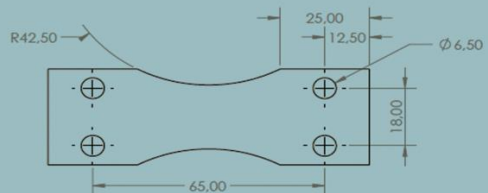
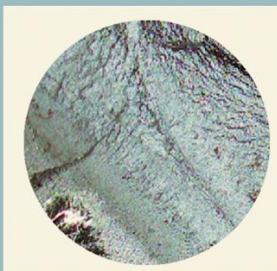
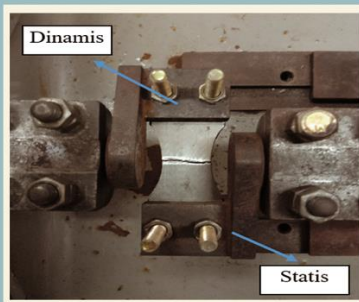
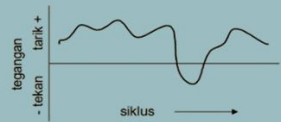
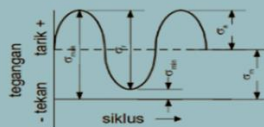
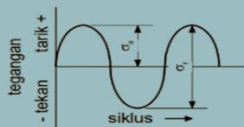


MEKANIKA RETAK KONDISI LINEAR ELASTIS



Dr. Ir. Hendri Chandra, M.T.

Dosen tetap pada kelompok bidang keahlian Konstruksi Mesin
Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya.

MEKANIKA RETAK KONDISI LINEAR ELASTIS

Dr. Ir. Hendri Chandra, M.T.

Dosen tetap pada kelompok bidang keahlian Konstruksi Mesin

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya.

KATA PENGANTAR

Buku referensi Mekanika Retakan ini disusun dengan pertimbangan untuk meningkatkan kualitas proses pembelajaran dalam mata kuliah mekanika retakan (*fracture mechanics*) di perguruan tinggi pada Fakultas Teknik Jurusan mesin di Indonesia. Mekanika retakan merupakan mata kuliah keahlian dan sebagai mata kuliah pilihan di Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya Palembang. Mata kuliah ini lebih dalam dipelajari pada Teknik Penerbangan dimanapun berada.

Namun demikian tidak menutup kesempatan kepada disiplin ilmu lain seperti Teknik Sipil, Teknik Metalurgi, Teknologi pertanian di dalam rancang bangun konstruksi, komponen mesin, dan alat-alat mesin pertanian.

Buku teks maupun buku referensi di bidang mekanika retakan yang dalam bahasa Indonesia masih dirasakan sangat kurang dalam membantu mahasiswa memahami ilmu mekanika retakan. Buku teks maupun buku referensi yang berbahasa Inggris cukup banyak dipasaran namun untuk memahaminya lebih sulit bagi mahasiswa dan pemula. Hal

ini dikarenakan dasar dari ilmu mekanika retakan baru mereka kenal pada jenjang strata satu.

Semoga buku referensi ini menjadi sebagai referensi bagi peneliti dan mahasiswa dalam proses pembelajaran penelitian pada mata bidang Mekanika Retakan.

Palembang, 4 Maret 2023

Hendri Chandra

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR GAMBAR	v
DAFTAR TABEL	vii
NOMENKLATUR	ix
BAB I. PENDAHULUAN	1
BAB II. KONSEP DASAR.....	5
II.1. Material Kontinyu, Homogen, dan Isotropi	5
II.2. <i>Notch</i> dan Retak	7
BAB III. TEGANGAN PADA <i>NOTCH</i> DAN RETAK	11
III.1. Stress Konsentrasi Tegangan	11
III.2. Medan Tegangan Pada Ujung Retak	12
BAB IV. MODUS RETAK	17
IV.1. Mekanisme Retak	20
IV.1.1. Tahap pengintian retak (<i>crack initiation</i>)	21
IV.1.2. Tahap pertumbuhan retak (<i>crack propagation</i>) ...	21
IV.1.3. Tahap patah akhir	22
BAB V. FATIGUE LIFE PREDICTION	25
V.1 Kurva Tegangan – Siklus (S – N)	28
V.2 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi <i>Fatigue Life</i>	30

V.2.1 Stress Concentration	30
V.2.2 Dimensi (Size)	31
V.2.3. Efek Permukaan	32
V.2.4. Tegangan Rata - Rata (Mean Stress)	34
V.3. Faktor Metalurgi yang Mempengaruhi Ketahanan Fatigue	35
V.3.1 Ukuran butir	35
V.3.2 Orientasi	36
V.4. Perambatan Retak (Crack Propagation)	37
V.5. Ciri Patah Lelah	41
V.6. Crack Propagation Approach in Life Prediction	44
V.7 Stress Intensity Factor	44
V.8 Fracture Toughness	47
V.9 Fatigue Crack Growth	49
V.10 Contoh Perhitungan Stress Intensitas Faktor	52
DAFTAR PUSTAKA	57
GLOSARIUM	61
INDEKS	65

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. (a). Diskontinyu, (b). Heterogen, (c). Unisotropi	6
Gambar 2. Konsentrasi tegangan pada lubang dengan variasi radius	7
Gambar 3. Deskripsi tegangan pada ujung retak	9
Gambar 4. (a). Tegangan nominal, (b). Tegangan dengan lubang	11
Gambar 5. Medan tegangan di ujung retak	12
Gambar 6. Modus retak I, II dan III	18
Gambar 7. Tahapan retak pada suatu material	23
Gambar 8. Sketsa permukaan patah.....	24
Gambar 9. Tiga tipe umum siklus pembeban pada fatigue	26
Gambar 10. (a). Ekstrusi dan intrusi dalam bidang slip.....	27
Gambar 11. Kurva S-N untuk paduan fero dan nonfero	30
Gambar 12. efek radius notch pada notch sensitivitas	32
Gambar 13. Distribusi tegangan sisa	35
Gambar 14. Efek tegangan rata-rata terhadap R.....	36
Gambar 15. Panjang retak versus siklus	39
Gambar 16. (a). Orientasi bahan, (b). Laju pertumbuhan retak.....	41
Gambar 17. Permukaan patah fatigue dengan multiorigin.....	43
Gambar18. Awal retak pada selinder dinding tebal.....	43

Gambar 19. Permukaan patah fatigue terhadap beban	44
Gambar 20. Komponen tegangan mode I	46
Gambar 21. Stress intensity factor untuk kondisi tarikan.....	48
Gambar 22. Skematik laju pertumbuhan retak.....	50
Gambar 23. Beban fatigue yang menyebabkan pertumbuhan retak.....	51
Gambar 24. Kurva sigmoidal da/dN - ΔK	52

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Hubungan kehalusan permukaan terhadap ketahanan <i>fatigue</i> ...	32
Tabel 2. Integrasi Numerik.....	54

NOMENKLATUR

da/dN	: Laju pertumbuhan retak
K	: Stress intensitas factor
ΔK	: $K_{maks} - K_{min}$
R	: <i>Stress ratio</i>
N	: Siklus
a	: Panjang retak
a_c	: Retak kritis
$f(y)$: Fungsi bentuk
σ_f	: <i>Fatigue life</i>
σ_a	: Tegangan amplitudo
σ_m	: Tegangan rata-rata
K_I	: Stress intensitas factor modus I
K_{II}	: Stress intensitas factor modus II
K_{III}	: Stress intensitas factor modus III
K_c	: <i>Toughness value</i>
A	: Konstanta
p	: Koefisien paris

BAB I

PENDAHULUAN

Mekanika patah atau sering juga disebut mekanika retak adalah salah satu cabang dari mekanika padat yang mempelajari ilmu mekanika yang diaplikasikan kepada komponen yang memiliki retak (diskontinuitas). Berbeda dengan ilmu mekanika lain seperti mekanika kekuatan bahan, statika dan lain-lain yang tidak memperdulikan adanya retak atau diskontinuitas bahan. Diskontinuitas dalam hal ini adalah cacat pada material suatu komponen mesin atau suatu konstruksi, sehingga akan sangat membahayakan konstruksi tersebut. Cacat dapat berupa cacat mikro yang tidak dapat dilihat dengan kasat mata seperti cacat atom, cacat garis dan cacat bidang ataupun cacat makro yang tampak dengan mata seperti cacat volume sebagai contoh adanya notch, lubang, dan retak. Konstruksi atau komponen yang terdapat cacat atau diskontinuitas dapat berdampak retak dan pada akhirnya patah. Bilamana konstruksi atau komponen mesin sudah mengalami patah atau gagal maka konstruksi tersebut akan terganggu operasinya dan bahkan bisa berhenti operasi, dan patah terjadi pada sebuah pabrik atau industri, maka

sudah dipastikan industri tersebut akan mengalami kerugian. Lebih ironis lagi tidak jarang akibatnya menelan korban jiwa seperti meledaknya bejana tekan, patahnya jembatan, jatuhnya pesawat terbang dan lain-lain.

Sejarah munculnya disiplin ilmu mekanika retakan telah dimulai pada abad 18, yaitu berkisar pada tahun antara 1830 hingga 1880-an yang sering sekali dimulai dengan kecelakaan transportasi baik darat, laut dan bahkan udara yang kesemuanya memakan korban jiwa yang tidak sedikit.

Cabang mekanika patah sangat dekat dengan cabang ilmu analisis kegagalan/kerusakan. Seseorang memahami analisis kerusakan biasanya memiliki dasar ilmu mekanika patah. Dengan kata lain mekanika patah adalah salah satu metode dalam menganalisis suatu kerusakan. Salah satu kegagalan atau kerusakan material mesin atau konstruksi adalah diakibatkan oleh kelelahan material/bahan yang disebut dengan fatigue. Kerusakan akibat fatigue memegang porsi yang paling besar dari semua kerusakan. Hal ini dikarenakan fatigue terjadi pada kondisi elastis sebelum kekuatan luluh bahan (σ_y). Oleh karena itu fatigue merupakan kasus dalam mekanika retakan yang terjadi pada kondisi linear yang sering disebut dengan istilah LEFM (*Linear Elastic Fracture*

Mechanics) yang sangat berbahaya dari semua kerusakan. Bahasan pada buku ini dipelajari terlebih dahulu mengenai LEFM sebagai pegangan untuk memahami lebih jauh persoalan *Elastic plastic fracture mechanics* (EPFM) dan pada kasus dinamik.

Buku ini merupakan buku referensi yang membahas mengenai Mekanika retak untuk kondisi elastis linear. InsyaAllah diedisi berikutnya akan dicoba membahas mengenai mekanika retak untuk kondisi elastis-plastis dan kondisi dinamik.

BAB II

KONSEP DASAR

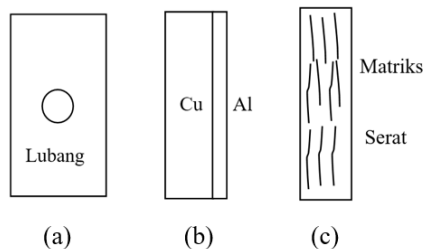
II.1. Material Kontinyu, Homogen, dan Isotropi

Pada tinjauan dari sudut pandang mekanika patah bahwa falsafah dari suatu material dikatakan tidak mungkin menghindari material yang sempurna atau tanpa cacat (diskontinyu). Namun bisa dikurangi atau dikendalikan.

Jika dibandingkan dengan mekanika kekuatan bahan atau statika bahwa material selalu diasumsi dalam keadaan kontinyu, homogen, dan isotropi. Material yang bersifat kontinyu dikatakan sebagai material yang bebas cacat. Material homogen adalah material yang satu jenis dan sama komposisinya dan tidak bermacam ragam. Demikian juga material isotropi adalah material yang sifat kesegala arahnya termasuk kekuatannya sama. Oleh karena itu ketiga sifat di atas hanya sekedar asumsi karena tidak ada material yang sempurna. Asumsi ini bisa digunakan untuk perhitungan pada mekanika kekuatan bahan atau statika. Padahal dalam

kehidupan sehari-hari banyak material yang diskontinyu, heterogen dan non isotropi. Oleh karena itu pemecahan masalah pada kondisi yang tidak kontinyu atau heterogen serta non isotropi sebaiknya dipecahkan dengan ilmu mekanika retakan. Solusi mekanika retakan dapat dilakukan secara analitis, numerik dan dapat juga secara eksperimen di laboratorium. Pemecahan dengan cara numerik biasanya didekati dengan metode elemen hingga.

Untuk komponen mesin ataupun konstruksi yang membutuhkan tingkat kewaspadaan yang tinggi terhadap bahaya dari kegagalan atau kerusakan maka konstruksi tersebut tidak boleh diasumsi tanpa cacat, homogen atau isotropi. Konstruksi seperti struktur pesawat terbang, reaktor nuklir, bejana yang bertekanan tinggi. Beberapa contoh material yang diskontinyu, material heterogen, dan material unisotropi ditunjukkan pada Gambar 1.

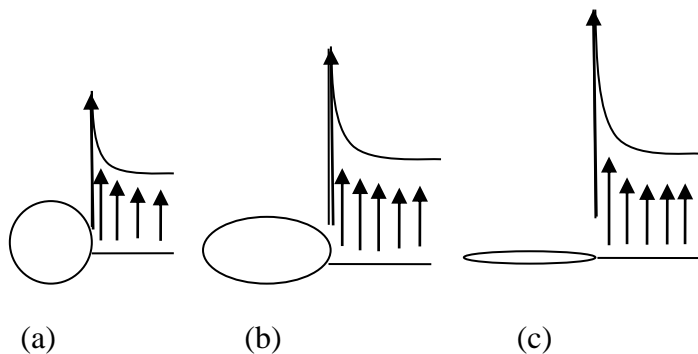


Gambar 1. (a). Diskontinyu, (b). Heterogen, (c). Unisotropi

II.2. *Notch* dan Retak

Dalam analisis mekanika retakan, komponen selalu diasumsi ada retak dengan dimensi dan panjang tertentu. Notch dan retak merupakan diskontinuitas bahan/material. Namun keduanya memiliki perbedaan yang sangat ekstrim. Konstruksi yang memiliki notch ataupun retak dapat mengurangi kekuatan bahan. Namun retak lebih berbahaya dari notch dikarenakan tegangan yang terjadi pada ujung retak besarnya tak terhingga.

Kondisi tegangan pada ujung notch dapat ditunjukkan pada Gambar 2.

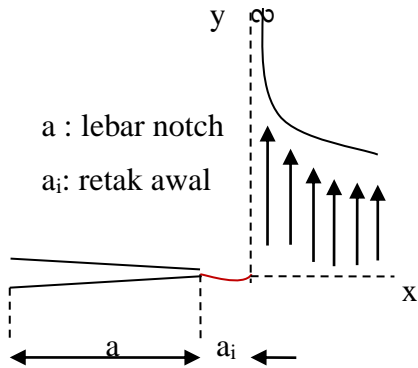


Gambar 2. Konsentrasi tegangan pada lubang dengan variasi radius

Pada Gambar 2 di atas menunjukkan bahwa semakin kecil radius notch (ρ) maka akan semakin tinggi tegangan yang

terjadi pada ujung notch. Pada Gambar 2.(b) tegangan pada ujung notch lebih besar pada (a). Demikian juga pada Gambar 2 (c) menunjukkan tegangan pada ujung notch lebih besar daripada 2 (a) dan (b).

Retak (*crack*) pada suatu komponen atau konstruksi terjadi dengan sendirinya oleh karena adanya beban eksternal yang terus menerus atau secara berulang. Sedangkan notch, lubang atau diskontnyuitas lain dapat dibuat dengan bantuan alat perkakas. Retak biasa disimulasi dengan menggunakan mesin uji lelah dengan beban bolak balik dengan frekuensi yang rendah, sehingga pada suatu siklus tertentu retak awal akan tumbuh dan dimulai pada ujung retak. Hal ini dikarenakan seperti diterangkan pada Gambar 2 di atas bahwa tegangan pada ujung retak besarnya tek berhingga dikarenakan radius dari retak mendekati nol. Deskripsi ini dapat ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Deskripsi tegangan pada ujung retak

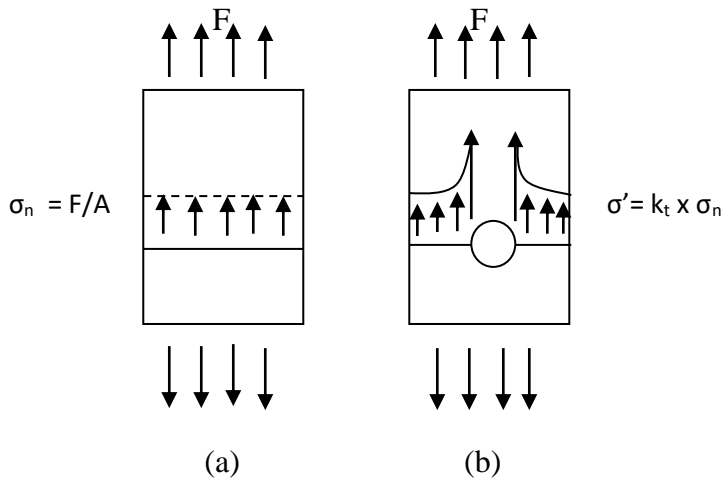
Pada Gambar 3 menunjukkan besarnya konsentrasi tegangan pada ujung retak menjadi tak berhingga besarnya. Oleh karena itu besarnya faktor konsentrasi tegangan menjadi tak terdefinisi. Oleh karena itu kondisi ini perlu dikaji dengan parameter retak dan bukan lagi faktor konsentrasi tegangan.

BAB III

TEGANGAN PADA *NOTCH* DAN RETAK

III.1. Stress Konsentrasi Tegangan

Sebelum mempelajari mengenai parameter retak yang disebut dengan faktor intensitas tegangan, terlebih dahulu dipelajari faktor konsentrasi tegangan.

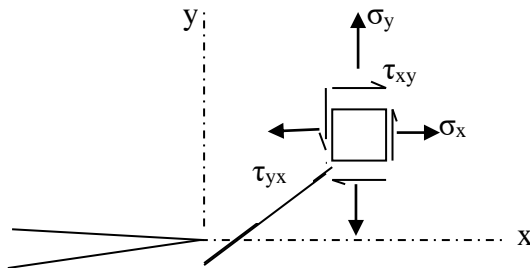


Gambar 4. (a). Tegangan nominal, (b). Tegangan dengan adanya lubang

Pada Gambar 4 ditunjukkan pengaruh adanya lubang pada suatu pelat terhadap distribusi tegangan akibat pengaruh beban tarik F pada ujung pelat. Tegangan yang terjadi pada pelat tanpa lubang besarnya adalah $\sigma_n = F/A$, σ_n adalah tegangan nominal. Sedangkan tegangan pada pelat dengan lubang ditunjukkan sebagai $\sigma' = k_t \times \sigma_n$, dimana K_t adalah faktor konsentrasi tegangan yang besarnya merupakan fungsi dari rasio antara diameter (D), lubang dan lebar pelat (w).

III.2. Medan Tegangan Pada Ujung Retak

Parameter dalam mekanika retak pada kasus elastik linear adalah



Gambar 5. Medan tegangan di ujung retak

Pada Gambar 5 menggambarkan kondisi tegangan pada elemen kecil yang terletak pada kordinat polar (r, θ). Namun bila ditinjau sebagai elemenkecil tiga dimensi, maka tegangan dan regangan yang terjadi adalah σ_{ij} ke arah x, y , dan z , τ_{ij} pada arah x,y , dan z , serta regangan (u,v,w) masing-masing untuk modulus I, II, dan III.

Medan tegangan pada ujung retak untuk modulus I, II dan III ditunjukkan dengan fungsi tegangan.

$$\sigma_{ij} = \sum_{n=-1}^{\infty} A_n^M (\sqrt{r})^n f_{ij,n}^M(\theta) \quad (M = I, II, III)$$

di mana r dan θ adalah koordinat polar pada ujung retak A_n adalah konstanta dan f adalah fungsi dari θ .

Modus I (tarikan)

$$\sigma_x = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right)$$

$$\sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right)$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right)$$

$$u_x = \frac{K_I}{2G} \frac{\sqrt{r}}{2\pi} \cos \frac{\theta}{2} \left(\kappa - 1 - 2 \sin^2 \frac{\theta}{2} \right)$$

$$u_y = \frac{K_I}{2G} \frac{\sqrt{r}}{2\pi} \sin \frac{\theta}{2} \left(\kappa + 1 - 2 \cos^2 \frac{\theta}{2} \right)$$

Di mana $\kappa = 3 - 4\nu$ untuk kondisi tegangan bidang dan $\kappa = (3 - \nu)/(1 + \nu)$ untuk kondisi regangan bidang. G adalah modulus geser, dan ν adalah rasio Poison.

Modus II (geseran)

$$\sigma_x = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \left(1 - \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right)$$

$$\sigma_y = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2}$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right)$$

$$u_x = \frac{K_{II}}{2G} \frac{\sqrt{r}}{2\pi} \sin \frac{\theta}{2} \left(\kappa + 1 + 2 \cos^2 \frac{\theta}{2} \right)$$

$$u_y = \frac{K_{II}}{2G} \frac{\sqrt{r}}{2\pi} \cos \frac{\theta}{2} \left(-\kappa + 1 + 2 \sin^2 \frac{\theta}{2} \right)$$

Modus III (robekan)

$$\tau_{xz} = -\frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2}$$

$$\tau_{yz} = \frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2}$$

$$\omega = \frac{2K_{III}}{G} \frac{\sqrt{r}}{2\pi} \sin \frac{\theta}{2}$$

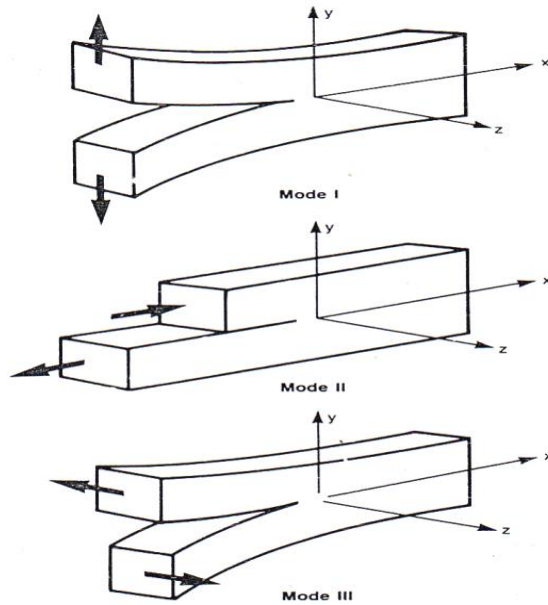
Pada persamaan di atas, parameter K_I , K_{II} , dan K_{III} disebut sebagai faktor intensitas tegangan dan merupakan parameter mekanika retakan.

BAB IV

MODUS RETAK

Retak disebabkan oleh beban luar yang dipicu oleh adanya tegangan yang terpusat pada suatu material. Tegangan terpusat terjadi pada lokasi tertentu yang terdapat atau diskontinuitas material. Cacat dapat berupa cacat mikro maupun cacat makro seperti yang telah dijelaskan sebelumnya. Cacat mikro berupa impuritis, segregasi, vakansi, dislokasi, batas butir, dan cacat-cacat yang disebabkan oleh proses produksi seperti kekasaran permukaan, cacat las, cacat cor, cacat hasil pembentukan logam, perlakuan panas dan lain-lain yang kesemuanya dapat memicu konsentrasi tegangan. Sedangkan cacat makro dapat berupa cacat volume seperti notch, goresan, lubang baut dan lain-lain. Dari pernyataan di atas menyimpulkan bahwa. Konsentrasi tegangan terjadi pada daerah atau lokasi yang paling lemah pada material tersebut.

Modus perambatan retak dapat dibagi menjadi modus tarikan (I), modus geser (II) dan modus robekan (III). Deskripsi ini ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Modus retak I, II dan III

Modus I

Modus I pada kasus linier fracture mechanics arah pembebanan bolak balik searah dengan arah tarikan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6 (a). Modus ini lebih dominan pada kasus kerusakan. Karena arah beban tegak lurus dengan bidang retak, maka awal retak lebih cepat terjadi dibandingkan dengan modus lain. Faktor intensitas

tegangan atau stress intensitas tegangan modulus I dinyatakan dengan K_I dimana ;

$$K_I = \sigma \sqrt{(\pi \cdot a)} f(y)$$

K_I = stress intensitas faktor modulus I

σ = level tegangan

a = *crack size*

$f(y)$ = faktor bentuk

Modus II

Modus II pada kasus linier fracture mechanics arah pembebanan bolak balik searah dengan arah geseran (sliding) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6 (b). Aarah beban sejajar dengan bidang retak. Faktor intensitas tegangan atau stress intensitas tegangan modulus II dinyatakan dengan K_{II} dimana:

$$K_{II} = \sigma \sqrt{(\pi \cdot a)} f(y)$$

K_{II} = stress intensitas faktor modulus II

σ = level tegangan

a = *crack size*

$f(y)$ = faktor bentuk

Modus III

Modus III pada kasus linier fracture mechanics arah pembebanan bolak balik dengan arah robekan (tearing), seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6 (c). Faktor intensitas tegangan atau stress intensitas tegangan modulus III dinyatakan dengan K_{III} di mana:

$$K_{III} = \sigma \sqrt{(\pi \cdot a)} f(y)$$

K_{III} = stress intensitas faktor modulus III

σ = level tegangan

a = crack size

$f(y)$ = faktor bentuk

IV.1. Mekanisme Retak

Retak adalah cacat material yang berupa skala makro dan merupakan diskontinuitas suatu material. Diskontinuitas material dapat berupa lubang/hole, notch hingga retak atau crack. Cacat-cacat ini akan memperlemah material atau dapat menurunkan kekuatan dikarenakan pada ujung notch, lubang maupun retak terjadi konsentrasi tegangan. Tegangan konsentrasi (σ_k) besarnya jauh lebih besar dari tegangan nominal (σ_m).

Mekanisme patah pada suatu material dapat dibagi menjadi tiga tahap yaitu:

IV.1.1. Tahap pengintian retak (*crack initiation*)

Tahap pengintian retak adalah tahap dimana mulai terjadi retak awal. Retak awal bermula pada suatu inti dimana tegangan terpusat terjadi. Tegangan terpusat terjadi pada suatu tempat yang paling lemah pada material tersebut. Daerah yang paling tersebut dapat disebabkan oleh diskontinuitas bahan seperti adanya lubang, notch, porisitas dan lain-lain, baik diskontinuitas mikro maupun makro. Tahap pengintian retak masih termasuk pada zone I pada kurva hubungan da/dN vs K . Tahap ini masih sulit untuk dideteksi dan juga sulit diramal kapan terjadinya.

IV.1.2. Tahap pertumbuhan retak (*crack propagation*)

Tahap pertumbuhan retak (da/dN) merupakan tahap perambatan retak sebelum tahap patah akhir terjadi. Tahap pertumbuhan retak dinyatakan dengan hukum paris $da/dN = A (\Delta K)^p$. Perambatan retak menurut hukum Paris terjadi pada kondisi linier. Retak tumbuh dari panjang retak awal (a_i) hingga mendekati (a_c). Pada kondisi ini retak yang terjadi masih pada kondisi stabil (*stable crack*). maka perambatan

retak akan berhenti. Tahap ini merupakan tahap yang dapat untuk diamati, sedangkan tahap I sulit untuk diprediksi. Sedangkan tahap III merupakan tahapan patah terjadi secara cepat.

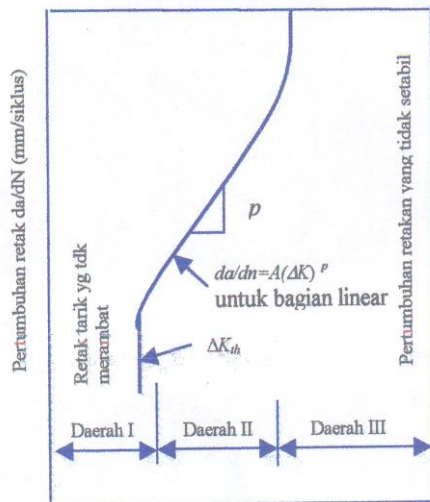
Permukaan patah pada tahap II pada umumnya terlihat mengkilap dan rata, hal ini dikarenakan beban yang terjadi pada tahap ini dibawah beban platis dan masih dalam kondisi elastis. Indikasi dari patah ini sering ditunjukkan dengan adanya *bech mark* atau garis pantai. Garis pantai merupakan indikasi patah fatigue/lelah. Kasus patah sebuah poros sering kali menampakkan adanya beach mark, Tetapi ada kalanya beach mark tidak begitu jelas. Hal ini dipengaruhi oleh ratio tegangan yang terjadi pada kondidi beban berulang. Stress ratio merupakan perbandingan tegangan minimum dibagi dengan tegangan maksimum. Pada umumnya beach mark akan lebih jelas bila terjadi $R = 0$.

IV.1.3. Tahap patah akhir

Tahap akhir merupakan tahap yang paling beriko, hal ini dikarenakan pada tahap ini material akan segera patah dalam keadaan cepat. Perambatan retak merupakan perambatan retak yang tidak stabil. Tahap ini merupakan batas akhir dari

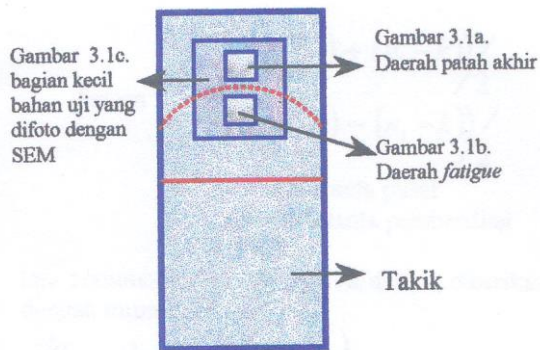
perambatan retak (K_I , K_{II} , K_{III}). Ketangguhan retak merupakan besaran stress intensitas factor pada kondisi yang kritis, dan dinyatakan dengan K_{Ic} untuk modulus I, dan K_{IIc} untuk modulus II serta K_{IIIc} untuk modulus III. Ketangguhan retak merupakan propertis material yang kemampuan material didalam menahan rambatan retak atau energi yang diserap oleh retak pada material.

Tahap pengintian retak, tahap perambatan retak hingga tahap patah akhir pada suatu material ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Tahapan retak pada suatu material

Pada permukaan patah suatu penampang persegi empat seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8 di mana terdapat penampang yang bertakik kemudian garis inisiasi retak dan diikuti oleh patah fatigue dan patah akhir.



Gambar 8. Sketsa permukaan patah

BAB V

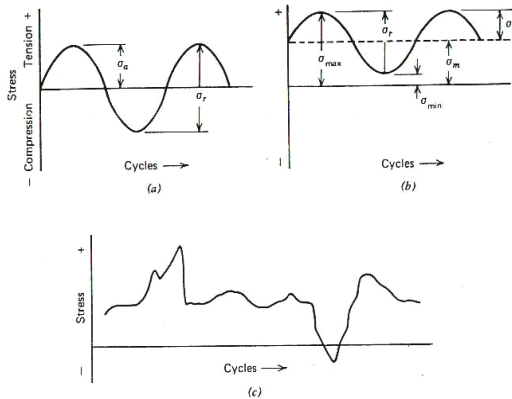
FATIGUE LIFE PREDICTION

Fatigue adalah salah satu jenis kerusakan/kegagalan yang diakibatkan oleh beban berulang. Ada 3 fase di dalam kerusakan akibat fatigue yaitu; pengintian retak (*crack initiation*), perambatan retak (*crack propagation*) dan patah static (*fracture*). Formasi dipicu oleh inti retak yang dapat berawal dari lokasi yang paling lemah kemudian terjadi pembebanan bolak balik yang menyebabkan local plastisitas sehingga terjadi perambatan retak hingga mencapai ukuran retak kritis dan akhirnya gagal. Kerusakan jenis ini paling banyak terjadi didunia teknik yaitu kira-kira 90% dari semua kerusakan/kegagalan yang sering terjadi.

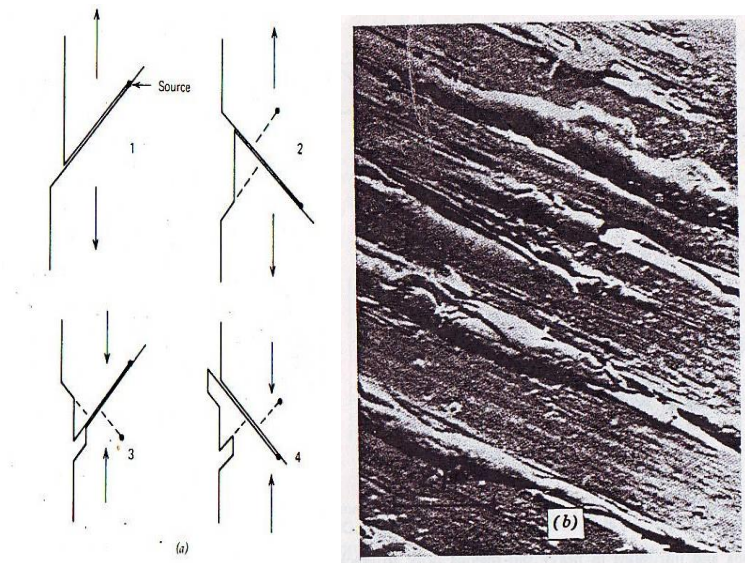
Suatu komponen mesin/konstruksi dapat mengalami pembebanan dalam beberapa variasi beban seperti fluktuasi beban, fluktuasi regangan atau fluktuasi temperatur. Bahkan tidak jarang konstruksi mengalam tegangan gabungan maupun kontaminasi dengan lingkungan yang korosif yang tentunya akan menyebabkan suatu konstruksi akan lebih terancam keamanannya.

Tiga siklus umum yang dapat menunjukkan suatu siklus tegangan fatigue yaitu yang pertama adalah fluktuasi tegangan terjadi mulai dari tegangan rata-rata nol dengan amplitude yang konstan. Yang kedua yaitu fluktuasi tegangan dimulai diatas garis rata-rata nol dengan amplitude konstan. Dan yang ketiga fluktuasi tegangan yang acak/random. Tiga siklus tersebut ditunjukkan pada Gambar 9.

Kerusakan atau kegagalan akibat fatigue berawal pada pengintian retak dengan beban yang bolak balik, yang menyebabkan deformasi plastis local berupa slip yang ditunjukkan dengan terbentuknya intrusi dan ekstrusi sebagai ciri terjadinya slip yang menyebabkan local deformasi. Kejadian ini ditunjukkan pada Gambar 10.



Gambar 9. Tiga tipe umum siklus pembebanan pada fatigue



Gambar 10. (a). Ekstrusi dan intrusi dalam bidang slip sebelum awal retak, (b). Foto mikroskop ekstrusi dan intrusi

Awal retak terbentuk pada daerah slip. Pertumbuhan retak secara kristalografi terorientasi sepanjang bidang slip dalam jarak yang pendek. Waktu yang pendek tersebut ditunjukkan sebagai pertumbuhan retak tahap pertama. Arah dari pertumbuhan retak secara makroskopik menjadi normal atau tegak lurus terhadap tegangan tarik. Hal ini ditunjukkan sebagai perambatan retak tahap kedua, yang dinyatakan sebagai umur perambatan retak.

Siklus relatif selama pengintian dan perambatan retak bergantung pada tegangan yang dialami. Bila tegangan menjadi naik maka fase pengintian retak menjadi turun. Fatigue dapat dibagi menjadi dua katagori yaitu fatigue siklus tinggi dan siklus rendah. Pada fatigue siklus rendah retak terjadi sangat lama sedangkan pada fatigue siklus tinggi retak terbentuk lebih awal.

Ada perbedaan yang tampak secara visual antara fatigue siklus rendah (*high stress*) dan fatigue siklus tinggi (*low stress*). Pada fatigue siklus rendah slip bands yang terbentuk akan lebih kasar sedangkan pada fatigue siklus tinggi slip bands yang terbentuk lebih halus.

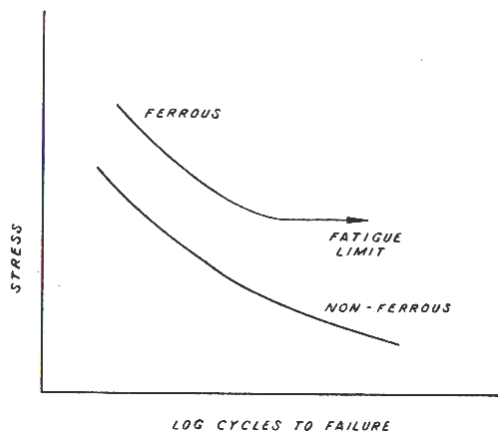
V.1 Kurva Tegangan – Siklus (S – N)

Data fatigue biasanya disajikan dalam kurva tegangan dan siklus, di mana tegangan adalah S dan siklus adalah N. Jumlah siklus adalah siklus mulai dari pengintian retak sampai perambatan retak.

Bila tegangan turun maka jumlah siklus untuk terjadi kegagalan menjadi naik, sedangkan bila tegangan naik maka jumlah siklus menjadi berkurang. Pada baja sebagai *ferrous alloy*, terdapat batas tegangan dimana kegagalan fatigue tidak

terjadi atau terjadi pada siklus yang amat panjang (*infinite*). Nilai batas tersebut terlihat sebagai suatu aimptotik yang menunjukkan nilai *fatigue limit* atau *endurance limit*. *Endurance limit* adalah tegangan dimana tidak terjadinya kegagalan atau fracture didalam range 10^7 cycles. Berbeda dengan material nonferrous seperti paduan aluminium dan lainnya tidak memiliki fatigue limit. Untuk melihat perbedaan antara kedua paduan tersebut dapat ditunjukkan pada Gambar 11.

Dengan memahami karakteristik suatu konstruksi atau komponen mesin yang mengalami fatigue, maka suatu perencanaan atau desain perlu dipertimbangkan dari aspek endurance limit suatu material.



Gambar 11. Kurva S-N untuk paduan fero dan nonferro

V.2 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi *Fatigue Life*

V.2.1 *Stress Concentration*

Pemicu-pemicu terjadinya konsentrasi tegangan seperti fillet, notch, alur pasak, positas, inklusi dan lain-lain akan menyebabkan menurunnya umur fatigue/*fatigue life*. Pengaruh-pengaruh notchs dapat di evaluasi dengan membandingkan antara data dengan notch dengan data tanpa notch.

Untuk menentukan hubungan tegangan siklus untuk spesimen dengan notch, maka diperlukan tegangan nominal (net stress). Perbandingan antara fatigue limit dengan notch dan fatigue limit tanpa notch disebut fatigue notch faktor (Kt).

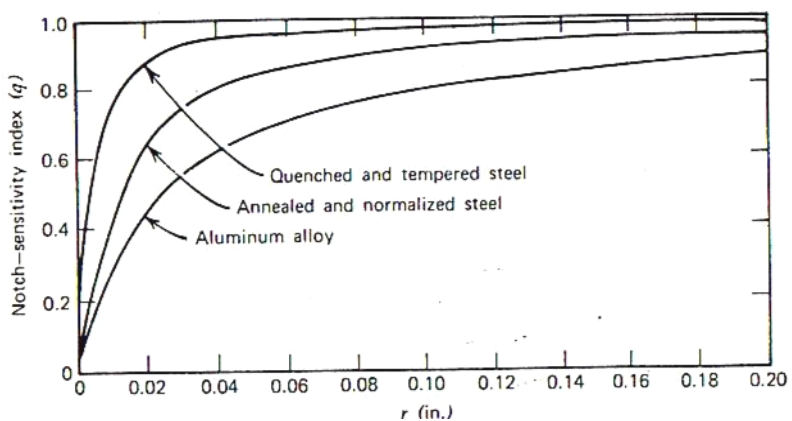
$$K_t = \frac{\text{Fatigue Limit, Unnotch}}{\text{Fatigue limit, notched}}$$

Atau dari nilai Kt, dapat dihitung notch sensitivitas dengan symbol q.

$$q = \frac{K_t - 1}{K_t + 1}$$

Di mana : Kt = faktor konsentrasi tegangan

Bila kekuatan tarik , radius notch dan ukuran penampang naik, dan bila ukuran butir turun maka nilai Q akan naik. Efek dari radius notch terhadap notch sensitivitas untuk beberapa material ditunjukkan pada Gambar 12. Efek kekuatan tarik dipengaruhi oleh kekasaran permukaan. Kekuatan tarik yang meningkat akan diikuti oleh ketahanan fatigue yang meningkat.



Gambar 12. efek radius notch pada notch sensitivitas

V.2.2 Dimensi (*Size*)

Bila ukuran spesimen bertambah maka ketahanan fatigue kadang-kadang menurun. Hal ini ada beberapa alasan, Kegagalan akibat fatigue biasanya dimulai dari permukaan.

Jadi bila penambahan size dilakukan maka memberikan kemungkinan menimbulkan keberadaan cacat. Akibatnya retak berawal pada cacat tersebut.

V.2.3. Efek Permukaan

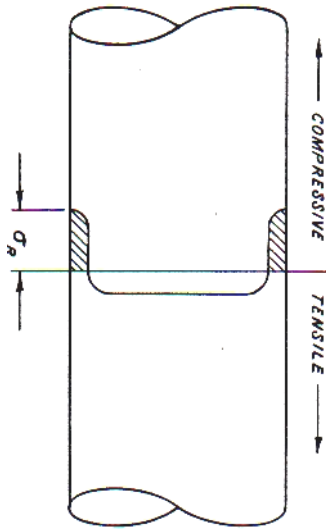
Ketahanan fatigue sangat dipengaruhi oleh kondisi permukaan. Kondisi permukaan tersebut adalah sifat permukaan seperti perlakuan permukaan seperti *surface hardening* dan tegangan sisa permukaan. Efek dari *surface finishing* atau kekasaran permukaan secara kualitatif juga mempengaruhi ketahanan fatigue suatu material seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hubungan kehalusan permukaan terhadap ketahanan *fatigue*

<i>Finishing operation</i>	Surface finish (μ inch)	<i>Fatigue life (cycles)</i>
Bubut	105	24.000
Sebagian polish	6	91.000
Polish penuh	5	137.000
Grinda	7	217.000
Grinda dan polish	2	234.000

Perlakuan-perlakuan permukaan yang akan merubah sifat mekanik permukaan juga akan mempengaruhi ketahanan fatigue bahan. Seperti perlakuan ; Elektroplating sering akan menurunkan ketahanan fatigue. Hal ini dapat menimbulkan tegangan tarik sisa pada permukaan akibat proses tersebut, sehingga dapat memicu retak pada permukaan. Perlakuan lain seperti dekarburisasi dapat mengurangi ketahanan fatigue. Namun sebaliknya proses pengerasan permukaan seperti karburisasi, nitridasi, induksi dan flame hardening dapat meningkatkan ketahanan fatigue.

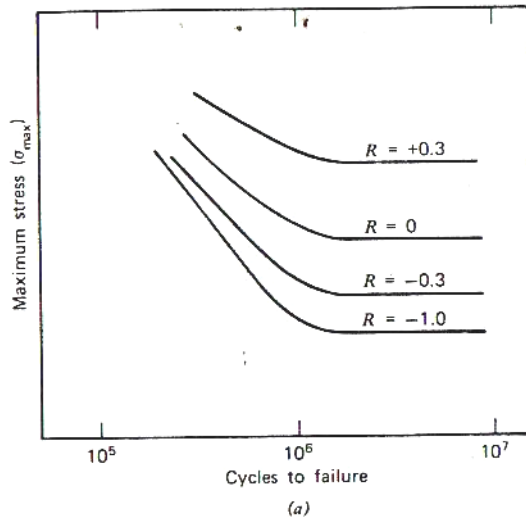
Tegangan sisa (*residual stress*) terutamanya tegangan sisa tekan akan memberikan peningkatan ketahanan fatigue. Tegangan sisa ini dapat dikembangkan dengan melakukan deformasi plastis yang tidak seragam pada suatu penampang. Hal ini dapat diterangkan pada Gambar 13.



Gambar 13. Distribusi tegangan sisa

V.2.4. Tegangan Rata - Rata (*Mean Stress*)

Tegangan rata-rata (mean stress) juga mempengaruhi ketahanan fatigue. Tegangan ini ditunjukkan dengan amplitudo tegangan yang dinyatakan dengan ratio tegangan $R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$. Untuk $R = -1$ artinya amplitudo tegangan tarik sama dengan amplitudo tegangan tekan. Bila nilai R cenderung menjadi positif maka ketahanan fatiguenya menjadi turun. Pengaruh ratio tegangan ditunjukkan pada Gambar 14.



Gambar 14. Efek tegangan rata-rata terhadap R (ratio tegangan)

V.3. Faktor Metalurgi yang Mempengaruhi Ketahanan *Fatigue*

Kelelahan bahan /fatigue sangat sensitif terhadap desain struktur. Ada beberapa faktor metalurgi yang berpengaruh terhadap ketahanan fatigue/*fatigue life*.

V.3.1 Ukuran butir

Ukuran butir akan mempengaruhi ketahanan fatigue terutama untuk material nonfero dan baja yang dianil. Bila

ukuran butir semakin halus maka ketahanan fatiguenya akan meningkat. Namun tidak untuk baja yang tanpa notch yang diperlakukan panas, hal ini tidak ada pengaruh.

Perubahan struktur mikro akan mempengaruhi perubahan ketahanan fatigue, hal ini dikarenakan bila terjadi perubahan struktur mikro berarti akan terjadi perubahan fasa pada bahan. Karena bervariasinya fasa-fasa pada material maka akan memberikan perbedaan pengaruh terhadap ketahanan fatigue. Sebagai contoh perlit yang kasar akan memberikan dampak rendah dibandingkan dengan karbida partikel/*spheroidal microstructure*. Bentuk karbida yang bulat meningkatkan ketahanan fatigue, hal ini dikarenakan karbida bulat memiliki efek konsentrasi tegangan yang rendah. Contoh lain pada baja yang di quench yang memiliki struktur mikro martensit temper akan memiliki ketahanan fatigue yang sangat baik dibandingkan struktur mikro campuran seperti martensit-bainit atau ferit.

V.3.2 Orientasi

Material yang mengalami pengerjaan logam/*metal working* seperti proses roll akan memiliki orientasi arah butir yang searah dengan arah pengerolan. Jadi dalam hal ini

ketahanan fatigue bersifat anisotropic. Ketahanan fatigue akan meningkat bila arah pembebanan searah dengan arah longitudinal atau searah dengan arah pengerolan. Sebaliknya ketahanan fatigue akan rendah bila pembebanan diberikan tegak lurus dengan arah pengerolan.

V.4. Perambatan Retak (*Crack Propagation*)

Perambatan retak adalah tahap kedua dari ketiga tahap proses kegagalan/kerusakan. Dalam tahap ini retak tumbuh dan menjalar hingga mencapai batas kritis (*critical size*). Dari data perambatan retak suatu prediksi umur lelah (*fatigue life*) dapat dikembangkan.

Dari konsep *fracture mechanics*, laju pertumbuhan retak dinyatakan dengan da/dN yang merupakan fungsi dari sifat material, panjang retak, dan tegangan operasi. Dari Paris law dapat diinterpretasikan bahwa laju perambatan retak sebagai;

$$da/dN = C (\Delta K)^m$$

di mana:

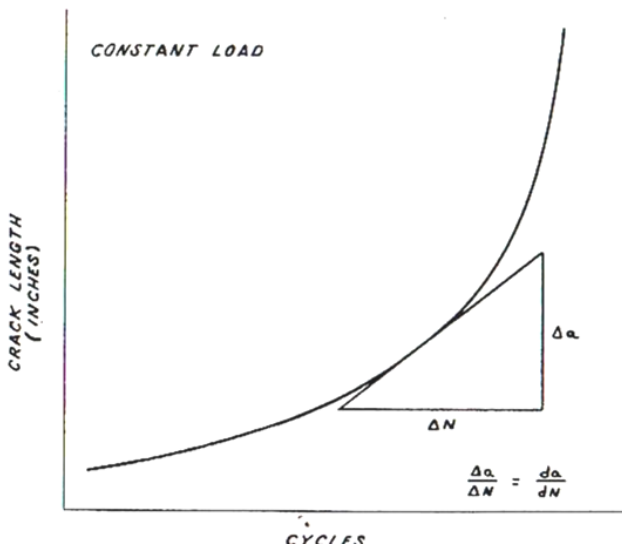
K = range faktor intensitas tegangan

C = konstanta material

m = material constant,

Laju perambatan retak merupakan fungsi dari faktor intensitas tegangan,. Retak berawal dari daerah yang paling lemah, kemudian berkembang seiring dengan berjalannya siklus pembebanan. Di dalam suatu percobaan biasanya perambatan retak dapat diukur secara visual dengan alat teleskop.atau bisa dilakukan dengan alat ultrasonik ataupun dengan alat pengubah resistivitas listrik.

Pertumbuhan retak adalah perubahan panjang retak terhadap siklus. Jika panjang retak a di plot dengan siklus N , maka dapat ditunjukkan oleh Gambar 15.



Gambar 15. Panjang retak versus siklus

da/dN dievaluasi pada suatu panjang retak , kemudian ΔK untuk panjang retak tersebut. Dengan mengasumsi bahwa panjang retak a pada suatu panjang konstan dan hanya tegangan yang bervariasi. Hal ini ditunjukkan untuk suatu kalibrasi K sederhana ;

$$K = \sigma\sqrt{a}$$

$$\Delta K = \Delta\sigma\sqrt{a}$$

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{A}\sqrt{a}$$

Di mana:

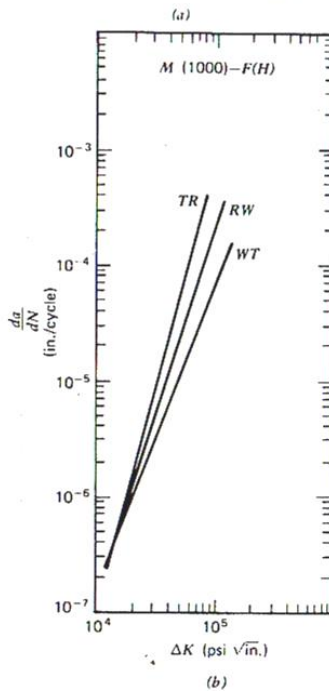
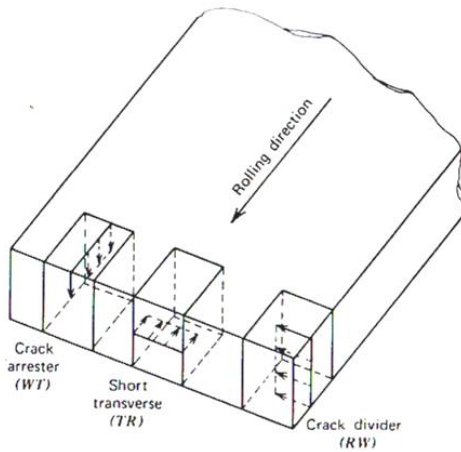
$\Delta\sigma$ = range tegangan

ΔP = range beban

A = penampang

a = panjang retak

Hubungan antara perambatan retak dan range factor intensitas tegangan serta pengaruhnya terhadap arah orientasi ditunjukkan pada Gambar 16.

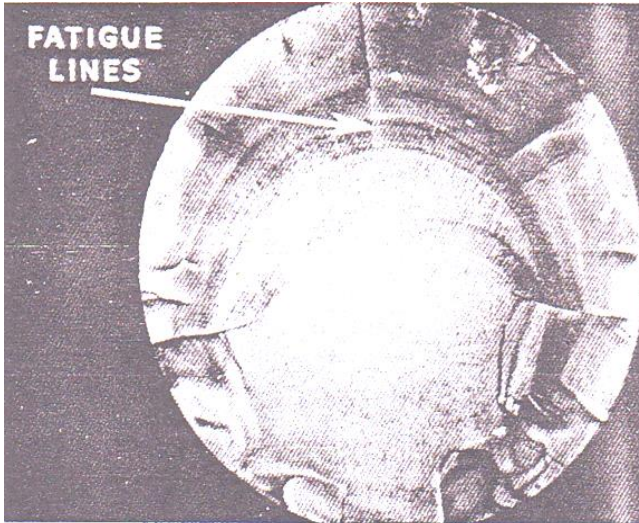


Gambar 16. (a). Orientasi bahan, (b). Laju pertumbuhan retak fatigue

V.5. Ciri Patah Lelah

Secara makroskopis kegagalan akibat fatigue selalu ditunjukkan dengan adanya deformasi plastis yang sedikit yang terlihat rata dan diikuti oleh patah statik. Secara makro kegagalan akibat fatigue sering ditandai dengan adanya beach mark atau garis pantai. Beach mark adalah garis yang menunjukkan hubungan siklus selama pembebanan.

Lokasi dan bentuk dari beach mark bervariasi terhadap kondisi pembebanan. Retak selalu dimulai dari daerah konsentrasi tegangan seperti fillet dan alur pasak pada poros. Dengan bergantung pada kondisi pembebanan, maka retak awal dapat berawal dari beberapa tempat. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 17 dan 18.



Gambar 17. Permukaan patah fatigue dengan multiorigin



Gambar18. Awal retak pada selinder dinding tebal

Pengaruh kondisi pembebanan fatigue akan mempengaruhi karakteristik permukaan patahnya, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 19.

High nominal stress			Low nominal stress		
Smooth	Mild notch	Sharp notch	Smooth	Mild notch	Sharp notch
Sheets (external notches)					
Sheets (internal notches)					
Tension and tension-compression					
Unidirectional bending					
Reversed bending					
Rotating bending					
Alternating torsion					

Gambar 19. Permukaan patah fatigue terhadap kondisi beban

V.6. Crack Propagation Approach in Life Prediction

Untuk memprediksi umur lelah suatu komponen yang memiliki cacat, defect awal, atau diskontinuitas, maka konsep mekanika retakan (fracture mechanics) dikembangkan dan banyak digunakan baik secara analitis, eksperimen maupun numeric. Ada tiga tahap dalam kegagalan adalah: terbentuknya retak awal, pertumbuhan retak dan patah akhir.

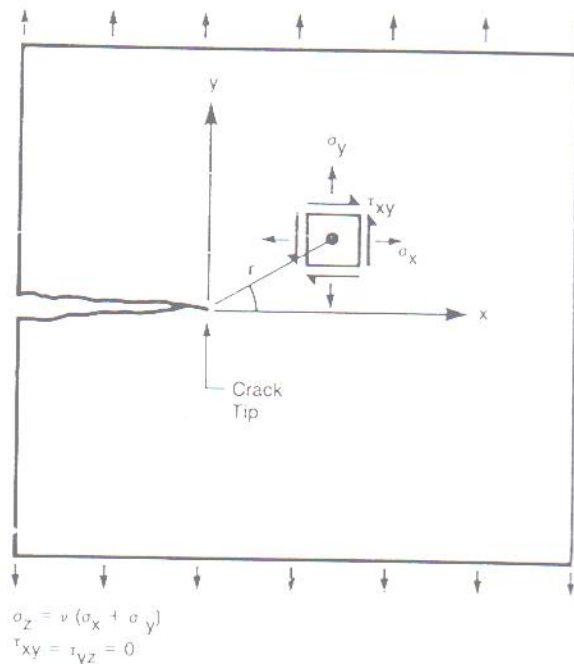
Untuk mengevaluasi suatu struktur yang memiliki cacat/ flaw, salah satu pendekatannya dengan memprediksi umur dari perambatan retak. Untuk kasus fatigue, maka metode Linear elastic fracture mechanics (LEFM) biasa digunakan. Hal ini dikarenakan kasus fatigue terjadi pada kondisi elastis. Namun demikian konsep mekanika retakan juga bisa diaplikasikan pada kondisi plastis dengan metode Elastis plastis fracture mechanics (EPFM).

V.7 Stress Intensity Factor

Di dalam *Linear Elastic Fracture Mechanics* (LEFM), ketangguhan suatu komponen, atau umur dari pertumbuhan retak dikarakteristikan dengan suatu parameter yang disebut dengan stress intensity factor, KI. Nilai K menyatakan suatu

ukuran dari besaran medan konsentrasi tegangan disekitar ujung retak.

Anggap bahwa suatu struktur yang memiliki retak dikenai tegangan tarik yang tegak lurus pada bidang retak. Seperti pada Gambar 20.



Gambar 20. Komponen tegangan mode I

Tegangan yang terjadi pada ujung retak adalah sebagai berikut

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

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

$$\tau_{xy} = \frac{KI}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \quad (3)$$

Stress intensity factor pada modus ini adalah KI yang merupakan fungsi dari panjang retak (a) dan tegangan kerja. Tetapi bervariasi terhadap tipe retak dan beban.

Jadi KI dinyatakan dengan rumus:

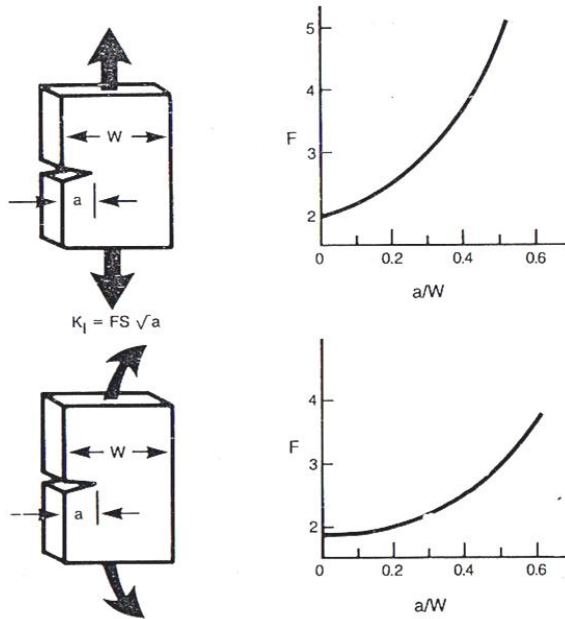
$$KI = \sigma \cdot \sqrt{a} \cdot f \quad (4)$$

Di mana :

σ = Tegangan nominal

a = panjang retak

f = faktor bentuk



Gambar 21. Stress intensity factor untuk kondisi tarikan dan bending

V.8 Fracture Toughness

Ketangguhan retak adalah merupakan ukuran kemampuan suatu material didalam menahan retak sebelum terjadi patah/fracture. Atau kemampuan retak di dalam menyerap energi yang datang dari luar. Perlu dipahami bahwa

ketangguhan berbeda dengan kekuatan. Kekuatan material diukur dari kemampuan material di dalam menahan beban.

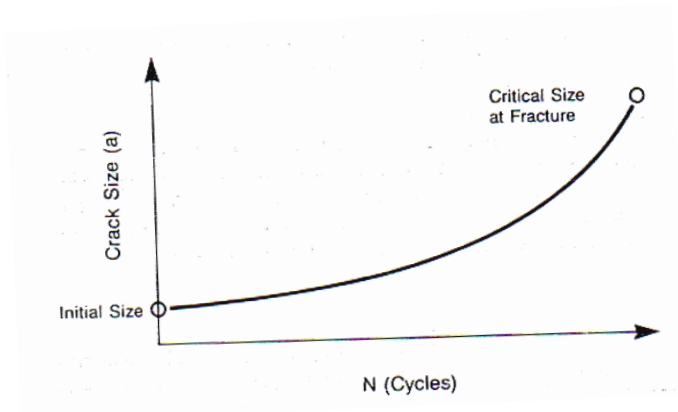
Sifat ketangguhan bahan didalam menahan laju retakan dinyatakan sebagai nilai ketangguhan/toughness value dari bahan (K_c). Sepertinya sifat bahan pada kondisi statis di mana dinyatakan sebagai *yield strength* atau *ultimate strength*.

Suatu gambaran yang penting didalam memprediksi laju retak yang terkait dengan prediksi umur lelah, nilai K_c digunakan untuk mengevaluasi ketahanan retak dengan membandingkan nilai K_I dan nilai K_{Ic} . Jika nilai K_I berharga jauh dari K_{Ic} maka dapat dikatakan bahwa suatu konstruksi masih bisa dikatakan aman. Dan sebaliknya bila nilai K_I mendekati nilai K_{Ic} maka dapat dikatakan suatu konstruksi akan mengalami gagal/patah.

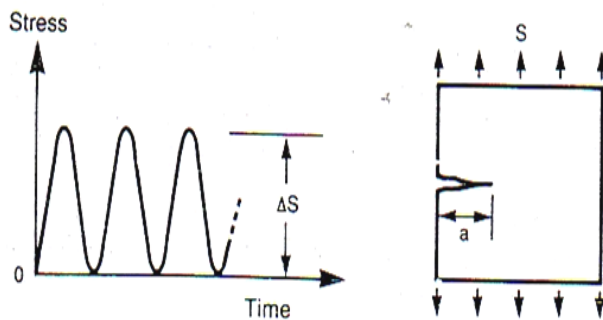
Ada tiga modus pergeseran permukaan patah yaitu modus I (tarikan), modus II (geseran) dan modus III sebagai robekan seperti ditunjukkan pada Gambar 14.

V.9 Fatigue Crack Growth

Untuk memprediksi laju pertumbuhan retak diperlukan data laju pertumbuhan retak dari material yang dibebani secara fatigue, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 22 dan 23.



Gambar 22. Skematik laju pertumbuhan retak



Gambar 23. Beban fatigue yang menyebabkan pertumbuhan retak

Jika data $da/dN - \Delta K$ tersedia, hal ini mempermudah untuk memprediksi pertumbuhan retak untuk variasi beban, tipe retak dan sebagainya. Untuk beberapa material yang digunakan untuk paduan struktur biasanya data tersebut sudah ada. Untuk material yang belum ada datanya sebaiknya harus di generalisasi dengan mengevaluasi secara fracture mechanics.

Contoh beberapa material yang memiliki data antara laju pertumbuhan retak dan range stress intensity factor seperti;

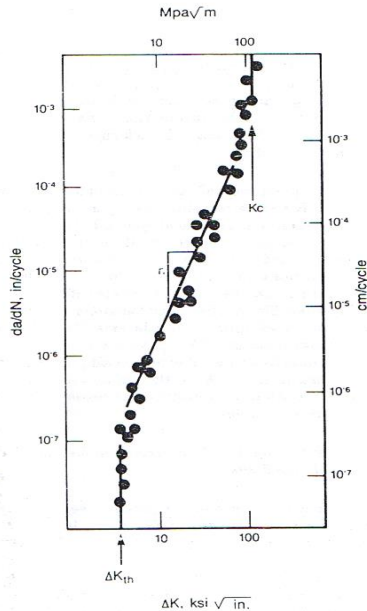
Untuk baja ferit-perlit:

$$da/dN = 6.9 \times 10^{-12} (\Delta K)^3 \quad (5)$$

Untuk baja martensitik:

$$da/dN = 1.4 \times 10^{-10} (\Delta K)^{2.3} \quad (6)$$

Untuk material-material yang belum memiliki rumus empirisnya perlu dilakukan evaluasi secara fracture mechanics dan dilakukan pengukuran melalui eksperimen laboratorium. Data laju pertumbuhan retak tersebar pada zone atau tahap II dari kurva sigmoid hubungan antara $da/dN - \Delta K$ seperti yang ditunjukkan pada Gambar 24.



Gambar 24. Kurva sigmoidal $da/dN - \Delta K$

Dari kurva yang ditunjukkan pada Gambar.16 di atas sangatlah penting untuk menjadi acuan didalam memprediksi laju pertumbuhan retak mulai dari retak awal hingga mengalami perambatan dan akhirnya patah statik. Setiap perkembangan pertumbuhan retak selalu diikuti oleh nilai stress intensitas tegangan KI yang berbeda-beda sesuai dengan panjang retaknya.

Patah terjadi pada panjang retak yang kritis dimana material tidak bisa lagi menahan beban yang diberikan. Patah terjadi ketika nilai ketangguhan retak /fracture toughness K_{Ic} bahan tercapai. Artinya nilai $K_I = K_{Ic}$,

V.10 Contoh Perhitungan Stress Intensitas Faktor

1. Hitung stress intensitas factor untuk compact tension specimen (CT) bila dengan mengasumsi beban 3150 lb dan dimensi ketebalannya 1.37 in, lebar 2.0 in dengan panjang retak 1.08 in.

Solusi:

$$\begin{aligned} a/w &= 1.08/2 \\ &= 0.54 \end{aligned}$$

$f(a/w) = 11$ dari pers. empiris yang biasa didapat:

$$\begin{aligned} K_I &= \frac{P}{B(w)^{0.5}} \cdot f(a/w) & (7) \\ &= \frac{3.150}{1.37 \times 2^{0.5}} \cdot 11 \\ &= 17.9 \text{ ksi(in)}^{0.5} \\ &= 19.7 \text{ MPa (in)}^{0.5} \end{aligned}$$

2. Suatu pelat terbuat dari baja A514 mengandung retak sisi awal $a = 0.24$ in. Fracture toughness bahan $140 \text{ ksi } \sqrt{\text{in}}$. Pelat dikenai tegangan tarik yang berfluktuasi sebesar 20 ksi minimum dan 50 ksi maksimum. Hitung jumlah siklus mulai retak awal hingga patah?

Solusi:

Perhitungan nilai stress intensity factor dengan formula

$$K_I = 1.12 (\pi)^{0.5} S(a)^{0.5} \quad \text{atau} \quad K_I = 2 S (a)^{0.5}$$

Panjang retak kritis adalah:

$$\begin{aligned} a_{cr} &= 0.25 (K_{Ic}/S \text{ maks})^2 \\ &= 0.25 (140/50)^2 \\ &= 1.96 \text{ in (50 mm)} \end{aligned}$$

$$\text{Range tegangan} = S \text{ maks} - S \text{ min} = 50 - 20 = 30 \text{ ksi}$$

(270) Mpa.

$$\begin{aligned} \Delta K_I &= s (\Delta S) (a \text{ avg})^{0.5} \\ &= 60 (a \text{ avg})^{0.5} \end{aligned}$$

Laju perambatan retak persiklus diberikan dengan persamaan

$$da/dN = 0.66 \times 10^{-8} (\Delta K1)^{2.25}$$

$$dN = \frac{0.12}{0.66 \times 10^{-8} (\Delta K1)^{2.25}}$$

Dengan bantuan integrasi numerik yang dilakukan pada formula di atas.

Tabel 2. Integrasi Numerik

ai (in)	acr (in)	a avg (in)	ΔK1	ΔN (siklus)	ΣN(siklus)
0.24	0.36	0.30	32.9	6944	6.944
0.36	0.48	0.42	38.9	4763	11.707
0.48	0.60	0.54	44.1	3592	15.299
0.60	0.72	0.66	48.7	2873	18.172
0.72	0.84	0.78	53.0	2375	20.547
0.84	0.96	0.90	56.9	2024	22.571
0.96	1.08	1.02	60.6	1757	24.328
1.08	1.20	1.14	64.1	1548	25.876
1.20	1.32	1.26	67.3	1388	27.264
1.32	1.44	1.38	70.5	1250	28.514
1.44	1.56	1.50	73.5	1138	29.652
1.56	1.68	1.62	76.4	1043	30.695
1.68	1.80	1.74	79.1	965	31.660
1.80	1.96	1.88	82.3	882	32.542

$$\frac{\Delta a}{\Delta N} = 0.66 \times 10^{-8} (62.9)^{2.25}$$

$$= 0.000074 - 0.24$$

$$= 1.72$$

$$1.72/0.000074 = 23.243 \text{ siklus.}$$

Jam Operasi perhari.

DAFTAR PUSTAKA

1. Kikuchi, M. 2000. *Basic of Finite Element Method*. Science University of Tokyo, Noda, Chiba, Japan.
2. Broek, D. 1982. *Elementary Engineering Fracture Mechanics*. 3th revised edition, Martinus Nijhoff publishers. The /Boston/London.
3. Chandra, H. 2006. *Analisa Pertumbuhan Retak pada Al 7075-T6 dengan Menggunakan Mesin Uji Lentur Tiga titik*. Proceeding seminar.
4. Hertzberg, R.W. 1996. *Deformation and Fracture Mechanics of engineering Mechanics*. Fourth edition, John Wiley & Sons, inc. New York.
5. ASTM, *Manual on Fatigue Testing, ASTM STP No.91*, Philadelphia, 1949.
6. Broek, D. 1988. *The Practical Use of Fracture Mechanics*, Kluwer Academic Publisers, Dordrecht.
7. Chandra, H., Nukman, dan Sianturi, B. 2018. *Analysis of Fatigue Life and Crack Propagation Characterization of Gray Cast Iron under Normalizing Process*. IOP Publishing.
8. Chandra, H. 2018. *Mechanical Fracture Characterization of Rice Kernel Under Milling Process*. IOP Publishing.
9. Blake, A. 1996. *Practical Fracture Mechanics and Design*. Marcel Dekker, inc.
10. Chandra, H., Warizal., Dahlan, H., Paramitha, N., dan Tito. 2021. *Increase the toughness of material of construction using heat treatment*. IOP Publishing.
11. Broek, D. 1975. *Cracks at Structural Holes*, Research Report, Colombus.

12. Adam, Everette E. & Ronald J. Ebert. 1992. *Production and Operation management (Concept, models, and Behavior) 5th edition*. Englewood cliff new Jersey: Prentice Hall Inc.
13. Wang, C.H. 1996. *Introduction to Fracture Mechanics*. DSTO Aeronautical and Maritime Research Laboratory: Melbourne.
14. ASM Metal Handbook Vol 12. (1992). Fractography. In *ASM International* (Vol. 12, Issue 249). <https://doi.org/10.2472/jsms.23.479>.
15. ASM Metals Handbook Vol 1. (1990). *ASM HANDBOOK Vol 1. Properties and Selection: Irons Steels and High Performance Alloys* (10th ed.). ASM International. Handbook Committee.
16. Callister Jr, W. D., & Rethwisch, D. G. (2018). *Materials Science and Engineering - An Introduction 10th Edition*.
17. Cardarelli, F. (2008). *MATERIALS HANDBOOK: A Concise Desktop Reference* (2nd Editio). <https://doi.org/DOI 10.1007/978-1-84628-669-8>
18. Collins, J. A. (1981). Fatigue testing procedures and statistical interpretations of data. *Failure of Materials in Mechanical Design Analysis, Prediction, Prevention*. John Wiley, New York, 360–378.
19. D.M. Stefanescu. (2001). ASM Metals Handbook - Casting. *Technology*, 15, 2002.

20. Kalpakjian, S., & Schmid, S. (2013). *Manufacturing Engineering and Technology, SI Edition*. Singapore: Pearson Publications.
21. Mardhi, A., & Himawan, R. (2011). Estimasi umur fatik menggunakan pembebanan. *Sigma Epsilon*, 15(1), 31–38.
22. Pokrovskii, A. I., Chaus, A. S., & Kunovskii, E. B. (2011). Effect of the shape of graphite inclusions on acoustic characteristics of articles from cast and deformed iron. *Metal Science and Heat Treatment*, 53(7), 311–317.
23. Stefanescu, D. M. (2018). Classification and Basic Metallurgy of Cast Iron. *Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys, 1*, 3–11. <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v01.a0009206>
24. Sugiarto, T., Zulhanif, & Sugiyanti. (2013). Analisis Uji Ketahanan Lelah Baja Karbon Sedang Aisi 1045 Dengan Heat Treatment (Quenching). *JURNAL FEMA, Volume 1, Nomor 3, Juli 2013, 1(Nomor 3)*, 1–8.
25. Theuwissen, K., Laffont, L., Véron, M., & Lacaze, J. (2016). Crystallography of graphite spheroids in cast iron. *International Journal of Cast Metals Research*, 29, 12–16. <https://doi.org/10.1080/13640461.2016.1142233>
26. Van Ettinger, C. J. (2010). Oil quenched malleable iron, the strength of an old material in a “ green cast”

- development and a new future. *69th World Foundry Congress 2010, WFC 2010*, 2, 427–435.
27. Velichko, A., Holzapfel, C., & Muecklich, F. (2007). 3D characterization of graphite morphologies in cast iron. *Advanced Engineering Materials*, 9(1-2), 39–45.
 28. Wheeler, E. C. (2000). Malleable Cast Iron. *Journal of the American Society for Naval Engineers*, 11(1), 161–172. <https://doi.org/10.1111/j.1559-3584.1899.tb02456.x>
 29. William D. Callister, J. (2001). *Fundamentals of Materials Science and Engineering An Interactive*. Engineering, Department of Metallurgical Utah, The University of.
 30. William D. Callister, J. (2007). Materials Science and Engineering An Introduction. In *Journal of Materials Science* (Vol. 26, Issue 14). <https://doi.org/10.1007/BF01184995>
 31. Zhao, H., Wang, G., Wang, H., Bi, Q., & Li, X. (2017). Fatigue life analysis of crawler chain link of excavator. *Engineering Failure Analysis*. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2017.04.034>

GLOSARIUM

Brittle fracture adalah retaknya material atau peralatan yang tiba-tiba & sangat cepat di bawah tekanan. Fraktur rapuh terjadi tanpa deformasi plastis atau sedikit deformasi hanya dengan pemisahan langsung di sepanjang bidang kristalografi karena putusanya ikatan atom yang sederhana.

Crack opening displacement (COD) umumnya didefinisikan sebagai bukaan di mana dua bidang ortogonal melalui tepi retak, membentuk 45° dengan bidang retakan, bertemu dengan wajah retak.

Critical crack size adalah panjang di mana retakan menjadi tidak stabil pada tekanan tertentu yang diterapkan. Hal ini sangat membantu dalam menentukan keamanan material. Dalam retakan yang tidak stabil, perambatan retak, setelah dimulai, berlanjut secara spontan tanpa peningkatan besarnya tekanan yang diterapkan. Kegagalan kelelahan terjadi sangat cepat setelah retakan yang maju telah mencapai ukuran kritis.

Ductile Fracture adalah jenis fraktur yang ditandai dengan deformasi atau leher plastis yang luas. Ini biasanya terjadi sebelum fraktur yang sebenarnya. Dalam fraktur ulet, ada penyerapan energi dalam jumlah besar dan perambatan yang lebih lambat sebelum fraktur terjadi dibandingkan dengan fraktur rapuh.

Dynamic yield strenght parameter material yang diukur dalam kondisi tarik berkecepatan tinggi atau pemuatan benturan (impak).

Elastic modulus parameter konvensional yang menunjukkan rasio tegangan terhadap regangan di bawah batas proporsional.

Elastic Plactic Fracture Mechanisc (EPFM) muncul dari keinginan untuk menggunakan mekanika fraktur dalam situasi plastisitas yang lebih besar, di mana zona plastik ujung retak sebanding ukurannya dengan panjang retakan atau dimensi spesimen, termasuk kasus ekstrem di mana retakan tumbuh di bidang regangan yang sepenuhnya plastik, misalnya pada akar takik.

Fractography adalah studi tentang permukaan fraktur material. Metode fraktografi secara rutin digunakan untuk menentukan penyebab kegagalan dalam struktur rekayasa, terutama dalam kegagalan produk dan praktik rekayasa forensik atau analisis kegagalan.

Linear Elastic Fracture Mechanics (LEFM) alat utama pada fraktur yang menentukan bahwa tingkat plastisitas lokal di ujung retak sangat kecil dan tidak berpengaruh pada karakteristik defleksi beban.

Membrane stress pada suatu bagian adalah tegangan rata-rata yang disebabkan oleh gaya normal pada bagian

tersebut. Ini dihitung menggunakan persamaan klasik untuk stres normal ($S = F/A$).

Microcracking adalah jenis kerusakan material yang terdiri dari retakan yang cukup kecil sehingga membutuhkan pembesaran untuk mengamati. Microcrack adalah indikasi kegagalan material yang pada akhirnya dapat menyebabkan kegagalan total. Ini dapat terjadi pada lapisan selama aplikasi atau proses pengeringan, atau selama beban regangan lapisan atau bahan.

Monotonic loads adalah beban di mana arah beban aplikasi tidak berubah, sedangkan pemuatan siklik melibatkan kombinasi peningkatan dan penurunan beban, sehingga arah beban juga berubah

Nominal Stress tegangan nominal dihitung pada penampang bersih (menggunakan teori elastis sederhana) tanpa memperhitungkan diskontinuitas dalam bentuk retakan, alur, fillet, dan lubang.

Plane-strain fracture toughness (K_{Ic}) Ini adalah ukuran ketahanan suatu bahan terhadap ekstensi retak di bawah kondisi yang didominasi linier-elastis (yaitu kondisi ketangguhan rendah ketika ada sedikit atau tidak ada deformasi plastis yang terjadi di ujung retak).

Stress intensity factor adalah salah satu parameter paling mendasar dan berguna dalam semua mekanika fraktur. Faktor intensitas tegangan menggambarkan keadaan tegangan pada ujung retak, terkait dengan

laju pertumbuhan retak, dan digunakan untuk menetapkan kriteria kegagalan karena fraktur.

Ultimate strength adalah tegangan maksimum yang material dapat menahan saat sedang diregangkan atau ditarik sebelum gagal atau melanggar. Kekuatan tarik adalah tidak sama dengan kuat tekan dan nilai-nilai bisa sangat berbeda.

Yield Strength adalah tegangan minimum ketika suatu material kehilangan sifat elastisnya. Luluh yang terjadi pada suatu material jika tegangan desain melebihi kekuatan Luluhnya.

INDEKS

- amplitudo, viii, 34
bainit, 36
batas butir, 17
bech mark, 22
bending, 47
crack, iv, 8, 19, 20, 21, 25
crack initiation, 21, 25
crack propagation, 21, 25
CT, 52
da/dN, viii, 21, 37, 39, 50,
51, 54
deformasi, 26, 33, 41
dekarburisasi, 33
diskontinyu, 5, 6
dislokasi, 17
Distribusi tegangan, 34
ekstrusi, 26, 27
Elektroplating, 33
endurance limit, 29
energi, 23, 47
faktor bentuk, 19, 20, 46
faktor konsentrasi tegangan,
9, 11, 12, 30
fatigue, 2, 22, 24, 25, 26, 28,
29, 30, 31, 32, 33, 34, 35,
36, 37, 40, 41, 42, 43, 44,
49, 50
fatigue limit, 29, 30
ferit, 36, 50
ferrous alloy, 28
flame hardening, 33
fluktuasi, 25, 26
fracture mechanics, ii, 3, 18,
19, 20, 37, 44, 50, 51
frekuensi, 8
heterogen, 6, 7
homogen, 5, 6
impuritis, 17
induksi, 33
integrasi, 54
intrusi, 26, 27
isotropi, 5, 6
karburisasi, 33
Kc, viii, 48
konstruksi, ii, 1, 2, 6, 8, 25,
29, 48
kontinyu, 5
korosif, 25
Kurva S-N, 29
LEFM, 2, 44
level tegangan, 19, 20
makro, 1, 17, 20, 21, 41
martensitik, 51
material, 1, 2, 5, 6, 7, 17, 20,
21, 22, 23, 29, 31, 32, 35,
36, 37, 47, 49, 50, 51, 52
Matriks, 6
mekanika, ii, 1, 2, 3, 5, 7, 12,
15, 44
Metalurgi, ii, v, 35
mikro, 1, 17, 21, 36
Modus I, 13, 18
Modus II, 14, 19
Modus III, 15, 20

multiorigin, 41
nitridasi, 33
nonfero, 35
Notch, iv, 7
perlit, 36, 50
Permukaan patah, 22, 41, 43
plastis, 3, 26, 33, 41, 44
polish, 32
poros, 22, 41
radius, 7, 8, 31
segregasi, 17
sigmoidal, 51
Siklus, iv, viii, 28
spheroidal microstructure,
36
Stress, iv, v, viii, 11, 22, 30,
34, 44, 46, 47, 52
Stress intensity factor, 46, 47
surface hardening, 32
Tegangan nominal, 11, 46
Tegangan sisa, 33
ultimate strength, 48
anisotropi, 6, 7
vakansi, 17
yield strength, 48