ini dikarenakan sifat mekanik dari *aluminium* yang tahan karat, perbandingan kekuatan-berat yang lebih baik dan ketahanan retak daripada logam lain. Guna memenuhi kebutuhan pesawat terbang maka pada tahun 1960 sifat mekanik ditingkatkan dengan berbagai cara misalnya dengan perlakuan panas (*heat treatment*), pelapisan permukaan (*coating*), dan memadukannya dengan logam lain seperti tembaga, silisium, magnesium, mangan, nikel dan sebagainya (*aluminium alloy*).

Pada awal tahun 1960-an temper T73 dan T76 mulai di aplikasikan pada *aluminium alloy* 7075 untuk meningkatkan ketahanan rekat akibat korosi. Pada tahun 1970-an *alloy* 7050-T74 untuk memenuhi kebutuhan material yang tipis namun kuat, tahan terhadap korosi dan retakan akibat korosi, juga pada 1970-an *alloy* 7475 diperkenalkan untuk lebih memiliki ketahanan retak lebih baik daripada *alloy* 7075. Pada tahun 1980 Alcoa menerapkan temper T77 pada *alloy* 7150 dan digunakan pada *fuselage Boeing 777* meningkatkan kekuatan dan retak akibat corosi. Pada tahun 1985-an generasi baru low *density* Al-Li *alloy* 2090, 8090 dan 2091 memiliki kekuatan yang lebih baik dan ringan. 1990an *alloy* 2024-T3 digunakan pada *wing* dan *fuselage* menggantikan *alloy* 7xxx, memiliki toleransi damage lebih baik daripada 7xxx. 2000an *aluminium alloy* 2524-T3 memiliki kemiripan dengan 2024-T3 dengan 30-45% umur retak lebih baik digunakan pada *fuselage* menggantikan 2024-T3. *Aluminium alloy* 2524-T3 memiliki spesifikasi sebagai berikut:

Tabel 2.1 Kandungan dalam *aluminium alloy* 2524-T3

Element	percentage (%)
Silicon	0,06
Iron	0,12
Copper	0,40-0,45
Manganese	0,45-0,7
Magnesium	1,2-1,6
Chromium	0,05
Zinc	0,15
Zironium	0,05
Titanium	0,1
Others	0,05
Balance	<i>Aluminium</i>

Sumber: ASM International Engineering materials, 2002

## 2.3 Tegangan dan Regangan

### 2.3.1 Tegangan.

Tegangan didefinisikan sebagai intensitas gaya yang bekerja yang bekerja setiap satuan panjang benda dan diberi notasi huruf Yunani  $\sigma$  (*Sigma*). Tegangan tidak dapat diukur tetapi dapat di hitung dan dirumuskan sebagai berikut.



$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (2-1)$$

Keterangan:

$\sigma$  = tegangan

P = gaya

A = luas penampang

Tegangan dapat di bagi menjadi 2 berdasarkan jenis gaya yang bekerja terhadap bidang kontak (*cross section*), yaitu tegangan normal yaitu gaya yang bekerja tegak lurus terhadap bidang potong suatu batang dan tegangan geser yaitu gaya yang bekerja sejajar dengan bidang potong suatu batang. Sedangkan tegangan normal dapat dibagi menjadi 2 berdasarkan arah gaya yaitu menjadi tegangan tarik (*tensile stress*) dan tegangan tekan (*compressive stress*) (Gere, 2012:28).

### 2.3.2 Regangan

Regangan didefinisikan sebagai pertambahan panjang persatuan panjang, yang diberi notasi huruf Yunani  $\varepsilon$  (*epsilon*). Regangan tidak memiliki dimensi dan satuan karena merupakan rasio antara dua panjang dan di hitung dengan persamaan.

$$\varepsilon = \frac{\delta}{L} \quad (2-2)$$

Keterangan:

$\varepsilon$  = regangan

$\delta$  = pertambahan panjang

L = panjang awal

Regangan ini bisa disebut regangan normal karena berkaitan juga dengan tegangan normal. Sehingga regangan juga dapat dibagi menjadi regangan tarik yang diakibatkan karena adanya tegangan tarik dan regangan tekan yang diakibatkan oleh adanya tegangan tekan (Gere, 2012:30).

### 2.3.3 Hubungan Tegangan dan Regangan (*Hooke's Law*)

Hubungan linier antara tegangan dan regangan untuk suatu batang yang mengalami tarik atau tekan sederhana dinyatakan dengan persamaan.

$$\sigma = E\varepsilon \quad (2-3)$$

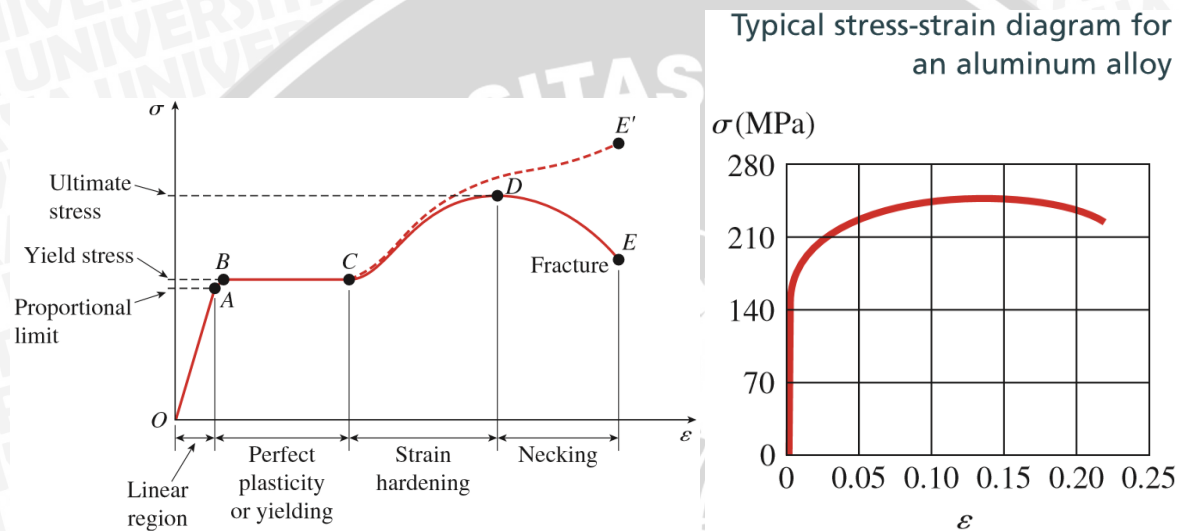
Keterangan:

$\sigma$  = tegangan aksial

$E$  = modulus elastisitas

$\varepsilon$  = regangan aksial

Persamaan diatas bisa dikenal sebagai hukum hooke. Modulus elastisitas adalah perbandingan tegangan reganagan di dalam daerah elastis linier. Modulus elastisitas bisa dikenal sebagai modulus young, karena regangan tidak mempunyai dimensi maka satuan untuk  $E$  sama dengan satuan tegangan (Gere, 2012:52). Hubungan tegangan regangan dapat dilihat pada gambar tegangan regangan dibawah ini.



Gambar 2.1 hubungan tegangan-regangan

Sumber : Gere (2012:42)

Dalam hal ini:

- Titik proposional merupakan titik kesetimbangan antara regangan dan tengangan.
- Titik luluh adalah titik tempat terjadinya penambahan regangan tanpa adanya penambahan tegangan.
- Titik *Yield* merupakan batasan antara daerah elastis dan daerah plastis.
- Titik *Ultimate* adalah titik tempat tertinggi yang dapat dicapai dalam pengujian material.

Didalam diagram tegangan dan regangan tersebut dikenal:

- Daerah elastis yaitu daerah dimana terjadinya deformasi elastis dimana bila gaya yang diberikan dihilangkan maka material uji tersebut akan dapat kembali pada bentuk semula.

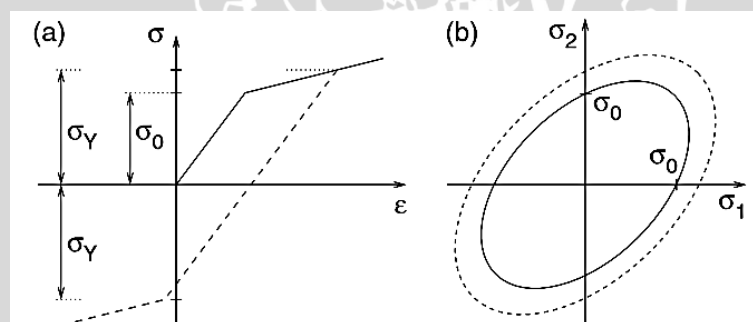
- Daerah plastis yaitu daerah tempat terjadinya deformasi plastis dimana bila gaya yang diberikan dihilangkan maka material uji tidak akan kembali pada keadaan semula.
- Daerah *necking* yaitu daerah dimana material uji mengalami penyusutan luas permukaan di satu bagian.
- Daerah patah dimana material yang di uji mengalami patah.

#### *Aluminium alloy*

- *Aluminium alloy* tidak memiliki titik *yield* yang jelas, namun memiliki garis linier elastis.
- *Yield stress* menggunakan metode *offset* dengan membuat garis kayal sejajar garis linier dengan jarak dari *strain* 0,2% dan titik pertemuan didefinisikan sebagai titik *yield*.

### 2.3.4 Permodelan Material

Untuk menggambarkan pemberian gaya sederhana pada sebuah model memerlukan satu atau dua parameter yang berpengaruh pada *hardening* salah satunya adalah *Isotropic Hardening* (Odqvist 1933) dimana hasil perhitungan mirip dengan kenyatannya.

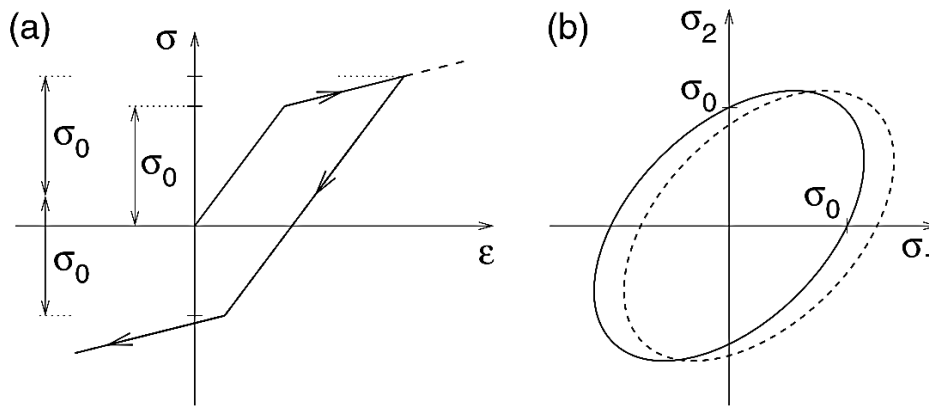


Gambar 2.2 *Isotropic hardening*: a) diagram *uniaxial stress-strain* , b) perubahan *yield* pada *biaxial stress*

Sumber: Milan (2002:318)

Namun untuk pembebanan yang lebih rumit seperti beban siklus membutuhkan *Bauschinger effect* maka dikenalkan permodelan material *kinematic hardening*.



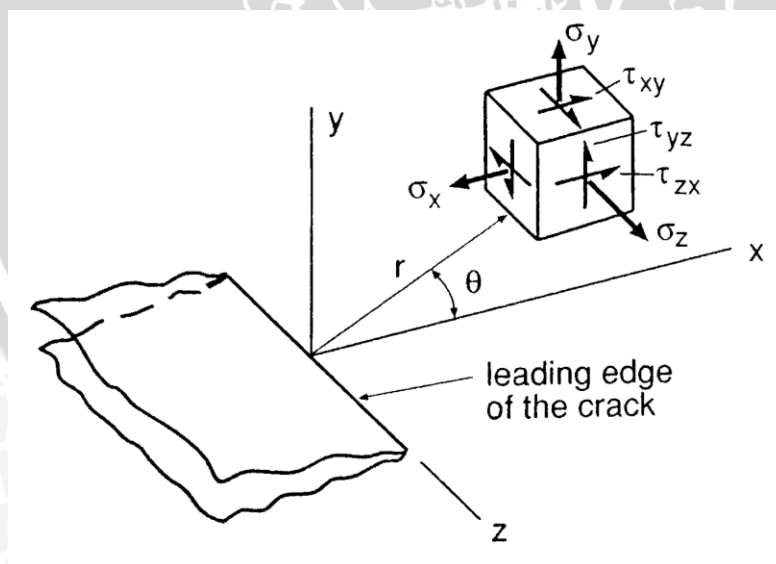


Gambar 2.3 Kinematic hardening: a) diagram *uniaxial stress-strain*, b) perubahan titik *yield* pada *biaxial stress*

Sumber: Milan (2002:324)

#### 2.4 Stress Intensity Factor

Stress koordinat pada pelat dibagi pada sumbu  $x$ ,  $y$  dan  $z$  dapat gambar 2.4 Dapat di definisikan sebagai berikut



Gambar 2.4 Sistem koordinat pada ujung retak

Sumber : Stephens (2001:297)

Sedangkan pada pelat tipis maka sumbu  $z = 0$  karena paralel dengan sudut retak maka tegangan dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\sigma_x = \frac{K_1}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[ 1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] + \dots \quad (2-4)$$

$$\sigma_y = \frac{K_1}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[ 1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] + \dots \quad (2-5)$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_1}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} + \dots \quad (2-6)$$

$$\sigma_z = 0 \quad (2-7)$$

$$\sigma_z = \nu(\sigma_x + \sigma_y) \quad (2-8)$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zx} = 0 \quad (2-9)$$

Sedangkan untuk intensitas tegangan pada ujung retak dapat dirumuskan sebagai berikut

$$K = FS\sqrt{\pi a} \quad (2-10)$$

Sedangkan untuk nilai  $a/b$  kecil

$$K = S_g \sqrt{\pi a} \quad (a/b \leq 0,4) \quad (2-11)$$

$$K = S_g \sqrt{\pi a} \quad (a/b \leq 0,6) \quad (2-12)$$

$$K = S_g \sqrt{\pi a} \quad (a/b \leq 0,13) \quad (2-13)$$

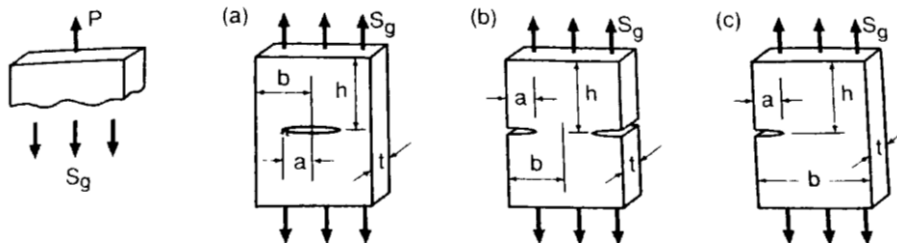
Keterangan :

K = *stress Intensity Factor*

F = faktor bentuk

$S_g$  = *gross section normal stress*

A = perambatanretak



Gambar 2.5 Posisi retak

Sumber : Stephens (2001:301)

Nilai F pada kondisi retak yang berbeda memiliki rumus yang berbeda pula. Nilai F dapat di rumuskan sebagai berikut:

$$\alpha = a/b$$

$$F = \frac{1-0,5\alpha+0,32\alpha^2}{\sqrt{1-\alpha}} \quad (h/b \geq 1,5) \quad (2-14)$$

$$F = (1 + 0,122\cos^4 \frac{\pi\alpha}{2}) \sqrt{\frac{2}{\pi\alpha} \tan \frac{\pi\alpha}{2}} \quad (h/b \geq 2) \quad (2-15)$$

$$F = 0,265(1 - \alpha)^4 + \frac{0,857+0,265\alpha}{(1-\alpha)^{\frac{3}{2}}} \quad (h/b \geq 1) \quad (2-16)$$

## 2.5 Pertumbuhan Retak

Perambatan retak adalah fenomena lokal yang terjadi di ujung *notch*, untuk memprediksi perambatan retak dapat diukur dengan dua cara yaitu dengan menganalisis pada setiap siklus atau dengan setiap beberapa siklus. Menganalisa pada setiap siklus memiliki kelemahan yaitu jumlah siklus yang bisa sampai 1000-1000000 siklus agar retak dapat merambat sehingga memerlukan waktu yang tidak sebentar. Laju perambatan retak dapat dihubungkan dengan fungsi dari faktor intensitas tegangan  $dN=f(\Delta K)$ . Persamaan Paris menunjukkan hubungan tersebut dalam bentuk fungsi exponen.

$$da/dN=C(\Delta K)^m \quad (2-17)$$

Keterangan :

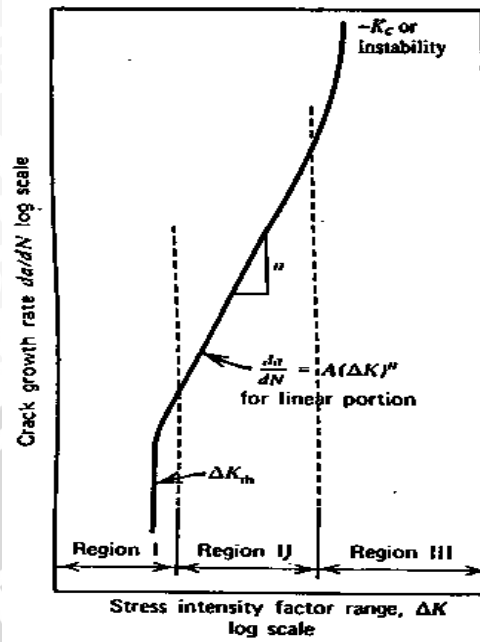
$da/dN$  = laju perambatan retak (mm/siklus)

C dan M = parameter dari material

$\Delta K$  =  $K_{max} - K_{min}$  (MPa/mm)

Pada umumnya pertumbuhan perambatan retak pada rasio tegangan (R) konstan dapat digambarkan sebagai berikut:





Gambar 2.6 *Fatigue crack growth*

Sumber : Stephens (2001:144)

Perambatan retak di bagi menjadi tiga bagian

A. Daerah I

Pada daerah I pertumbuhan retak dipengaruhi oleh nilai intensitas tegangan *threshold* ( $\Delta K_{th}$ ), pada daerah I ini pertumbuhan retak terlalu kecil untuk dapat diukur. Nilai  $\Delta K_{th}$  sekitar 3-6 ksi-in<sup>1/2</sup> pada *aluminium* nilai  $\Delta K_{th}$  dipengaruhi oleh rasio tegangan (R)

B. Daerah II

Pada daerah II ini dapat digambarkan dengan konsep LEFM (*Linear Elastic Fracture Mechanics*), kemiringan kurva antara  $\log(da/dN)$  dengan  $\log(\Delta K)$  dianggap linier. Perambatan retak pada daerah ini dapat dijelaskan dengan persamaan paris.

C. Daerah III

Pada daerah III ini pertumbuhan retak begitu cepat dan intensitas tanganan yang tinggi menyebabkan pertumbuhan retak yang tidak stabil. Pada transisi dari daerah II ke daerah III sangat dipengaruhi oleh kekuatan *yield*, intensitas tanganan dan rasio tegangan. Persamaan yang digunakan untuk menjelaskan perambatan retak pada daerah III adalah.

$$\frac{da}{dN} = \frac{C(\Delta K)^m}{(1-R)K_c} \Delta K \quad (2-18)$$

## 2.6 Beban Siklus

Beban siklis merupakan beban dinamis yang berubah terhadap waktu, beban ini sering terjadi pada permesinan di karenakan getaran mesin dan sering disebut tegangan berulang (*repeated stresses*), tegangan bolak-balik (*alternating stresses*), atau tegangan berfluktuasi (*fluctuating stresses*) (Suresh,1988).

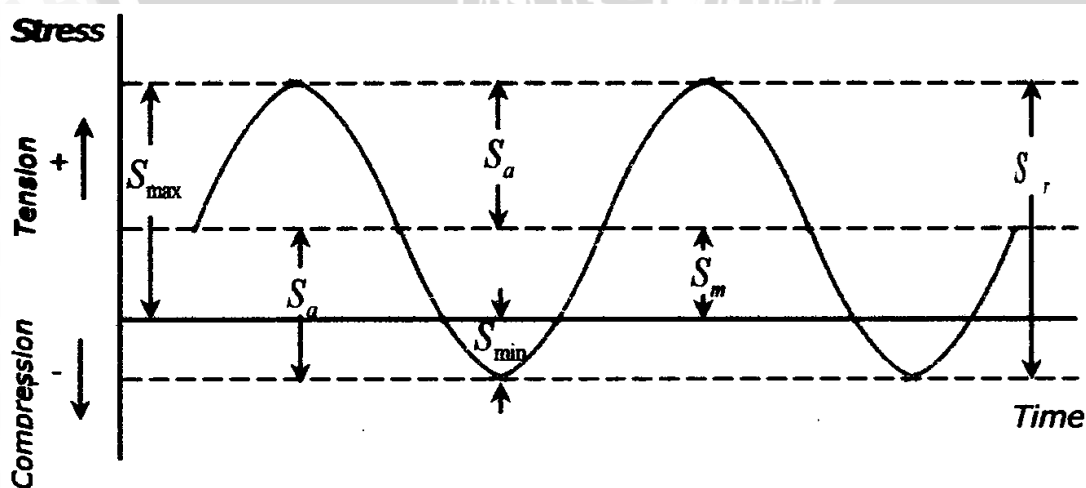
### 2.6.1 Komponen Beban Siklus

Beban siklus memiliki tegangan maksimum dan minimum, tegangan maksimum yang di berikan pada material sebenarnya masih dibawah kekuatan *yield* (Suresh,1988). Namun pembebanan dilakukan berulang dalam jumlah yang banyak sehingga menghasilkan kegagalan pada material. Kegagalan akibat beban siklus ini disebut sebagai *fatigue failure*.

Rasio tegangan maksimum dan minimum yang diberikan mempunyai pengaruh pada laju pertumbuhan retak. Seperti dijelaskan sebelumnya, rasio tegangan didefinisikan sebagai perbandingan antara tegangan minimum dengan tegangan maksimum.

$$R = \frac{S_{min}}{S_{max}} = \frac{K_{min}}{K_{max}} \quad (2-19)$$

Baban maksimum dan minimum yang berfluktuasi ditunjukkan pada Gambar 2.7 Di bawah ini:



Gambar 2.7 Model pembebanan berulang

Sumber : Dieter (1988:124)

Pembagian komponen beban siklus berulang pada Gambar 2.7 adalah sebagai berikut:

1. Tegangan rata-rata ( $S_m$ ), yaitu nilai rata-rata dari tegangan maksimum dan minimum pada siklus

$$S_m = \frac{S_{max} + S_{min}}{2} \quad (2-20)$$

2. Daerah tegangan atau jangkauan tegangan ( $S_r$ ), yaitu perbedaan antara tegangan maksimum dengan minimum pada suatu siklus

$$S_r = S_{max} - S_{min} \quad (2-21)$$

3. Tegangan bolak-balik atau amplitudo tegangan ( $S_a$ ), yaitu setengah dari jangkauan tegangan.

$$S_a = \frac{S_r}{2} = \frac{S_{max} - S_{min}}{2} \quad (2-22)$$

Hubungan antara tegangan dan amplitudo tegangan terhadap kondisi beban adalah sebagai berikut:

*Fully reversed* :  $R = -1$

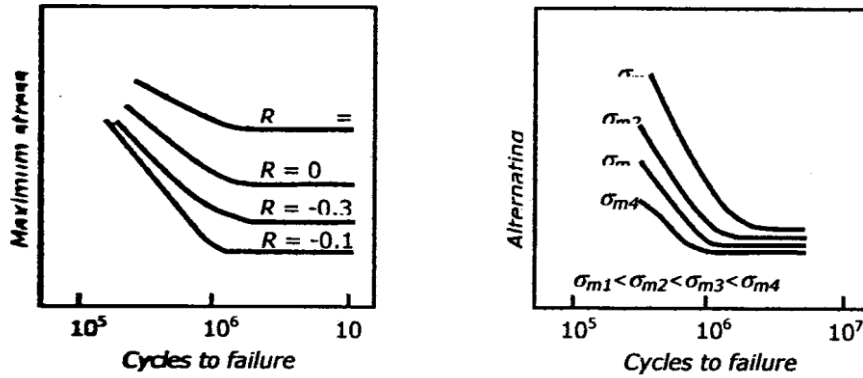
*Zero to max* :  $R = 0$

*Zero to min* :  $R = \infty$

Perbandingan rasio tegangan terhadap umur lelah dapat dilihat pada Gambar 2.6. Pada Gambar 2.6 (a) dapat dilihat hubungan tegangan maksimum  $S_{max}$  terhadap  $\log N$  pada rasio tegangan  $R = S_{max}/S_{min}$  konstan. Ketika nilai  $R$  menjadi semakin positif dimana sebanding dengan pembebanan tegangan rata-rata, maka batas umur *fatigue* menjadi lebih besar. (Dietsr, 1988)

Rasio tegangan ( $R$ ) memiliki pengaruh yang sangat besar pada laju pertumbuhan retak. Rasio tegangan didefinisikan sebagai perbandingan antara tegangan minimum dengan tegangan maksimum. (Bannantine 1990) menjelaskan bahwa untuk nilai  $\Delta K$  yang konstan dan nilai rasio ( $R$ ), maka laju pertumbuhan retak juga semakin besar.



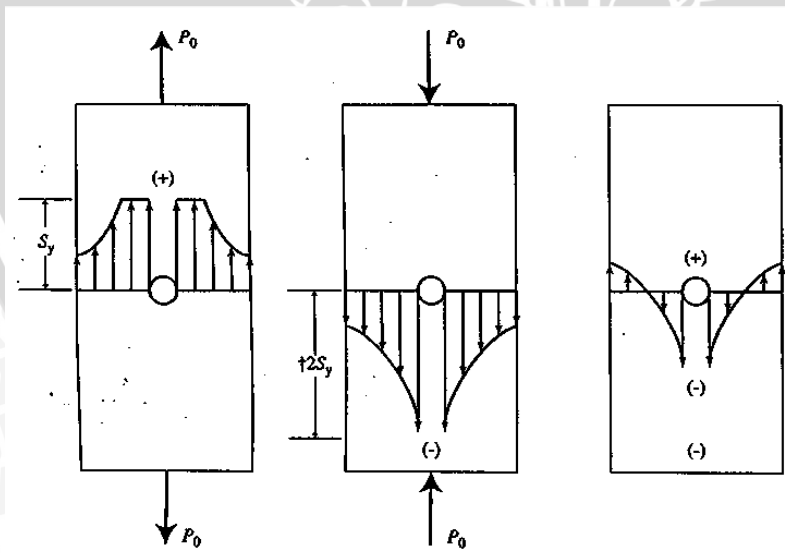


Gambar 2.8 Variasi tegangan terhadap umur *fatigue*

Sumber : Dieter (1988:126)

## 2.7 Tegangan Sisa

Tegangan sisa (*residual stresses*) dapat di sebut juga sebagai *self-equilibrating stresses* karena material atau benda tidak memiliki kesetimbangan tegangan tanpa diberikan gaya dari luar. Disebut tegangan sisa karena gaya berasal dari perlakuan sebelumnya. Tegangan sisa sering terjadi pada proses manufaktur, tegangan sisa dapat menguntungkan atau merugikan terutama pada beban siklus. (Stephens,2001:248)

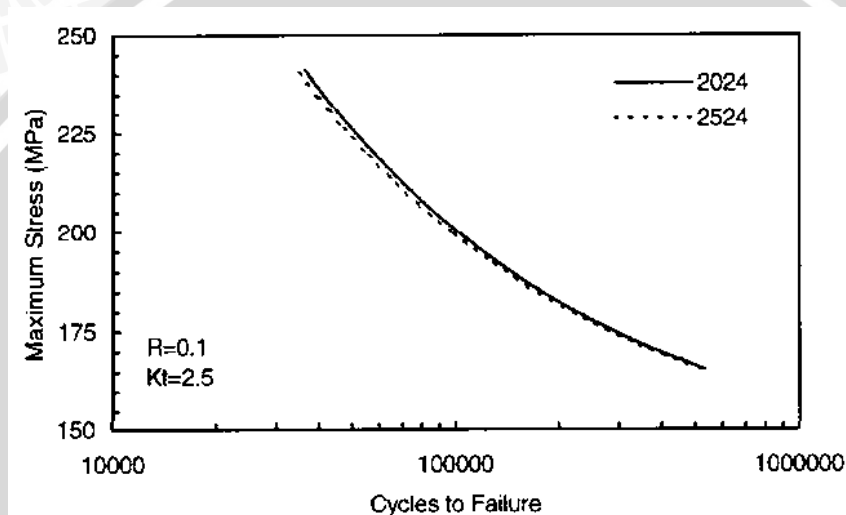


Gambar 2.9 Tegangan sisa

Sumber : Stephens (2001:248)

## 2.8 S-N Diagram

S-N diagram adalah grafik yang dihasilkan dari pengujian kegagalan retak dalam kondisi tes standar sebagai acuan dalam menyimulasikan umur kegagalan retak, dimana S adalah *stress* yang di terima ujung retak dan N adalah jumlah dari siklus atau umur hingga mencapai kegagalan, dimana kegagalan dapat di definisikan sebagai retakkan (Stephens, 2001). Grafik S-N diagram dapat digambarkan dalam bentuk semi-log atau log-log seperti ditunjukkan pada Gambar 2.8

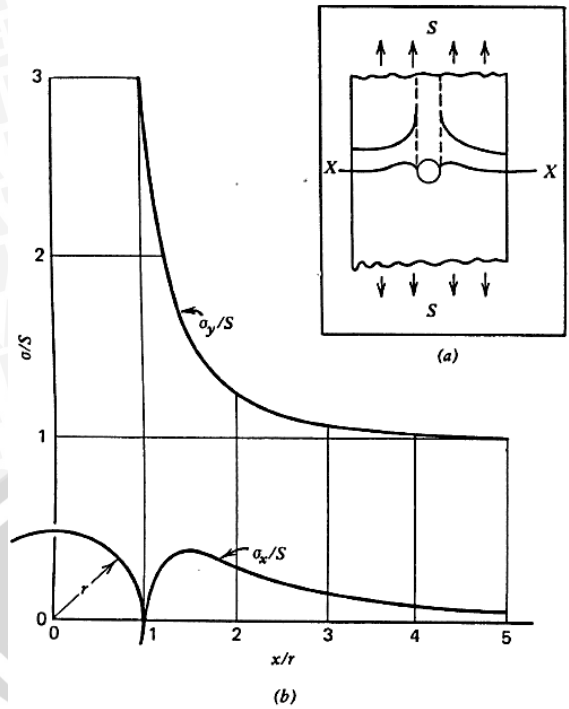


Gambar 2.10 S-N diagram Al-2024 dan Al-2524

Sumber: Golden (1998:6)

## 2.9 Notch

*Notch* tidak bisa di banyak struktur dan permesinan, contoh nyatanya lubang baut yang di gunakan untuk sambungan, *keyway* pada pasak dan masih banyak lagi, meskipun *notch* berbahaya dengan perlakuan kusus justru dapat menguntungkan.



Gambar 2.11 Distribusi tegangan disekitar *notch*

Sumber: Stephens (2001:188)

$$\frac{\sigma_y}{S} = 1 + 0.5 \left(\frac{r}{x}\right)^2 + 1.5 \left(\frac{r}{x}\right)^4 \quad (2-23)$$

$$\frac{\sigma_x}{S} = 1.5 \left(\frac{r}{x}\right)^2 - 1.5 \left(\frac{r}{x}\right)^4 \quad (2-24)$$

Di ujung notch  $r = x$  maka  $\sigma_x = 0$

Keterangan:

$S$  = Stress

$\sigma_y$  = tegangan arah sumbu y

$\sigma_x$  = tegangan arah sumbu x

$r$  = jari-jari *notch*

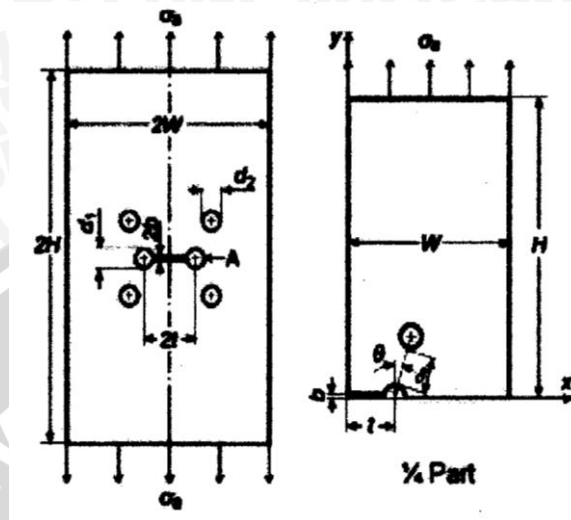
$x$  = jarak dari pusat *notch*

## 2.10 Stop Drilled Hole

*Stop drilled hole* merupakan teknik pengeboran lobang berbentuk lingkaran kecil disekitar ujung retak, *stop drilled hole* merupakan salah satu teknik untuk mengurangi intensitas tegangan di ujung retak dan dapat menghambat pertumbuhan retak. Jumlah *life extension* yang dihasilkan oleh *stop drilled hole* sangat bergantung pada konsentrasi



tegangan yang terkait dengan *stop drilled hole*. Semakin besar *hole* yang digunakan maka semakin efektif teknik *stop drilled hole* tersebut untuk menghambat retak.



Gambar 2.12 *Stop drilled hole*

Sumber: Dyskin (2002:8)

## 2.11 Metode Elemen Hingga

Metode elemen hingga merupakan suatu prosedur numerik dengan konsep dasar membagi (diskritisasi) suatu kontinum menjadi beberapa elemen-elemen yang lebih kecil, dapat di hitung dan memiliki bentuk geometri yang lebih sederhana. Analisa dengan metode elemen hingga dilakukan agar mendapatkan nilai-nilai pendekatan (bukan eksak) berdasarkan dari pada asumsi perpindahan, asumsi tegangan asumsi suhu atau gabungan dari dua kombinasi, tiga kombinasi atau basih banyak lagi.

### 1. Diskritisasi dan pemilihan elemen

Diskretisasi ialah suatu proses membagi suatu struktur, bentuk, model atau geometri menjadi elemen yang lebih kecil yang memiliki jumlah dan memiliki geometri yang lebih kecil. Elemen-elemen tersebut berhubungan pada titik-titik yang disebut node membentuk suatu rangkaian atau bentuk yang secara keseluruhan mendekati bentuk struktur benda yang sebenarnya. Jadi bentuk geometri struktur yang sangat kompleks menjadi sederhana dalam menganalisa.

Pemilihan jenis elemen tergantung pada karakteristik rangkaian kesatuan dan idealisasi yang dipilih. Idealisasi struktur dua dimensi dapat menggunakan elemen segitiga,

segiempat maupun kuadrilateral, sedangkan pada struktur tiga dimensi dapat menggunakan elemen *hexsahedron*.

Tabel 2.2 Model Elemen

	model element	penjelasan
Element garis	<p>linear</p> <p>non-linear</p>	<p>Element garis dapat digunakan pada spesiment pipih dan panjang seperti beam. Perhitungan yang mudah dan cepat namun tidak dapat digunakan pada bentuk yang lebih</p>
Element 2D	<p>Triangles</p> <p>Triangles non-linear</p> <p>Quadrilaterals</p> <p>Quadrilaterals non-linear</p>	<p>Elemen 2D cocok untuk pemodelan ber dinding tipis hingga sedang, element 2D memberikan hasil yang cukup akurat pada bending dan memberikan hasil deformasi yang baik selain itu juga dapat digunakan untuk medan magnet dan perpindahan panas.</p>
Element 3D	<p>4-Node Tetrahedra</p> <p>10-Node Tetrahedra</p> <p>6-Node Wedges</p> <p>15-Node Wedge</p> <p>8-Node Brick (Hexahedral)</p> <p>20-Node Brick</p>	<p>Element 3D ditujukan untuk pemodelan berstruktur tebal dimana semakin bertambahnya ketebalan maka stress meningkat secara drastis, namun element ini terlalu kaku untuk struktur tipis, Displacements yang dihasilkan tidak akurat yang diakibatkan element yang kaku, metode Enhanced Strain Formulation memberikan memperbaiki kekurangan ini namun hasil yang diperoleh tidak cukup baik pada 3D-linear. pada elemen 3D quadratic (20-Node Brick SOLID186) memberikan hasil yang akurat, namun, ini datang dengan proses komputasi meningkat. element 3D juga dapat digunakan untuk struktur, magnetik, transfer panas, elektrik dan</p>

Sumber: ANSYS Workbench Help

2. Memilih fungsi pendekatan

Variasi-variasi pada perpindahan suatu elemen dapat didekati dengan fungsi interpolasi yang berdasarkan pada harga-harga titik simpul node yang mengitarinya. Fungsi yang sangat umum digunakan adalah dengan polinomial, pendekatan dengan fungsi ini disebabkan karena sulitnya mencari jawaban tertutup, sehingga dipilihlah suatu bentuk jawaban, fungsi yang harus memiliki hukum, syarat batas, prinsip dan merupakan besaran yang tidak di ketahui yaitu dengan distribusi teganga menjadi sifat persoalan.

3. Menurunkan persamaan matrik kekakuan

Dalam prinsip usaha virtual menghasilkan sebuah persamaan-persamaan matrik kekakuan elemen, yang dapat dinyatakan sebagai berikut:



$$[k] = \int [B]^T [C] [B] dV \quad (2-25)$$

Dengan:

$[k]$  = matrik kekakuan elemen

$[B]$  = matrik konstitutive hubungan regangan-perpindahan

$[C]$  = matrik konstitutive hubungan tegangan-regangan

$V$  = volume

#### 4. Menghitung beban total

Beban yang bekerja dapat didefinisikan menjadi 3(tiga) macam, sehingga beban total adalah:

$$F = Q_{NF} + Q_{BF} + Q_T \quad (2-26)$$

Dengan:

$Q_{NF}$  = beban pada konsentrasi node

$Q_{BF}$  = beban akibat beban sendiri (*body force*)

$Q_T$  = beban traksi (*surface traction*)

#### 5. Merakit elemen menjadi struktur

Merakit persamaan elemen dibawa dalam bentuk persamaan global. Proses harus mempunyai sifat-sifat konvergen dan sifat kesetimbangan, yaitu titik-titik node yang semula berada bersebelahan harus tetap berada bersebelahan setelah elemen-elemen tersebut dikenai beban. Bentuk persamaan element global yaitu:

$$[K]\{q\} = \{R\} \quad (2-27)$$

Dengan:

$[K]$  = matrik sifat/kekakuan elemen

$\{q\}$  = vektor perpindahan node

$\{R\}$  = matrik beban total

Setelah diperoleh matrik kekakuan global, dan dimasukkan syarat-syarat batasnya maka dapat di cari perpindahan simpul ( $q$ ). Syarat batas dapat memberikan informasi-



informasi bagaimana struktur di topang, dengan cara memasukkan nilai-nilai perpindahan yang telah di tetapkan sesuai kondisi pada sebuah struktur.

#### 6. Mendapatkan perpindahan global

Persamaan global yang telah mendapatkan syarat-syarat batas merupakan sebuah sekumpulan persamaan linier yang dapat di selesaikan dengan cara menggunakan eliminasi Gauss untuk mendapatkan besaran-besaran primer, yaitu  $q_1, q_2, q_3, \dots, q_n$ .

$$\begin{aligned} k_{1,1} q_1 + k_{1,2} q_2 + \dots + k_{1,n} q_n &= R_1 \\ k_{2,1} q_1 + k_{2,2} q_2 + \dots + k_{2,n} q_n &= R_2 \\ \dots & \\ k_{n,1} q_1 + k_{n,2} q_2 + \dots + k_{n,n} q_n &= R_n \end{aligned} \quad (2-28)$$

Persamaan diatas akan diselesaikan dengan cara eliminasi Gauss untuk mendapatkan besaran-besaran rimer yaitu  $q_1, q_2, q_3, \dots, q_n$ .

#### 7. Besaran sekunder dan interpretasi hasil

Untuk besaran pertamanya yang berupa perpindahan maka dapat di temukan besaran sekunder yang berupa tegangan maupun regangan, menggunakan hubungan antar keduanya. Hubungan tegangan dan regangan pada kondisi 3(tiga) Dimensi maka dapat dinyatakan dalam sebuah bentuk matrik sebagai berikut ini :

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} \quad (2-29)$$

Hubungan tegangan-regangan:

$$\{\sigma\} = [C] \{\epsilon\} \quad (2-30)$$

Hubungan regangan-perpindahan:

$$\{\epsilon\} = [B] \{d\} \quad (2-31)$$

Maka tegangan dapat dirumuskan sebagai ini:

$$\{\sigma\} = [C] [B] \{d\} \quad (2-32)$$

Hasil akhir dari perhitungan menggunakan metode elemen hingga ini adalah distribusi tegangan yang akan di tunjukan pada sepanjang struktur untuk dapat dianalisa sesuai dengan rumusan masalah.

### 2.11.1 Software ANSYS Workbench 16.0

Software ANSYS Workbench 16.0 ini berbasis pada metode element hingga memiliki kelebihan yaitu kemampuan untuk dapat mendiskritisasi model-model dengan sangat halus sehingga mampu bekerja dengan element yang lebih banyak dan dapat menghasilkan hasil *output* dengan ketelitian yang sangat tinggi. ANSYS dapat juga digunakan untuk menganalisis hal lain diantaranya: struktural, fluida termal, dan magnetis.

Pada umum langkah-langkah analisa ANSYS Workbench 16. dibagi menjadi tiga, diantaranya:

#### 1. *Preprocessing* atau awal proses

Tahap-tahap penelitian pada *preprocessing* adalah:

- Permodelan geometri: dapat dilakukan proses modeling geometri baik 1D,2D maupun 3D.
- Pemilihan tipe elemen: digunakan untuk mendiskritisasikan model
- *Material properties*: input data material yang digunakan
- *Meshing*: pembagian struktur menjadi element-element kecil/element diskrit.

#### 2. *Solution* atau proses solusi

Tahap-tahap penting pada *solution* ini antaranya:

- Mendefinisikan analisa solusi yang akan dipakai (*analysis type*)
- Memasukkan kondisi batasan (*constrain*)
- Menerapkan pembebanan dan *boundry*.
- Penyelesaian atau solusi

#### 3. *General postprocessing* atau pembacaan hasil

- *Plot result*

Dengan menggunakan *contour plot* maka akan tampak hasil distribusi tegangan atau hasil variabel lain yang di pilih pada model sehingga dapat dengan mudah dalam menginterpretasikan dan membahas informasi yang disajikan. Di sini hasil digambarkan dengan sebaran warna atau kontur yang menunjukkan besar *fatigue life*

- Hasil analisis yang diperoleh juga ditampilkan dalam bentuk simulasi (animasi)