

TINJAUAN TENTANG FENOMENA PERAMBATAN RETAK DINAMIK

Husaini *
Djoko Suharto **

ABSTRAK

Fenomena retak lelah dan retak dengan beban kuasistatik sudah menjadi konsep yang mapan dan telah digunakan dalam perhitungan rekayasa. Sebaliknya, fenomena retak cepat (*fast fracture*) masih belum banyak diketahui dan merupakan bidang penelitian baru. Tulisan ini merupakan rangkuman dari penelitian-penelitian dibidang ini. Tujuannya adalah membuat suatu pembahasan yang sistematis sehingga konsep dan parameter-parameter retak cepat ini dengan mudah dapat dimengerti.

I. PENDAHULUAN

Dalam ilmu mekanika retak dikenal parameter intensitas tegangan (K_I) yang memberikan gambaran medan tegangan di ujung retak dan ketangguhan retak (*fracture toughness*) K_{Ic} yang merupakan sifat ketangguhan retak material. Kedua parameter ini sudah dikenal dan digunakan dalam analisis pembebanan statik atau kuasi-statik. Pada kondisi pembebanan lelah, parameter yang dikenal adalah da/dN terhadap ΔK . Kedua parameter ini menunjukkan perubahan panjang retak (a) terhadap perubahan jumlah siklus pembebanan (N) pada kisaran intensitas tegangan tertentu (ΔK). Grafik da/dN terhadap ΔK menggambarkan laju perambatan retak karena beban lelah. Kedua konsep mekanika retak ini, baik untuk beban statik maupun beban lelah merupakan konsep yang telah mapan.

Fenomena retak yang lain, yaitu retak cepat (*fast fracture*) atau disebut sebagai perambatan retak dinamik belum banyak dikenal dan masih menjadi ajang penelitian. Peneliti yang dikenal dalam bidang ini antara lain adalah Kanninen (1974), Gate (1978,1980), Crosley dan Ripling (1977,1980) serta Kalthoff (1976, 1977, 1980, 1982 dan 1987). Karena mereka menggunakan sistem pembebanan, pengukuran dan material yang berbeda, maka fenomena yang diketemukannya pun berbeda pula. Beberapa parameter yang menggambarkan karakteristik retak dinamik adalah faktor intensitas tegangan dinamik, faktor ketangguhan penahanan retak dinamik dan statik, serta beberapa parameter yang lain. Pada makalah ini ditinjau hasil-hasil penelitian tersebut dan dicoba untuk merangkum menjadi suatu pembahasan yang sistematis sehingga karakteristik retak cepat ini dengan mudah dapat dipahami.

Sebagai tambahan informasi, fenomena retak cepat ini diminati oleh para peneliti pada bidang mekanika struktur

dalam teknologi reaktor nuklir (SMiRT 11, 1991) terutama pada struktur bejana tekan. Sampai saat ini standar yang dikeluarkan oleh ASTM (1988) adalah untuk menentukan faktor ketangguhan penahanan retak berdasarkan pendekatan statik. Oleh karena itu fenomena retak cepat (*fast fracture*) merupakan bidang penelitian yang masih terbuka.

II. PENDEKATAN STATIK DAN DINAMIK PADA RETAK CEPAT

Konsep retak cepat sekarang ini masih dalam pengembangan, dan secara umum parameter-parameter untuk mengkarakteristikan proses retak cepat belum ditetapkan (Kalthoff et.al,1977 dan Kobayashi et.al,1978). Parameter tersebut notasinya tidak sama antara satu peneliti dengan yang lain, sehingga dapat membingungkan para pembaca. Untuk mengetahui hal ini lebih lanjut berikut ini adalah ringkasan dari konsep retak cepat (baik pendekatan statik maupun dinamik) dari beberapa peneliti.

Gate (1980) telah mempelajari proses retak cepat pada spesimen jenis DCB (*Double Cantilever Beam*) dengan menggunakan tiga geometri yang berbeda. Parameter-parameter yang ditetapkan oleh Gate adalah:

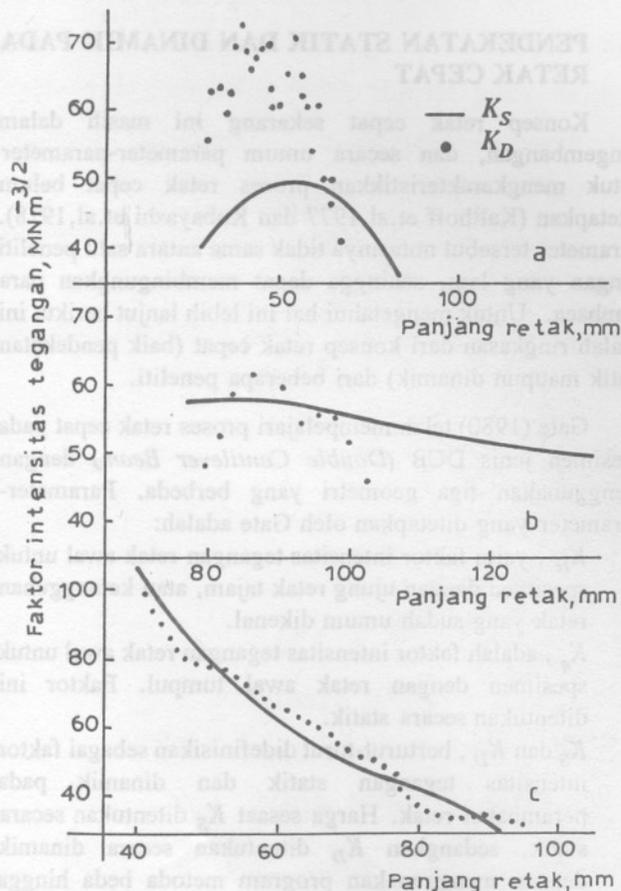
- K_{Ic} , yaitu faktor intensitas tegangan retak awal untuk spesimen dengan ujung retak tajam, atau ketangguhan retak yang sudah umum dikenal.
- K_q , adalah faktor intensitas tegangan retak awal untuk spesimen dengan retak awal tumpul. Faktor ini ditentukan secara statik.
- K_S dan K_D , berturut-turut didefinisikan sebagai faktor intensitas tegangan statik dan dinamik pada perambatan retak. Harga sesaat K_S ditentukan secara statik, sedangkan K_D ditentukan secara dinamik dengan menggunakan program metoda beda hingga (*finite difference*) satu dimensi. Metoda ini dimodifikasi oleh Gate (1978) dari program yang dikembangkan oleh Kanninen (1974).

* Staf Pengajar Jurusan Teknik Mesin FT - UNSYIAH

** Staf pengajar Jurusan Teknik Mesin FTI - ITB

- K_{Ia} , adalah ketangguhan penahanan retak dinamik, yang diperoleh secara dinamik dari K_D pada saat penahanan retak terjadi.
- K_{Ia}^+ , adalah ketangguhan penahanan retak statik, yang diperoleh secara statik dari harga K_S pada saat penahanan retak.

Data dari hasil pengujian untuk ketiga geometri spesimen tersebut ditunjukkan pada gambar 1.a, 1.b dan 1.c. Dari gambar tersebut terlihat bahwa hasil percobaan belum konsisten. Hal ini terjadi karena hubungan antara K_D dan K_S yang bergantung pada geometri spesimen dan sistem pembebanan. Pada gambar 1.a ketangguhan retak (K_{Ic}) spesimen adalah sebesar $30 \div 40 \text{ MNm}^{-3/2}$. Spesimen diberi alur pada salah satu sisinya dan juga diberi retak lelah (ujung retak spesimen tajam). Sedangkan pada gambar 1.b ketangguhan retak adalah sebesar $55 \text{ MNm}^{-3/2}$. Spesimen juga diberi retak lelah, tetapi tidak diberi alur pada sisinya. Kedua spesimen ini diberi beban tarik dengan menggunakan mesin uji tarik. Untuk spesimen yang tidak diketahui ketangguhan retaknya, dengan ujung retak tumpul dan tidak diberi alur pada sisinya, hubungan faktor intensitas tegangan terhadap panjang retak ditunjukkan pada gambar 1.c. Pembebanan pada spesimen ini menggunakan beban pasak.



Gambar 1. Perbandingan harga K_S dan K_D pada tiga spesimen DCB dengan geometri berbeda (Gate, 1980).

Dari hasil penelitian tersebut akhirnya Gate menyimpulkan bahwa data yang diperoleh dengan sistem pembebanan pasak, secara kualitatif sama dengan yang dilaporkan oleh Kalthoff et.al (1977) untuk sistem pembebanan yang sama. Perhatikan gambar 1.c, harga K_D pada awalnya dibawah K_S kemudian harga K_D lebih besar dari pada K_S dan akhirnya turun di sekitar K_S .

Crosley dan Ripling (1977) menyatakan bahwa pada bagian awal perambatan retak regangannya naik bila kecepatan retak tinggi. Kelakuan perambatan retak seperti ini memerlukan analisis dinamik. Sedangkan pada bagian akhir perambatan retak terjadi penurunan regangan karena kecepatan retak disini turun, maka kelakuan perambatan retak disini cukup dianalisis dengan pendekatan statik. Percobaan yang dilakukan Crosley menggunakan spesimen jenis TDCB pada proses perambatan dan penahanan retak. Adapun parameter-parameter yang ditetapkan adalah:

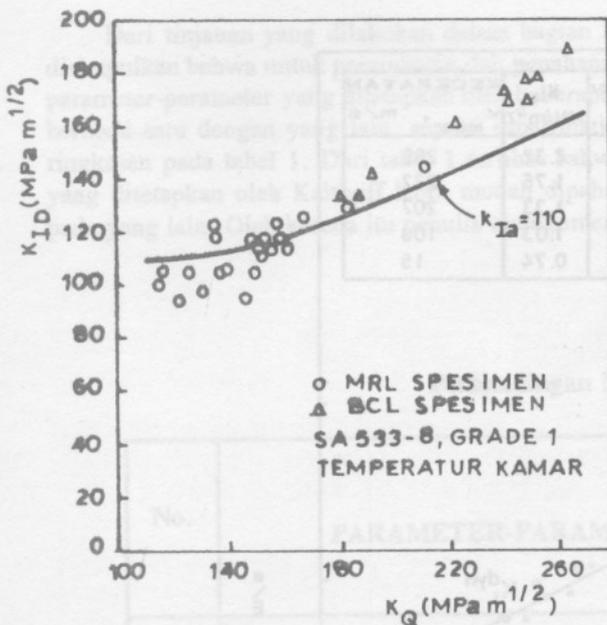
- K_{Ia} didefinisikan ketangguhan penahanan retak yaitu faktor intensitas tegangan yang ditentukan secara statik pada proses penahan retak ($K_{Ia} = K_{Ia}^{stat}$) (Crosley dan Ripling, 1977).
- K_{Im} adalah ketangguhan retak minimum yang ditentukan dengan analisis dinamik ($K_{Im} = K_{Ia}^{dyn}$) (Hahn et.al, 1972).

Selanjutnya Crosley dan Ripling menjelaskan pula, bila retaknya pendek maka faktor intensitas tegangan dinamik dapat diabaikan. Dalam tulisannya yang lain Crosley dan Ripling (1980) membahas perbandingan antara pendekatan statik (K_{Ia}) dan dinamik (K_{Id} , K_{Idm}) pada penahanan retak. Dari perbandingan ini ditunjukkan bahwa harga pendekatan statik (K_{Ia}) secara konsisten tidak bergantung pada harga faktor intensitas tegangan retak awal, K_Q , tetapi hal ini tidak terjadi pada pendekatan dinamik. Bila $K_{Id}(=K_{Idm})$ konstan, maka K_{Ia} turun dengan turunnya faktor intensitas tegangan retakan awal, K_Q (gambar 2). Parameter lain yang diusulkan disini adalah:

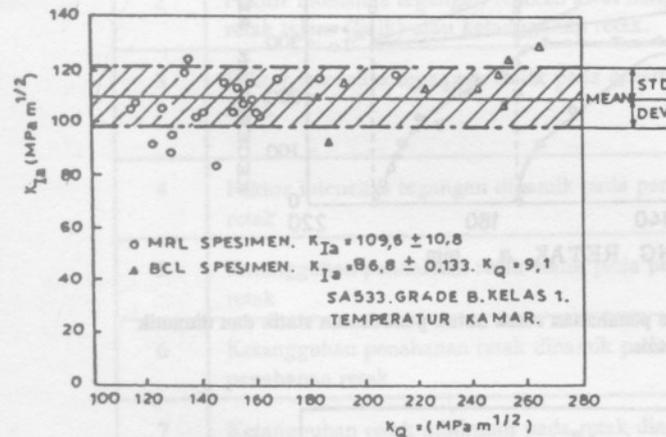
- K_{Id} merupakan ketangguhan penahanan retak dinamik, diperoleh dari pengukuran dinamik.
- K_{Idm} merupakan ketangguhan penahanan retak dinamik minimum, ditentukan secara dinamik setelah retak tertahan.

Untuk kasus yang dibatasi dengan perambatan retak pendek, K_{Id} diidentifikasi sebagai $K_{Id} = K_{Idm}$. Dalam kasus ini $K_{Idm} \approx K_{Ia} \approx K_{Im}$

Hasil-hasil dari program pengujian bersama ditunjukkan oleh anggota ASTM (Crosley dan Ripling, 1980) pada gambar 3. Gambar tersebut menunjukkan bahwa harga K_{Ia} tetap konstan walaupun harga faktor intensitas tegangan retakan awal K_Q , bervariasi.



Gambar 2. $K_{I,d}$ terhadap K_Q untuk baja bejana tekan SA533 (Hasil tes bersama)



Gambar 3. Hubungan $K_{I,a}$ terhadap K_Q untuk baja bejana tekan SA533 (Hasil tes bersama).

Kalthoff (1976, 1977, 1980, 1982, 1987) pada prinsipnya meneliti pengaruh statik dan dinamik pada proses perambatan retak dengan mengukur faktor intensitas tegangan dinamik (K_I^{dyn}) aktual dan juga ketangguhan penahanannya ($K_{I,a}^{dyn}$) dan kemudian membandingkannya dengan harga faktor intensitas tegangan statik (K_I^{stat}) serta perbandingannya dengan harga ($K_{I,a}^{stat}$). Eksperimen proses perambatan dan penahanan retak ini dilakukan pada spesimen DCB dengan sistem pembebanan pasak (gambar 4). Percobaan ini menggunakan metoda shadow caustics dengan material Araldite B. Pola dinamik dari shadow caustics direkam dengan kamera kecepatan tinggi. Parameter-parameter yang ditetapkan Kalthoff pada perambatan dan penahanan retak untuk pendekatan statik dan dinamik adalah seperti berikut,

- K_I^{dyn} adalah faktor intensitas tegangan dinamik yang diperoleh berdasarkan persamaan pola shadow caustics.

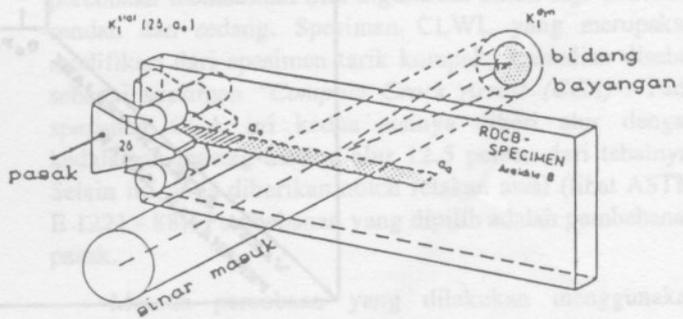
- K_I^{stat} adalah faktor intensitas tegangan statik, yang ditentukan dengan pendekatan statik.
- $K_{I,a}^{stat}$ dan $K_{I,a}^{dyn}$ ($K_{I,m}$) didefinisikan secara berturut-turut adalah ketangguhan penahanan retak statik dan dinamik yang diperoleh pada penahanan retak dengan pendekatan statik dan dinamik.

Hasil-hasil penelitian Kalthoff ini dapat disimpulkan dengan beberapa karakteristik berikut (gambar 5).

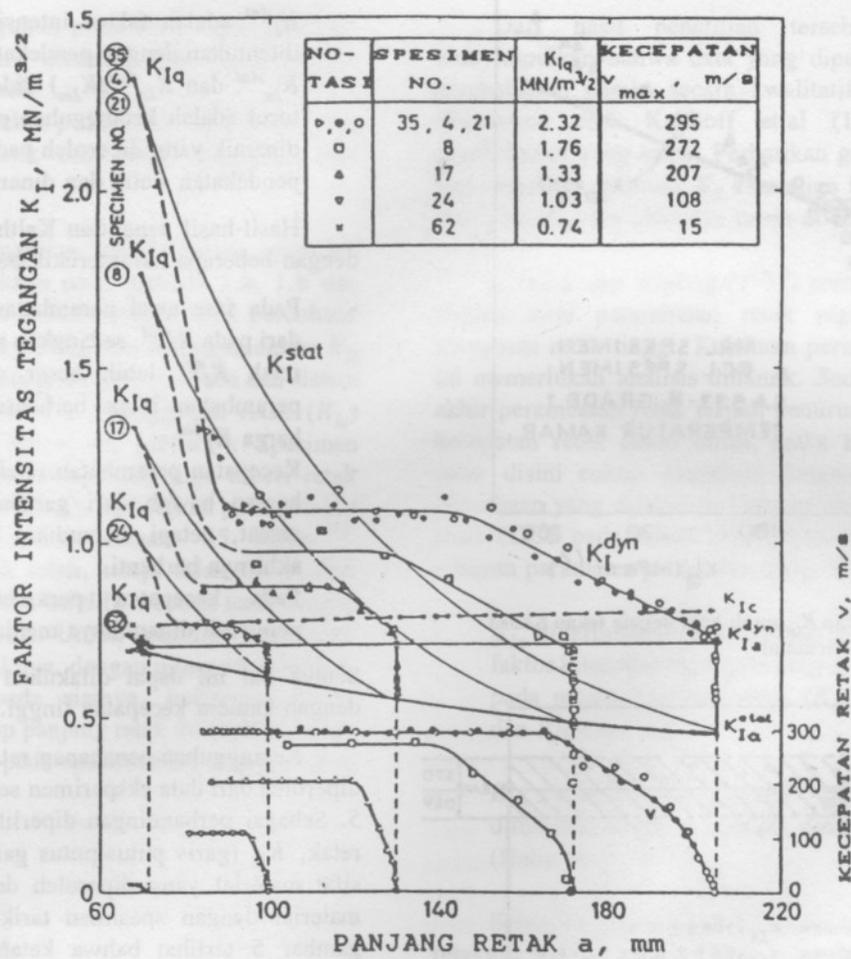
- Pada fase awal perambatan retak, K_I^{dyn} lebih kecil dari pada K_I^{stat} , sedangkan pada fase akhir perambatan retak K_I^{dyn} lebih besar dari pada K_I^{stat} . Setelah perambatan retak berhenti $K_{I,a}^{dyn}$ turun mendekati harga K_I^{stat} .
- Kecepatan perambatan retak seperti ditunjukkan pada bagian bawah dari gambar 5 tetap konstan untuk sesaat, tetapi kemudian harganya turun sebelum akhirnya berhenti.
- Pada kecepatan perambatan retak maksimum, pengaruh dinamik menjadi lebih besar.

Semua hal ini dapat dilakukan karena datanya direkam dengan kamera kecepatan tinggi.

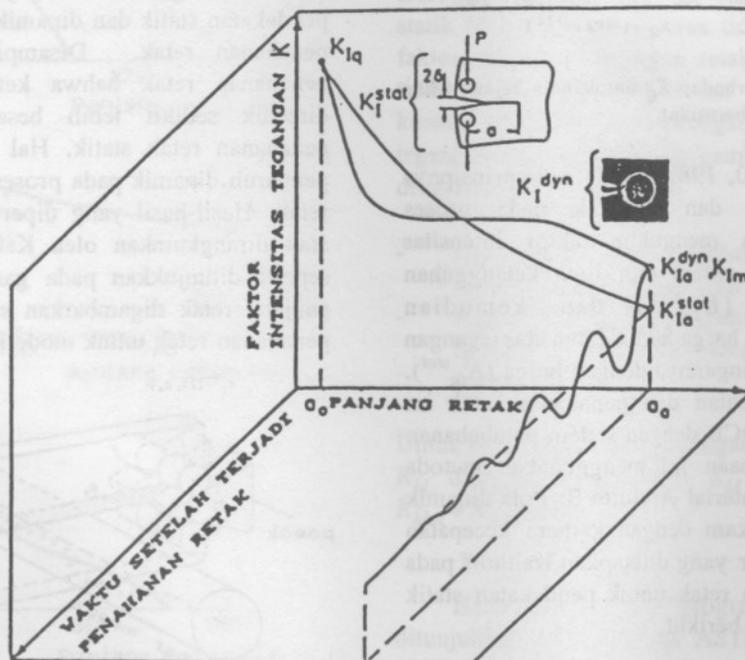
Ketangguhan penahanan retak ($K_{I,a}^{stat}$, $K_{I,a}^{dyn} = K_{I,m}$) diperoleh dari data eksperimen seperti tampak pada gambar 5. Sebagai perbandingan diperlihatkan harga ketangguhan retak, $K_{I,c}$ (garis putus-putus gambar 5) yang merupakan sifat material yang diperoleh dari uji ketangguhan retak material dengan spesimen tarik kompak standar. Dari gambar 5 terlihat bahwa ketangguhan penahanan retak relatif konstan untuk berbagai harga faktor intensitas tegangan retak awal ($K_{I,q}$). Hal ini sama dengan hasil yang diperoleh oleh Crosley dan Ripling (gambar 3). Secara keseluruhan gambar 5 menjelaskan perbandingan antara pendekatan statik dan dinamik dari proses perambatan dan penahanan retak. Disamping itu terlihat juga pada penahanan retak bahwa ketangguhan penahanan retak dinamik sedikit lebih besar dari pada ketangguhan penahanan retak statik. Hal ini disebabkan oleh karena pengaruh dinamik pada proses perambatan dan penahanan retak. Hasil-hasil yang diperoleh kemudian diringkaskan atau dirangkumkan oleh Kalthoff dalam bentuk grafik, seperti ditunjukkan pada gambar 6. Kurva K_I versus panjang retak digambarkan secara skematik pada proses penahanan retak untuk mode I.



Gambar 4. Spesimen Double Cantilever Beam (DCB) dengan sistem pembebanan pasak.



Gambar 5. Faktor intensitas tegangan dan ketangguhan penahanan retak untuk pendekatan statik dan dinamik pada proses perambatan dan penahanan retak.



Gambar 6. Perbandingan antara pendekatan statik dan dinamik pada penahanan retak dari spesimen DBC dengan pembebanan pasak.

Dari tinjauan yang dilakukan dalam bagian ini dapat disimpulkan bahwa untuk perambatan dan penahanan retak, parameter-parameter yang ditetapkan oleh beberapa penulis berbeda satu dengan yang lain, seperti diperlihatkan pada ringkasan pada tabel 1. Dari tabel 1 terlihat bahwa notasi yang ditetapkan oleh Kalthoff lebih mudah dipahami dari pada yang lain. Oleh karena itu penulis merekomendasikan

agar notasi ini yang dipakai untuk menggambarkan fenomena retak cepat. Pada tahun 1995 dengan menggunakan *Compact Tension Specimen* (AL-2024 T3) dan *strain gage* penulis berhasil menentukan harga K_{Iq} dan K_{I}^{dyn} , walaupun demikian harga K_{Ia}^{dyn} belum dapat diukur (Suharto et.al., 1996).

Tabel 1
Perbandingan Notasi dari masing-masing Parameter

No.	PARAMETER-PARAMETER	NOTASI DITETAPKAN OLEH :		
		GATES	CROSLLEY dan RIPLING	KALTHOFF
1	Faktor intensitas tegangan retakan awal dengan ujung retak tumpul	K_q	K_Q	K_{Iq}
2	Faktor intensitas tegangan retakan awal dengan ujung retak tajam (fatik) atau ketangguhan retak.	K_{Ic}	K_{Ic}	K_{Ic}
3	Faktor intensitas tegangan statik pada perambatan retak	K_S	K	K_I^{stat}
4	Faktor intensitas tegangan dinamik pada perambatan retak	K_D	— *)	K_I^{dyn}
5	Ketangguhan penahanan retak statik pada penahanan retak	K_{Ia}^+	K_{Ia}	K_{Ia}^{stat}
6	Ketangguhan penahanan retak dinamik pada penahanan retak	K_{Ia}^{**}	K_{Id}	K_{Ia}^{dyn}
7	Ketangguhan retak minimum pada retak dinamik.	K_{Ia}^{**}	$K_{Idm} = K_{Id}$	$K_{Im} = K_I^{dyn}$

* Crosley dan Ripling tidak memperhitungkan pengaruh dinamik pada proses perambatan retak kecuali pada penahanan retaknya

** Gate tidak membedakan kedua parameter ini.

III. METODA PERCOBAAN STANDAR UNTUK MENENTUKAN K_{Ia}

Sampai akhir tahun 1987 tidak ada prosedur tes standar untuk percobaan ketangguhan penahanan retak (*crack arrest fracture toughness*). Beberapa jenis spesimen yang telah digunakan sebelumnya meliputi *Double Cantilever Beam* (DCB) baik *Rectangular Double Cantilever Beam* (RDCB) maupun *Tapered Double Cantilever Beam* (TDCB), spesimen *Single Edge Notch* (SEN) dan juga spesimen *Crack Line Wedge Loaded* (CLWL). Spesimen CLWL tersebut akhirnya menjadi pilihan dalam menentukan ketangguhan penahan retak plane strain, K_{Ia} . Tahun 1988 ASTM menerbitkan "Metoda Tes Standar Untuk

Menentukan Crack Arrest Fracture Toughness Plane Strain, K_{Ia} Pada Baja Feritik", dengan nomor E 1221 - 88. Hasil percobaan memuaskan bila digunakan untuk baja kekuatan rendah dan sedang. Spesimen CLWL yang merupakan modifikasi dari spesimen tarik kompak, kemudian disebut sebagai spesimen "*Compact Crack Arrest (CCA)*". Pada spesimen CCA ini kedua sisinya diberi alur dengan kedalaman masing-masing alur 12.5 persen dari tebalnya. Selain itu, juga diberikan notch retakan awal (lihat ASTM E 1221 - 88). Pembebanan yang dipilih adalah pembebanan pasak.

Metoda percobaan yang dilakukan menggunakan analisis statik dalam menentukan faktor intensitas tegangan, sesaat setelah penahanan retak terjadi (*crack arrest*).

esaran yang diperoleh ditandai dengan notasi K_{Ia} . Dalam percobaan, bila spesimen tidak menunjukkan perambatan tak cepat, maka K_{Ia} tidak bisa ditentukan. Bila harga K_{Ia} diperoleh dan memenuhi syarat-syarat tertentu, maka harga K_{Ia} dapat ditetapkan sebagai K_{Ia} . Syarat-syarat yang harus dipenuhi tersebut dapat dilihat pada tabel 2 (E 1221 - 88, Annual Book of ASTM, 1991, hal. 864). Berdasarkan uraian di atas dapat diketahui bahwa ASTM E 1221 - 88 adalah metoda standar percobaan untuk menentukan K_{Ia} khususnya pada baja feritik dengan kekuatan sedang dan rendah.

V. KESIMPULAN

Sampai tahun 1988 metoda standar untuk menentukan ketanggahan penahan retak K_{Ia} , yang direkomendasikan oleh ASTM adalah baru untuk pendekatan statik yang berlaku untuk baja feritik kekuatan rendah dan sedang.

Sampai saat ini fenomena perambatan retak dinamik masih merupakan hal yang relatif baru dan parameter-parameter pada perambatan retak dinamik masih belum mempunyai standar yang baku (lihat Tabel 1). Masalah ini dapat dimengerti karena peneliti-peneliti melakukan percobaan dengan material yang berlainan dengan metoda pembebanan dan spesimen yang berbeda. Dari notasi-notasi yang diajukan, konsep dari Kalthoff nampaknya lebih mudah dipahami dan dapat menjadi dasar pengembangan selanjutnya.

V. DAFTAR PUSTAKA

1. ASTM E 1221 - 88, *Standard Test Method for Determining Plane-Strain Crack-Arrest Fracture Toughness, K_{Ia} , of Ferritic Steels*, Annuals Book of ASTM Standards, Part. 3, Section 03.01, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1991.
2. Crosley, P.B. and Ripling, E.J., *Characteristics of a Run-Arrest Segment of Crack Extension, Fast Fracture and Crack Arrest*, ASTM STP 627, G.T. Hahn and M.F. Kanninen, Eds., American Society for testing and Materials, 1977, pp.203-227.
3. Crosley, P.B and Ripling, E.J., in ASTM STP 627, *Fast Fracture and Crack Arrest*, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1977, pp. 372-391.
4. Crosley, P.B and Ripling, E.J., *Comparison of Crack Arrest Methodologies, Crack Arrest Methodology and Application*, ASTM STP 711, G.T. Hahn and M.F. Kanninen, Eds., American Society for Testing and Materials, 1980, pp.211-227.

5. Crosley, P.B and Ripling, E.J., *Significance of Crack Arrest Toughness (K_{Ia}) Testing, Crack Arrest Methodology and Applications*, ASTM STP 711, G.T. Hahn and M.F. Kanninen, Eds., ASTM, 1980, pp.321-327.
6. Gate, R. S., *Some Effects of Specimen Geometry on Crack Propagation and Arrest*, Crack Arrest Methodology and Applications, ASTM STP 711, G.T. Hahn and M.F. Kanninen, Eds., American Society for Testing and Materials, 1980, pp. 140-160.
7. Gate, R.S., in Proceeding, *Symposium on Numerical Methods in Fracture Mechanics*, University College, Swansea, U.K., 9-13 Jan. 1978, pp 834-836.
8. Hahn, G.T., Hoagland, R.G., Kanninen, M.F., and Rosenfield, A.R., in Proceedings of - *an International Conference on Dynamic Crack Propagation*, ed. G.C. Sih, Lehigh University, Bethelhem, 1972, pp. 649-662.
9. Kalthoff, J.F., Beinert, J., and Winkler, S., *Measurements of Dynamic Stress Intensity Factor for Fast Running and Arresting Cracks in Double Cantilever-Beam Specimens*, in Fast Fracture and Crack Arrest, ASTM STP 627, (G.T. Hahn and M.F. Kanninen, Eds.), American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1977, pp. 161-176.
10. Kalthoff, J.F., Winkler, S., and Beinert, J., *Dynamic Stress Intensity Factor for Arresting in DCB Specimens*, Int. J. Fracture, Vol. 12, 1976, pp.317-319.
11. Kalthoff, J. F., *Stress Intensity Factor Determination by Caustics*, Proc.Int.Conf. on Experimental Stress Analysis, organized by Japan Society of Mechanical Engineers (JSME) and American Society for Experimental Stress Analysis (SESA), Honolulu-Maui, Hawaii, May 23-29, 1982, pp.1119-1126.
12. Kalthoff, J.F., Beinert, J., and Winkler, S., *Analysis of Fast Running and Arresting Crack by the Shadow Optical Method of Caustics*, IUTAM Symp. Opt. Methods Mech. Solids (A. Lagarde, Ed.), University of Poitiers, France, Sept. 10-14, 1979, Sijthoff-Noordhoff, Alphen Aan den Rijn, The Netherlands, 1980, pp.497-508.
13. Kalthoff, J.F., *Handbook of Experimental Mechanics*, ed. A.S Kobayashi, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1987, pp.430-500.
14. Kanninen, M.F., *International Journal of Fracture*, Vol.10, No.3, 1974, pp.415-430.

15. Kobayashi, T., Dally, J.W., and Fourney, W.L., *Influence of Specimen Geometry on Crack Propagation and Arrest Behavior*, Proc.6th Intem. Conf. Exper. Stress Analysis, Munich, Germany, Sept. 18-22, 1978.
16. The International Association for Structural Mechanics in Reactor Technology, e.v. and Atomic Energy Society of Japan, *11th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 11)*, August 18 - 23, Tokyo, Japan, 1991.
17. Suharto, D., Husaini, Siswosuwarno M, *Measurement of Dynamic Stress Intensity Factor K_I^{dyn} and Crack Initiation Stress Intensity Factor K_{Iq} Using Strain Gages*, Proceedings of The First Australasian Congress on Applied Mechanics, Melbourne, 1996.

—0000—