

# FRAKTURE MECHANICS

( MEKANIKA RETAKAN )

MILIK PERPUSTAKAAN IKIP PADANG	
30 OCT 1997	
DITERIMA TGL. :	K. I
SUMBER / HARGA :	K. K. I
KOLEKSI :	1795/K/97-80 (2)
NO. INVENTARIS :	620.112 6 61a
KLASIFIKASI :	

Oleh : Drs. M. Giatman, MSc

Disampaikan Pada

Seminar / Disseminasi Jurusan Pendidikan Teknik Bangunan

FPTK - IKIP PADANG

Tanggal 27 Desember 1994

MILIK UPT PERPUSTAKAAN  
IKIP PADANG

## FRACTURE MECHANICS (MEKANIKA RETAKAN)

=====

### I. PENDAHULUAN

Fracture Mechanics adalah salah satu bahagian dari ilmu mekanika yang relatif baru saja berkembang, walaupun filosofi dasarnya telah diketahui semenjak abad XV melalui eksperimen da-Vinci tentang hubungan perpenjangan kawat, beban patah dan tegangan patah (fracture stress). Namun pengembangan analisis kuantitatifnya baru pertama kali dikembangkan oleh A. Griffith tahun 1922.

Menyadari masih mudanya ilmu tersebut, wajar bila pengertian atau terjemahan Fracture Mechanics di Indonesia masih beragam. Ada yang memberi terjemahan Mekanika Perpatahan, Mekanika Hancur dan lain sebagainya. Namun Mardjono Siswosumarno telah menegaskan bahwa terjemahan yang tepat adalah "Mekanika Retakan". Dasar pemikiran bahwa yang aibahas adalah komponen yang retak, dan bukan komponen yang patah atau hancur. Salah satu tujuan mekanika retak adalah untuk mengetahui kekuatan yang tersisa pada komponen atau peralatan akibat adanya retakan.

Dalam prakteknya, retakan dapat terjadi oleh beberapa sebab, a.l: - akibat proses pengerjaan yang tidak sempurna, misalnya waktu pengecoran atau pengelasan  
- tegangan yang bekerja selama beroperasi, khususnya bila tegangan berfluktuasi, maka pada komponen dapat terjadi retak lelah.

Oleh karena itu inspeksi menjadi sangat penting guna mendeteksi retakan yang terjadi, untuk selanjutnya dilakukan perhitungan kekuatan yang tersisa (residual strenght). Perhitungan kekuatan yang tersisa inilah yang harus menggunakan ilmu mekanika retakan (Fracture Mechanics).

Dari hasil perhitungan kekuatan sisa tersebut muncul tiga alternatif :

1. Apakah komponen masih dapat dipakai ? berapa lama ? apakah masih boleh dengan beban penuh atau tidak ?
2. Apakah dapat diperbaiki dengan penguatan ? atau harus ganti dengan komponen baru ?
3. Apakah laju perambatan lelah dapat diketahui ? bila ya, maka dapat dihitung interval inspeksi yang aman.

### II. APLIKASI MEKANIKA RETAKAN

Sebetulnya mekanika retakan ini banyak manfaatnya dalam rangka mengantisipasi terjadinya kegagalan berfungsinya komponen dari suatu peralatan, mesin ataupun konstruksi. Karena komponen yang tidak berfungsi dengan baik dapat mengakibatkan keru-

sakan / kecelakaan dan bahkan juga bisa mengancam jiwa manusia. Apabila hal ini bisa diantisipasi, maka jelas banyak uang yang terselamatkan / diamankan, karena kecelakaan / kehancuran dapat dihindarkan, terutama lagi bila menyangkut nyawa manusia yang seyogyanya tidak dapat diukur dengan uang.

Untuk mengantisipasinya diperlukan beberapa parameter penting, yang akan diperoleh meluasi suatu sistem inspeksi serta analisis tertentu yang mungkin sulit dan mahal. Sehingga penerapan akan sangat tepat dan efisien dalam rangka pengamanan investasi-investasi besar atau berbahaya serta rentan dengan kecelakaan, contoh Pesawat terbang, Turbin, Pabrik, instalasi-instalasi gas, ketel-ketel bertekanan tinggi, serta konstruksi yang bersifat dinamis lainnya.

Khusus untuk bidang teknik sipil, peluang untuk diterapkan ada memang, seperti pada konstruksi-konstruksi bendungan, jembatan atau struktur bangunan gedung. Namun demikian analisis yang ada saat ini belum dapat diaplikasikan langsung pada konstruksi diatas, karena struktur elemen materialnya bersifat heterogen dan bukan homogen seperti komponen-komponen mesin yang sebagian besar terbuat dari logam atau baja. Analisis yang ada baru untuk struktur material homogen sehingga perlu usaha pengembangan alat analisis lebih lanjut.

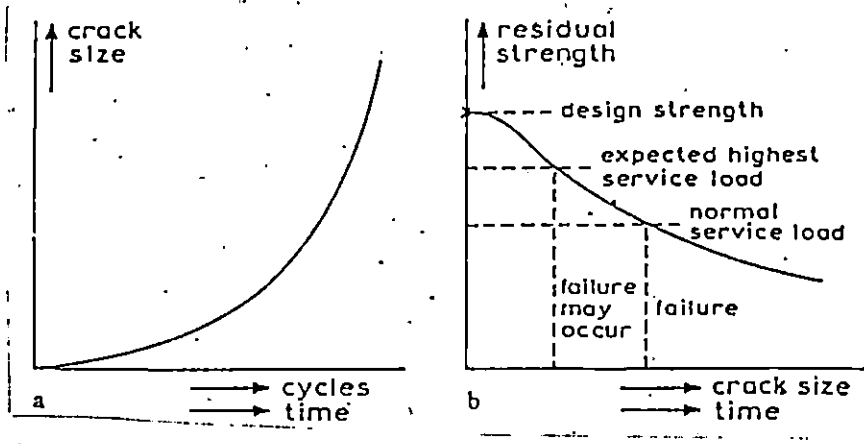
### III. KONSEP DASAR MEKANIKA RETAKAN

#### 1. Kekuatan Komponen / Konstruksi yang Retak.

Pada mekanika klasik, kita mengenal mekanika teknik (Engineering Mechanics) dan ilmu kekuatan material (strength of materials), kita mempelajari dan menghitung tegangan dan kekuatan komponen ataupun konstruksi yang utuh, yang tidak retak. Hal ini didasarkan pada asumsi-asumsi yang diambil, yaitu material bersifat kontinu, homogen dan isotrop. Kalaupun ada perbedaan dimensi pada komponen, perubahannya gradual, sehingga masih tergolong kontinu. dengan demikian tegangan lokal dapat dihitung dengan memakai faktor konsentrasi tegangan  $K_t$ .

Keamanan pengoperasian konstruksi / peralatan / komponen adalah tujuan utama yang harus dicapai. Cacat yang mungkin terjadi pada proses pembuatan ataupun terjadi pada saat pengoperasian bisa merambat. Sehingga perlu dipertanyakan apakah suatu konstruksi / komponen yang cacat tersebut dengan ukuran tertentu masih aman. Untuk itu perlu dipakai perhitungan-perhitungan yang didasarkan pada mekanika retakan.

Bila retakan merambat, maka jelaslah kekuatan konstruksi akan menurun, hal ini dapat dijelaskan pada gambar 1. Bila retakan membesar, maka konstruksi yang tadinya aman, akan menjadi tidak aman, dalam arti mungkin akan gagal dalam operasi atau bahkan pasti gagal bila ukuran retakan telah demikian besar.



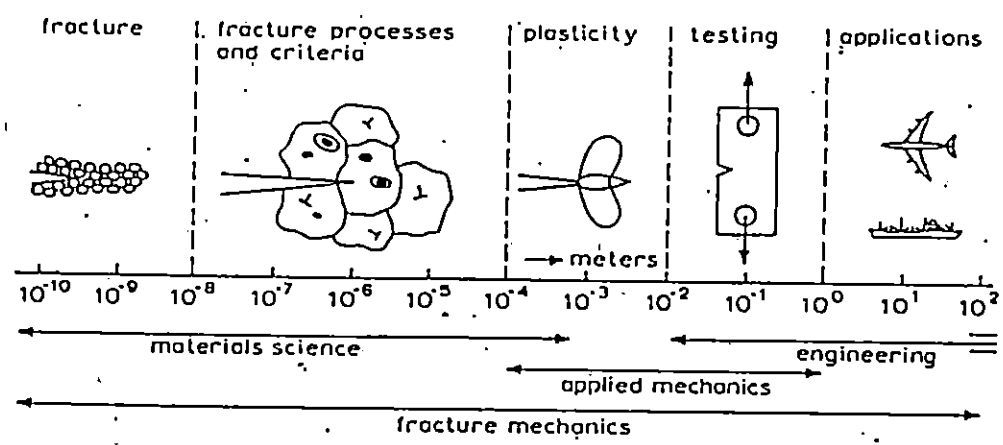
Gb.1. Perambatan retak dan pengaruhnya terhadap kekuatan sisa.

Untuk mengetahui kondisi dari komponen / konstruksi yang retak dapat diajukan pertanyaan-pertanyaan berikut :

- a) Berapakah kekuatan sisa sebagai fungsi ukuran retakan
- b) Berapakah ukuran retakan yang masih diizinkan agar konstruksi dapat beroperasi dengan aman ?
- c) Berapa waktu yang diperlukan oleh retakan untuk merambat hingga mencapai ukuran kritis ?
- d) Berapa besar ukuran retak awal atau cacat bawaan yang diizinkan ?
- e) Berapa lamakah interval pemeriksaan / inspeksi untuk mendeteksi retakan ?

2. Bidang yang Terkait dengan Mekanika Retakan.

Rentang ilmu mekanika retakan ini cukup lebar, mulai dari orde ikatan atom yang berukuran Angstrom sampai orde retakan berukuran millimeter dan bahkan orde meter dalam konstruksi besar. Oleh karena itu berbagai bidang ilmu akan terkait dengan mekanika retakan, yaitu ilmu material, mekanika terapan dan ilmu rekayasa. Dan secara schematik dapat dilihat pada gambar 2.



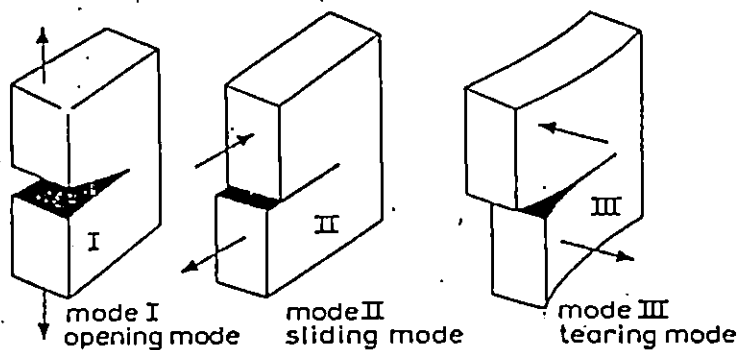
Gb.2. Cakupan Mekanika Retakan

### 3. Modus Pembentukan Retakan.

Modus terjadinya retakan yang berkaitan erat dengan modus pembebanan dimana dapat dibagi tiga, yaitu :

- Modus pembukaan (opening mode) akibat tegangan tarik
- Modus pergeseran (sliding mode) akibat tegangan geser sebidang. (in-plane shear)
- Modus penyobekan (tearing mode) akibat tegangan geser tidak sebidang.

Yang paling sering terjadi didalam praktek adalah modus I, yaitu pembukaan retak akibat tegangan normal tarik. Ketiga modus tersebut dilukiskan pada gambar 3.



Gb.3. Modus Retakan

### 4. Faktor Intensitas Tegangan..

Sebagaimana telah dijelaskan sebelumnya bahwa dalam mekanika klasik bahwa kita mempelajari dan menghitung tegangan dan kekuatan komponen ataupun konstruksi yang utuh, yang tidak retak dengan asumsi antara lain material bersifat homogen dan kontinu. Sehingga tegangan lokal dapat dihitung dengan memakai faktor konsentrasi tegangan  $K_t$  (gambar 4.a).

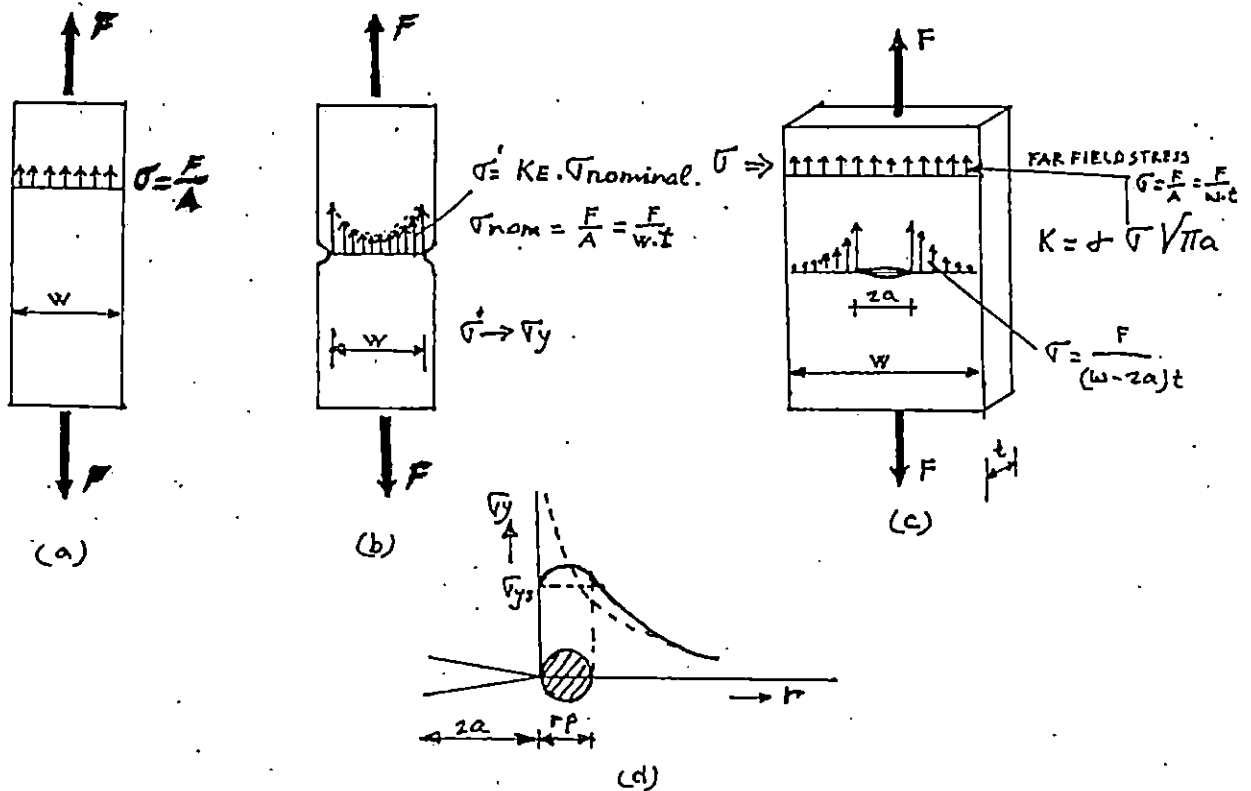
Bila terjadi retak atau celah kecil tajam pada bahagian komponen, maka pada ujung retak memiliki radius yang tajam, mendekati nol. Oleh karena itu tegangan ujung retakan tidak boleh dihitung dengan faktor konsentrasi tegangan  $K_t$ .

Untuk menggambarkan medan tegangan didaerah ujung retakan, perlu digunakan faktor intensitas tegangan (stress intensity factor)  $K$ . Secara umum dapat dikatakan bahwa besarnya faktor intensitas tegangan tergantung pada tegangan yang diberikan, panjang retakan serta geometri komponen, pembebanan dan geometri retakan (gambar 4.b.c).

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

$\alpha$  - faktor

$\sigma$  - far field stress



Gb. 4. diagram tegangan untuk komponen utuh dan komponen retak

Dalam mekanika retakan, konsep tegangan yang digunakan adalah tegangan yang bekerja pada lokasi yang jauh dari retakan (far field stress). Faktor intensitas tegangan  $K$  untuk berbagai kondisi dapat dilihat lampiran 1. Perlu diketahui bahwa faktor intensitas tegangan memiliki satuan  $N/mm^{3/2}$  atau  $MPa\sqrt{m}$  atau  $ksi\sqrt{in}$  atau satuan lain yang setara.

### 5. Ketangguhan Retakan (Fracture Toughness).

Komponen yang retak akan patah bila faktor intensitas tegangan yang terjadi mencapai harga kritis dari material.

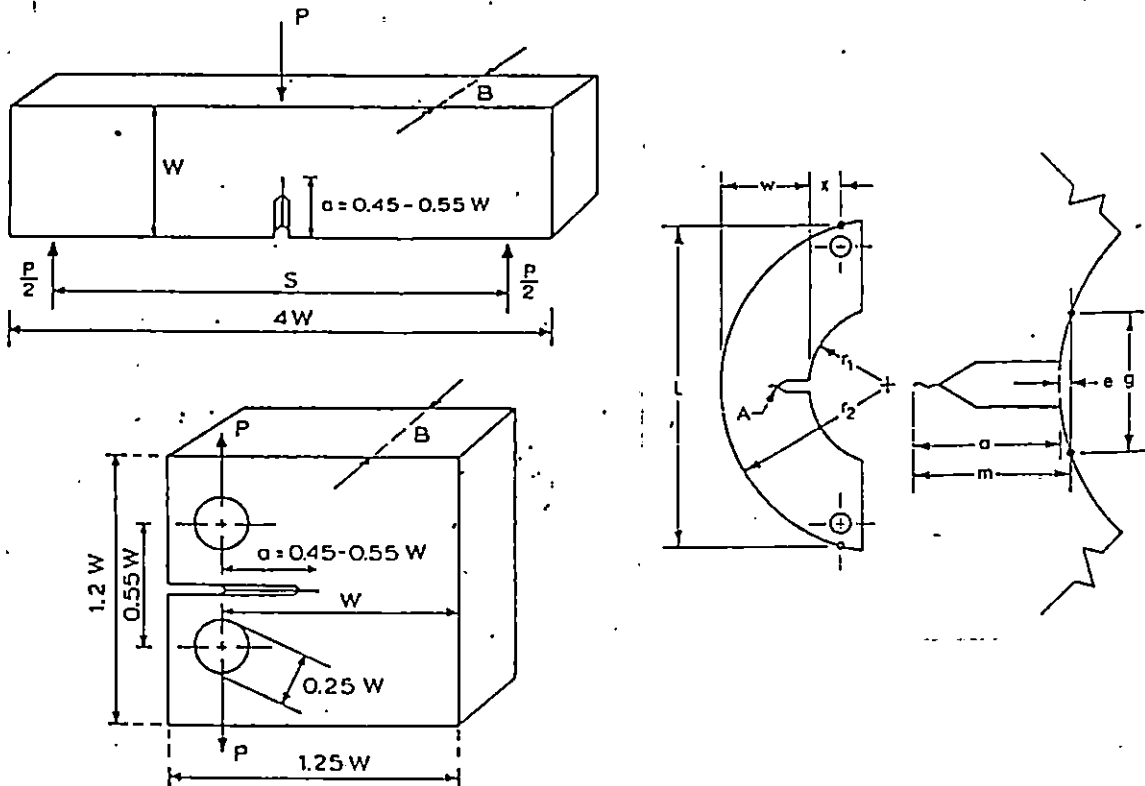
$$\begin{aligned}
 K &\approx K_c \quad \text{atau} \\
 K &\approx K_{Ic} \quad \text{atau} \\
 K &= \sigma \sqrt{\pi a} \approx K_{Ic}
 \end{aligned}$$

$K_c$  dan  $K_{Ic}$  adalah angka ketangguhan retakan (fracture toughness) dari material.  $K_c$  untuk kondisi tegangan bidang (plane stress), sedangkan  $K_{Ic}$  untuk regangan bidang (plane strain) dengan modulus I, yaitu modulus pembukaan retak.

Persamaan diatas pada hakekatnya menunjukkan kaitan antara tegangan yang bekerja ( $\sigma$ ), panjang retakan ( $a$ ) yang biasanya terdeteksi pada saat inspeksi dengan NDT. dengan sifat material ( $K_{Ic}$ ). Satuan untuk fracture toughness adalah sama seperti faktor intensitas tegangan.

K<sub>c</sub> dan K<sub>Ic</sub> adalah sifat material yang nilainya diperoleh dari pengujian. metoda dan prosedur pengujian untuk mendapatkan plane strain fracture toughness telah distandardkan, khususnya ASTM.

Diketahui tiga bentuk spesimen standard yang dipakai, yaitu spesimen lentur, spesimen tarik kompak (CTS = compact tension specimen) dan spesimen C. Spesimen C hanya dipakai untuk mendapatkan kondisi yang meniru silinder / bejana tekan. Yang paling sering digunakan adalah CTS, baru kemudian menyusul spesimen lentur, seperti yang terlihat pada gambar 5.



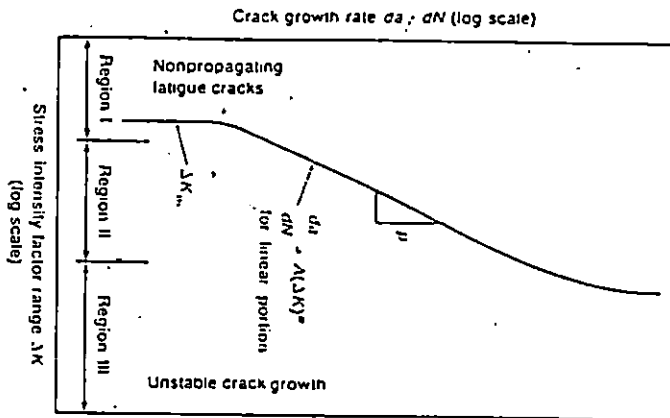
Gb.5. Bentuk Spesimen Standard

## 6. Perambatan Retak Lelah.

Tegangan yang berfluktuasi dapat menyebabkan terjadinya retak lelah. Laju perambatan retak lelah tergantung pada fluktuasi faktor intensitas tegangan yang disebut dengan stress intensity range  $\Delta K$  :

$$\Delta K = \alpha (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) \sqrt{\pi a}$$

Artinya, laju perambatan retak lelah tergantung pada amplitudo tegangan ( $\sigma_{\max} - \sigma_{\min}$ ) serta panjang retakan ( $a$ ) yang terjadi, bentuk umum kurva laju perambatan retak ditunjukkan pada gambar 6.



Gb.6. Sekema laju perambatan retakan.

Peristiwa penjalaran retak lelah dapat dibagi menjadi tiga tahap. tahap I adalah terjadinya awal retakan (crack initiation). Tahap II yang nampak linier pada diagram log-log, sering didekati dengan persamaan hukum paris sebagai berikut :

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

Konstanta  $p$  tergantung pada jenis material: untuk baja  $p = 3$  dan untuk aluminium 3-4. Kumpulan data laju perambatan retak lelah yang sangat lengkap tersedia pada Military Handbook.

Tahap III merupakan daerah perambatan retak yang sangat cepat. Dalam praktek adalah hampir tidak mungkin untuk mendeteksi awal terjadinya retak lelah tahap I. sebaliknya retak lelah terdeteksi pada tahap II, sehingga dapat diambil putusan mengenai tindak lanjut yang harus dilakukan.

#### IV. STUDI KASUS

##### 1. Kasus Retakan pada Komponen Struktur Pesawat Terbang.[6]

Contoh pertama adalah menyangkut komponen struktur pesawat terbang, yaitu *upper longeron* pada *fuselage*. *Longeron* yang terbuat dari paduan Aluminium 7075 T6 tersebut ditemukan retak sepanjang 3 mm mulai dari salah satu lubangnya. Retakan tersebut terdeteksi pada saat inspeksi. Gambar pada Lampiran 3 menunjukkan secara detail retakan tersebut, yaitu yang diamati dengan dye penetrant yang disinari dengan ultra-violet.



*Maintenance & inspection manual* dari pesawat yang bersangkutan menyatakan bahwa bila komponen tersebut mengalami retak, berapa pun ukurannya, pesawat harus dinyatakan tidak laik terbang. Oleh karena itu komponen yang retak tersebut harus diganti dengan yang baru.

Selanjutnya dari pihak operator pesawat muncul dua pertanyaan. Yang pertama adalah berapa besarkah manuver pesawat yang akan mematahkan komponen yang retak tersebut. Pertanyaan kedua adalah berapa lamakah retakan tersebut merambat hingga mencapai panjang retak kritis untuk manuver yang biasa pada operasi rutin.

Kedua pertanyaan tersebut muncul dari pemikiran andaikan retakan tersebut tidak terdeteksi, sehingga pesawat akan terus dioperasikan secara normal. Bahaya apakah yang akan timbul andaikata pesawat tersebut bermanuver pada berbagai *G-force*. Kedua pertanyaan tersebut dimunculkan agar jawabannya justru menekankan pentingnya inspeksi. Uraian berikut ini hanya akan membahas langkah-langkah pendekatan yang digunakan dalam analisis kasus tersebut:

1. Karena data mengenai aircraft load maupun beban pada komponen tersebut tidak mungkin diperoleh dari pihak manufacturer, maka langkah pertama adalah memperkirakan tegangan kritis yang terjadi akibat *G-force* maksimum yang akan membuat komponen yang baru akan patah.
2. *G-force* maksimum (*ultimate G-force*) tersebut dianggap akan mematahkan komponen baru, yaitu komponen yang diasumsikan memiliki cacat kecil sebesar 0,5 mm yang baru akan terdeteksi dengan teknik *eddy current*. Pada kondisi ini intensitas tegangan yang terjadi akan mencapai harga *fracture toughness* dari material 7075 T6.
3. Menurut David Broek [7], faktor intensitas tegangan untuk komponen yang diberi beban tarik dan dengan retakan di tepi lubang adalah:

$$K = \sigma \sqrt{(\pi a_{\text{eff}})}$$

$$2 a_{\text{eff}} = a + D$$

dimana: D = diameter lubang  
a = panjang retakan.

Persamaan diatas dapat ditulis sebagai berikut:

$$K = \alpha \sigma \sqrt{(\pi a)}$$

$$\alpha = \sqrt{\{1/2 + D/(2a)\}}.$$

4. Harga  $K_{Ic}$  paduan Al 7075 T6 dalam arah L-T dapat dicari pada referensi: Boeing, "Damage Tolerance, Methods and Allowables" [8], yaitu sebesar 26ksi $\sqrt{\text{in}}$  atau 28,6 MPa $\sqrt{\text{m}}$ .
5. Dari penggabungan butir 3 dan 4 akan diperoleh tegangan kritis yang akan mematahkan komponen yang diasumsikan memiliki cacat retak kecil sebesar 0,5 mm.
6. Dengan cara yang analog dihitung tegangan kritis yang akan merontokkan komponen yang telah retak sepanjang 3 mm.
7. Selanjutnya sebagai pendekatan diasumsikan bahwa tegangan yang bekerja pada komponen tersebut berbanding-lurus dengan *G-force* dari manuver. Dengan asumsi ini diperoleh jawaban terhadap pertanyaan pertama, yaitu besarnya *G-force* terbesar yang akan mematahkan komponen yang retak 3 mm tersebut.

Untuk menjawab pertanyaan kedua mengenai umur lelah komponen dilakukan langkah-langkah perhitungan sebagai berikut:

8. Mengasumsikan bahwa amplitudo tegangan yang bekerja adalah konstan, termasuk pula stress ratio R yang dikaitkan dengan tingkat manuver.
9. Data laju perambatan retak lelah Al 7075 T6 diambil dari Military Handbook.[5]. Selanjutnya dari kurva  $da/dN$  vs.  $\Delta K$  tersebut dan persamaan  $da/dN = C (\Delta K)^P$  serta harga stress ratio R, dicari harga konstanta C dan p.
10. Jumlah siklus pembebanan yang akan menaikkan panjang retak dari  $a_i$  ke  $a_f$  dihitung dengan persamaan berikut:[4]

$$N_f = 1 / (A \sigma_i^p \pi^{p/2}) \int_{a_i}^{a_f} \alpha^{-p} a^{-p/2} da$$

Integrasi dengan harga  $\alpha = \sqrt{\{1/2 + D/(2a)\}}$  diperoleh:

$$N_f = \{(a_f + D)^{-(p/2)+1} - (a_i + D)^{-(p/2)+1}\} / \{(-p/2 + 1) (\pi/2)^{p/2} A \sigma_r^p\}$$

11. Dengan persamaan diatas dihitung jumlah siklus yang akan mengakibatkan panjang retakan bertambah dengan peningkatan (*increment*) sebesar 0,5 mm, sampai mencapai panjang retak kritis. Dengan cara ini diperoleh jumlah siklus yang akan mencapai panjang retak tertentu.

Perlu pula dikemukakan disini bahwa sulit sekali mengkonversikan jumlah siklus pembebanan menjadi jam terbang. Hal ini sangat tergantung pada kondisi terbangnya. Selain itu perlu pula dicatat bahwa dalam perhitungan ini digunakan asumsi bahwa amplitudo tegangan adalah konstan. Asumsi ini sangat berbeda dengan kondisi terbang yang sebenarnya.

Namun demikian, yang penting dari analisis ini adalah bahwa operator pesawat telah mendapatkan jawaban terhadap kedua pertanyaan. Dengan jawaban yang bersifat kuantitatif tersebut bertambahlah keyakinan operator mengenai pentingnya inspeksi yang dilakukan dengan cara yang tepat dan pada waktu yang juga tepat.

### 3.2. Kasus Kegagalan Poros Roda Kereta Api.[9]

Suatu roda kereta api patah pada bagian di dekat bantalan rol (*roller bearing*). Permukaan patahnya ditunjukkan pada Lampiran 4. Secara visual pada permukaan patahan kelihatan garis-garis pantai (*beach marks*). Secara tegas dapat disimpulkan bahwa modus kegagalannya adalah patah lelah (*fatigue failure*). Dalam kondisi yang semuanya wajar atau normal poros kereta api tidak akan mengalami patah lelah. Hal ini dapat dibuktikan dengan perhitungan tegangan berdasarkan ilmu mekanika teknik. Selanjutnya diperiksa apakah tegangan bolak balik tersebut masih lebih kecil daripada batas lelah (*fatigue limit*) material. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa pada kondisi normal poros tersebut memang seharusnya tidak akan patah lelah.

Pertanyaannya sekarang adalah apa yang menyebabkan poros tersebut patah lelah. Pertanyaan berikutnya adalah apakah kegagalan semacam ini dapat dicegah dengan melakukan inspeksi.

Secara ringkas langkah yang dilakukan pada analisis kegagalan tersebut adalah sebagai berikut:

1. Pemeriksaan pada komponen-komponen yang berhubungan dengan poros tersebut, terutama *roller bearing*. Ternyata pada bantalan ada tanda *overheating*.

2. *Overheating* inilah yang menyebabkan kenaikan temperatur poros secara lokal, sehingga kekuatan poros menurun, sehingga mengalami retak lelah dan akhirnya patah. Namun demikian, dugaan ini harus dibuktikan dengan pemeriksaan lebih lanjut.

3. Informasi yang perlu dicari adalah berapakah temperatur yang pernah dicapai oleh bantalan dan bagian poros di dekatnya. Hal ini dapat dilacak secara tidak langsung dengan pengukuran kekerasan bantalan yang terbuat dari baja tahan karat martensitik AISI 440C. Pemanasan akan mengakibatkan efek tempering, yaitu berupa penurunan kekerasan material. Dari diagram tempering AISI 440C dan data angka kekerasan bantalan yang mengalami *overheating* dapat diketahui temperatur yang pernah dicapainya, yaitu sampai sekitar 560 °C.

4. Diasumsikan bahwa bagian poros yang dipegang oleh bantalan itu pun juga pernah mencapai temperatur yang sama. Dari sini dapat diketahui penurunan kekuatan baja poros, termasuk kekuatan tarik dan batas lelehnya. Dengan ini terbukti bahwa tegangan bolak-balik yang bekerja memang melampaui batas leleh material pada temperatur tinggi; sehingga akan terjadi retak leleh dan akhirnya patah.

Pertanyaan kedua menyangkut berapa lamakah retak leleh tersebut menjalar hingga mencapai panjang retak kritis dan akhirnya patah. Untuk menjawab pertanyaan tersebut dilakukan analisis sebagai berikut:

5. Tegangan yang bekerja adalah bolak-balik ( $R = -1$ ) dengan amplitudo tegangan yang praktis dapat dianggap konstan. Dengan data laju perambatan retak leleh dan besarnya tegangan bolak-balik yang bekerja dapat dihitung jumlah siklus yang menyebabkan awal retak leleh menjalar hingga mencapai panjang kritis.

6. Dengan data lintasan serta peredaran kereta, jumlah siklus tersebut dapat dikonversikan menjadi jarak tempuh total dan jumlah hari operasi. Hasilnya adalah bahwa perambatan retak leleh tersebut berlangsung selama 11 hari operasi.

7. Dari hasil perhitungan tersebut dapat disimpulkan bahwa sebenarnya tersedia waktu untuk memeriksa barangkali ada bantalan yang panas, yaitu dengan cara menyentuh atau memegang rumah bantalan pada saat kereta berada di depo. Andaikan deteksi awal berupa pengamatan kemungkinan adanya *overheating* dilakukan, maka ketidak-normalan itu segera terdeteksi. Tindak lanjut yang seharusnya dilakukan adalah inspeksi NDT dengan teknik ultrasonik untuk mendeteksi retakan pada poros, atau pun cacat pada bantalan. Bila rangkaian inspeksi ini dilakukan, maka kegagalan poros pada saat beroperasi dapat dihindarkan.

8. Kesimpulan lainnya adalah bahwa sumber penyebab *over-heating* pada bantalan adalah kegagalan pelumasan.

KISS → Keep it simple, stupid.

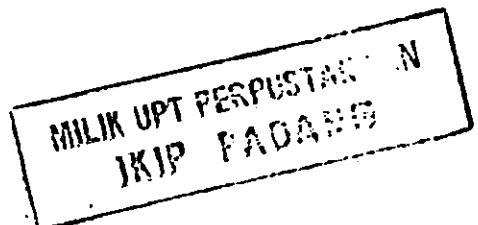
## V. KESIMPULAN

Dari uraian diatas dapat ditarik beberapa kesimpulan :

1. Mekanika Retakan (fracture mechanics) sangat penting dalam rangka mengamankan kemungkinan konstruksi/komponen dari kegagalan/kehancuran atau kecelakaan yang fatal.
2. Dalam menerapkan mekanika retakan hendaknya diketahui data mengenai beban yang bekerja pada komponen/konstruksi, lokasi geometri retakan, serta data material.
3. Dengan perhitungan analisis dapat diperoleh panjang retak kritis, jumlah siklus beban yang diperlukan untuk membuat perambatan retak lelah dalam panjang tertentu.
4. Analisis kegagalan yang ditunjang dengan penerapan mekanika retakan akan memberikan hasil dan kesimpulan yang bersifat kuantitatif, sehingga dapat membantu proses pengambilan keputusan dalam menentukan tindak lanjut terhadap kasus kegagalan.
5. Khusus untuk aplikasi dalam bidang konstruksi teknik sipil masih diperlukan pengembangan teknik analisis lebih lanjut.

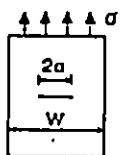
## REFERENSI

1. S. Madjono, "Penerapan Mekanika Retakan pada Analisis Kegagalan", Bahan Seminar Fracture Mechnics, UDA-JICA, Medan 1994.
2. -----, "Analisis kegagalan:metoda dan mekanisme". Bahan seminar Fracture Mechanics, UDA-JICA, Medan, 1994.
3. -----, "Aspek Metalurgi pada Kelelahan Logam", KBK Teknik Produksi dan Material. Jurusan Teknik Mesin-ITB,1986.
4. Nakagaki, "Introduction of Fracture mechanics", Bahan seminar Fracture Mechanics, UDA-JICA, Medan, 1994.
5. Lai. M.O., "Factors Affecting K<sub>Ic</sub> and Fracture Mechanism". Bahan seminar Fracture Mechanics, UDA-JICA, Medan. 1994.

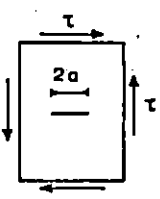


1/295/c/97 (a)

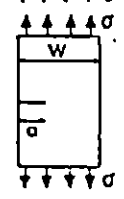
Lampiran 1:



$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \left( \sec \frac{\pi a}{W} \right)^{1/2}$$



$$K_{II} = \tau \sqrt{\pi a} \left( \text{small } \frac{a}{W} \right)$$

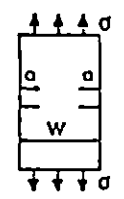


$$K_I = 1.12 \sigma \sqrt{\pi a} \left( \text{small } \frac{a}{W} \right)$$

or  $K_I = Y \sigma \sqrt{a}$

with  $Y = 1.99 - 0.41 \frac{a}{W} + 18.7 \left( \frac{a}{W} \right)^2 - 38.48 \left( \frac{a}{W} \right)^3 + 53.85 \left( \frac{a}{W} \right)^4$

(1.99 = 1.12 \* sqrt(pi))

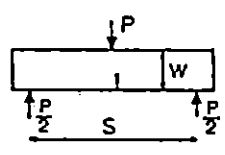


$$K_I = 1.12 \sigma \sqrt{\pi a} \left( \text{small } \frac{a}{W} \right)$$

or  $K_I = Y \sigma \sqrt{a}$

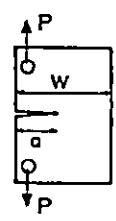
with  $Y = 1.99 + 0.76 \frac{a}{W} - 8.48 \left( \frac{a}{W} \right)^2 + 27.36 \left( \frac{a}{W} \right)^3$

(1.99 = 1.12 \* sqrt(pi))



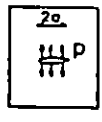
Thickness B

$$K_I = \frac{PS}{BW^{3/2}} \left[ 2.9 \left( \frac{a}{W} \right)^{1/2} - 4.6 \left( \frac{a}{W} \right)^{3/2} + 21.8 \left( \frac{a}{W} \right)^{5/2} - 37.6 \left( \frac{a}{W} \right)^{7/2} + 38.7 \left( \frac{a}{W} \right)^{9/2} \right]$$



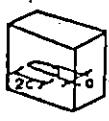
Thickness B

$$K_I = \frac{P}{BW^{1/2}} \left[ 29.6 \left( \frac{a}{W} \right)^{1/2} - 185.5 \left( \frac{a}{W} \right)^{3/2} + 655.7 \left( \frac{a}{W} \right)^{5/2} - 1017 \left( \frac{a}{W} \right)^{7/2} + 63.9 \left( \frac{a}{W} \right)^{9/2} \right]$$



p per unit thickness

$$K_I = p \sqrt{\pi a}$$



$$K_{I_{max}} = 1.12 \frac{\sigma}{\phi} \sqrt{\pi a}$$

$$K_{I_{max}} = 1.12 \frac{\sigma}{\phi} \sqrt{\pi a^2 / c}$$

$$\phi = \int_0^{\pi/2} \left[ 1 - \frac{c^2 - a^2}{c^2} \sin^2 \varphi \right] d\varphi$$

$$\phi \approx \frac{3\pi}{8} + \frac{\pi}{8} \frac{a^2}{c^2}$$

Faktor intensitas tegangan untuk beberapa kondisi dan geometri.[1].