

# Perilaku Perambatan Retak pada Aluminium Paduan A2024-T351 dengan Menggunakan Spesimen CTS

Husaini

Lab. Material dan Mekanika Retakan, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik,  
Universitas Syiah Kuala (UNSYIAH), Darussalam, Banda Aceh  
E-mail: husainift@unsyiah.ac.id

## ABSTRAK

Penelitian ini membahas studi tentang perilaku retak aluminium paduan pada pembebanan mode campuran (*mixed mode*) (Mode I+II). Uji retakan dilakukan pada material aluminium paduan A2024-T351. Sudut antara arah pembebanan dan permukaan retakan dari spesimen Compact-tension-shear yang digunakan divariasikan dari 90°(mode I) sampai 0°(mode II). Perilaku dan arah perambatan retak diamati dengan video microscope. Pada pembebanan dengan komponen mode II relatif tinggi, maka inisiasi retakan jenis geseran terjadi lebih dahulu kemudian diikuti dengan jenis perambatan retak terbuka. Patah akhir terjadi karena ketidakstabilan geseran pada pembebanan mode II. Hasil eksperimental ini akan dijelaskan secara kualitatif dengan menggunakan analisa metode elemen hingga. Harga kritis dari faktor intensitas tegangan pada inisiasi retakan pada pembebanan dimana mode II lebih dominan menjadi lebih kecil dari pada yang diprediksikan dengan kriteria tegangan hoop maksimum (*maximum hoop stress criterion*). Juga diperoleh bahwa arah pengerolan dan lubang-lubang kecil yang ada didepan ujung retak mempengaruhi perilaku arah perambatan retak.

**Kata kunci:** Aluaminum paduan, perilaku perambatan retak, analisa FEM, pembebanan mode campuran.

## ABSTRACT

*Fracture behavior of aluminum alloys under mixed mode (Mode I+II) loading was studied. Fracture tests were carried out on A2024-T351 aluminum. Compact-tension-shear specimen was employed and angle between loading axis and the crack surface was varied from 90°(mode I) to 0°(mode II). The crack extension (crack initiation and propagation) behaviors observed by a video microscope. Under a load with relatively high mode II components, the shear type crack initiation preceded the opening type crack propagation. Final fracture was occurred by shearing instability in the pure mode II loading. These experimental results were explained qualitatively by using finite element analysis. The critical values of stress intensity factors at crack initiation under mode II dominant conditions become smaller than those predicted by the maximum hoop stress criterion. It was also found that the rolling direction and small holes existing ahead of the crack-tip influence the crack extension behaviors.*

**Keywords:** Aluaminum alloy, crack propagation behavior, FEM analysis, mixed mode loading

## PENDAHULUAN

Dalam analisa teoritis yang menjadi asumsi dasar pada masalah retakan mode campuran (*mixed mode*) adalah tegangan sekitar ujung retakan ditentukan dengan mekanika retakan elastik linier. Diantara hipotesa-hipotesa yang lain meliputi kriteria tegangan hoop maksimum (*maximum hoop stress criterion*) menyatakan bahwa, retakan terjadi bila tegangan kritis keliling, yang mengacu kepada sistem koordinat polar, mencapai jarak tertentu dari ujung retak [1,2].

Retakan geser pada paduan aluminium dan paduan polimer pada berbagai pembebanan mode

campuran dewasa ini secara berurutan dilaporkan oleh Aoki *et al.*, [3] dan oleh Husaini *et al.*, [4]. Aoki *et al.* melakukan uji perilaku retakan alstik-plastik pada aluminium paduan A5083-O pada pembebanan mode campuran dan menyatakan bahwa pada pembebanan mode campuran dengan romponen mode II lebih tinggi, inisiasi retakan karena geseran terjadi pada ujung tajam dari ujung retakan awal sekitar permukaan spesimen. Husaini *et al.* [4-6], melakukan studi tentang perilaku retak pada material PC/ABS blends pada pembebanan mode campuran dengan menggunakan spesimen compact-tension-shear dan menyatakan bahwa inisiasi retakan terjadi pada bukaan retakan untuk uji retakan

dari mode I sampai dengan mode campuran hingga harga tertentu dari komponen mode II. Namun, pada harga tertentu dari rasio mode campuran dengan komponen mode II yang tinggi, maka inisiasi retakan geser terjadi pada ujung retakan awal.

Dalam penelitian ini, investigasi eksperimental dilakukan untuk mengklarifikasi perilaku arah perambatan retakan pada aluminium paduan A2024-T351. Uji retakan mode I dan mode campuran dilakukan dengan menggunakan spesimen compact-tension-shear (CTS). Sudut antara arah pembebanan dan permukaan retakan divariasikan dari 90°(mode I) sampai 0°(mode II). Perilaku perambatan retak diamati dengan menggunakan video microscope. Dalam studi ini, efek dari lubang kecil baik satu lubang maupun tiga lubang yang diberikan didepan ujung retak pada spesimen juga dilakukan penelitian. Hasil eksperimental akan dijelaskan secara kualitatif dengan memperhatikan tegangan geser dan distribusi tegangan hoop sekitar ujung retak dengan analisa metode elemen hingga.

**METODE PENELITIAN**

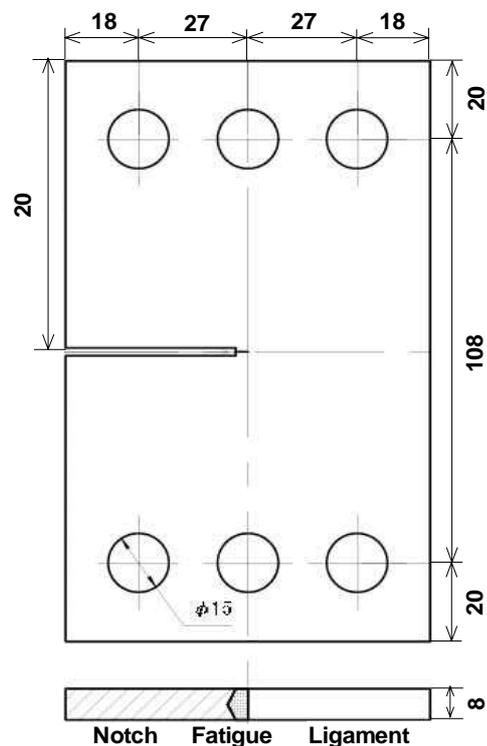
Pengujian dilakukan pada aluminium paduan A2024-T351. Uji tarik dilakukan dalam dua arah orientasi yaitu dalam arah longitudinal (RD) dan transversal (LT) untuk memperoleh hubungan tegangan-regangan. Dari uji tarik diperoleh bahwa patah akhir berupa patah geser dengan permukaan patahan membentuk sudut 45° terhadap arah pembebanan baik pada orientasi RD maupun LT. Sifat-sifat mekanik dari material seperti ditunjukkan pada Tabel 1. Dalam uji retakan, spesimen CTS yang digunakan. Merujuk kepada JSME Standard Method of Test for Elastic-Plastic Fracture Toughness  $J_{IC}$ -S001 1981[7], retak fatik pada spesimen diberikan sampai dengan  $a_o/w \cong 0.5$  ( $a_o$  = panjang retakan awal,  $w$  = lebar spesimen) dari pemesain notch berbentuk chevron seperti ditunjukkan pada Gambar 1.

**Tabel 1. Sifat-sifat Mekanik.**

Rolling direction	RD	LT
Young's modulus $E$ [GPa]	73.4	74.4
Poisson's ratio $\nu$	0.34	0.33
Ultimate tensile strength $\sigma_B$ [MPa]	471	476
0.2 % Yield strength $\sigma_{0.2}$ [MPa]	358	328
Rupture strength $\sigma_f$ [MPa]	450	473
Shear strength $\tau_f$ [MPa]	183	193
Failure strain $\epsilon_B$ [%]	0.17	0.21
Reduction of area $\delta$ [%]	19.5	20.3

Alat pembebanan khusus (*loading device*) seperti pada Gambar 2 (dikembangkan oleh Richard

and Benitz [8]) yang dipasangkan pada spesimen, yang kemudian diikatkan pada mesin uji tarik MTS pada laju kecepatan cross-head konstan 0,3 mm/min. Pembebanan mode I murni dilakukan dengan menggunakan lubang No. 1 dan 1' dari loading device (Gambar 2), dan pembebanan mode II murni dapat dilakukan dengan menggunakan lubang No. 7 dan 7'. Sudut antara arah pembebanan dan permukaan retakan divariasikan dari  $\alpha = 90^\circ$  (mode I) sampai  $\alpha = 0^\circ$  (mode II). Uji retakan dilakukan pada dua jenis spesimen CTS yaitu yang berorientasi longitudinal (RD) dan transversal (LT). Lebih lanjut, pengujian juga dilakukan untuk melihat efek dari lubang kecil didepan ujung retak pada spesimen.



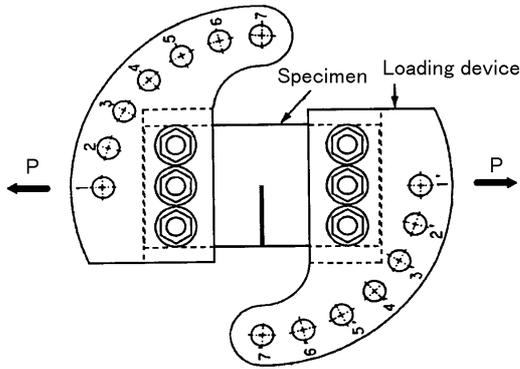
**Gambar 1. Konfigurasi Spesimen CTS**

Ada dua jenis spesimen dengan lubang kecil yaitu spesimen dengan satu lubang dan tiga lubang. Diameter dari lubang kecil tersebut 6 mm dan jarak dari ujung retak dan jarak antara satu lubang dengan lubang yang lain 11 mm.

Inisiasi retakan dan perambatan retak pada ujung retak dimonitor dengan video microscope. Untuk mencegah refleksi sinar dari spesimen selama pengamatan pada uji retakan, maka pada kedua sisi permukaan dari spesimen dicat putih

Untuk mencari faktor intensitas tegangan, analisa numerik dari spesimen CTS dilakukan dengan menggunakan analisa metode elemen hingga dua dimensi dengan elemen isoparametrik delapan nodal (*eight-nodded isoparametric elements*). Pada pemodelan elemen hingga, elemen (*meshes*)

yang berdekatan dengan ujung retak pada spesimen dibagi menjadi geometri elemen yang sangat kecil. Elemen-elemen ini dibuat berbentuk segitiga sebagai representasi akar singularitas tegangan. Nodal pada ujung retak diikat dan nodal pada bagian tengah dari sisi elemen digeser menjadi ¼ bagian [9]. Perhitungan dan pembuatan elemen-elemen dilaksanakan dengan menggunakan program MARC-MENTAT [10].



Gambar 2. Peralatan untuk Pembebanan Mode Campuran (Loading Device)

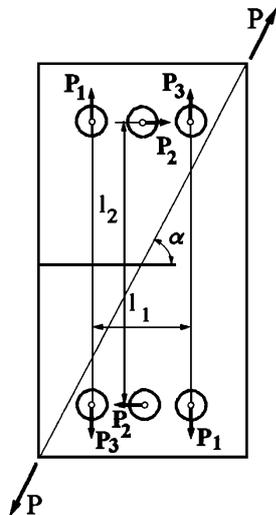
Kondisi pembebanan dibuat sedemikian rupa yang mana  $P_1$ ,  $P_2$  dan  $P_3$  digunakan pada lubang spesimen seperti ditunjukkan pada Gambar 3. Karena adanya sleeves yang dibuat pada loading device, maka arah pembebanan  $P_1$ ,  $P_2$  dan  $P_3$  ditahan sedemikian rupa seperti ditunjukkan pada Gambar 3. Besar beban dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$P \cos \alpha = P_2, \tag{1}$$

$$P \sin \alpha = P_1 + P_3, \tag{2}$$

$$P_1 l_1 + P_2 l_2 = P_3 l_1, \tag{3}$$

Dimana  $P$  menunjukkan beban yang diberikan pada loading device (Gambar 2), dan panjang  $l_1$  dan  $l_2$  dan sudut pembebanan  $\alpha$  didefinisikan seperti pada Gambar 3.

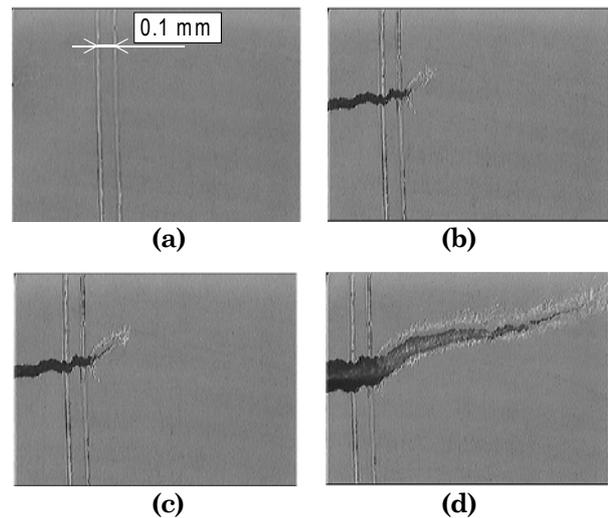


Gambar 3. Pembebanan pada Spesimen

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Perilaku Perambatan Retak

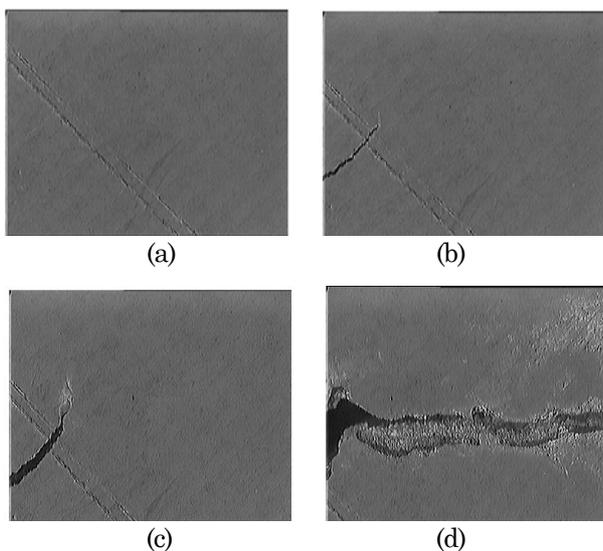
Gambar 4 menunjukkan urutan foto perambatan retak yang diambil dari rekaman video pada spesimen dengan orientasi LT untuk pembebanan mode I dengan  $\alpha = 90^\circ$ . Dapat dilihat bahwa skala sekitar 0,1 mm dari ujung retakan awal pada permukaan spesimen seperti pada Gambar 4 (a). Skala ini digunakan untuk mengidentifikasi inisiasi retakan dengan mudah. Kondisi awal sebelum inisiasi retakan ditunjukkan dalam Gambar 4 (a). Kemudian, persis terjadi inisiasi retakan seperti ditunjukkan dalam Gambar 4 (b). Gambar 4 (c) menunjukkan baru saja terjadi inisiasi retakan. Perambatan retakan ditunjukkan dalam Gambar 4(d). Arah inisiasi retakan seperti ditunjukkan dalam Gambar 4(b) terlihat bahwa terjadi perbedaan sudut (tidak searah) dengan ujung retakan awal pada permukaan spesimen karena deformasi bibir geseran (*shear-lip*).



Gambar 4. Foto Hasil Rekaman Video pada saat Perambatan Retakan untuk Spesimen LT dengan  $\alpha = 90^\circ$  (Mode I)

Sebaliknya, pada bagian tengah dari ketebalan spesimen perambatan retakan sejajar terhadap retakan awal dan retakan rata (*flat fracture*). Dari hasil ini, dapat diketahui bahwa mekanisme utama dari perambatan retak adalah terjadi retakan jenis bukaan. Karena inisiasi retak terjadi pada bagian tengah dari ketebalan, maka tidak bisa diamati secara langsung. Oleh karena itu, maka identifikasi inisiasi retakan hanya bisa dilakukan pada permukaan dengan rekaman video seperti pada Gambar 4(b). Pada spesimen TL hampir tidak terjadi *shear lip* pada permukaan retakan. Perambatan retakan sejajar retakan awal, yang juga terjadi retakan rata karena arah pengendalian atau orientasi butir dari material.

Gambar 5 menunjukkan urutan foto-foto yang diambil dari rekaman video pada proses deformasi dan perambatan retakan sekitar ujung retak pada spesimen dengan orientasi LT pada pembebanan mode campuran dengan  $\alpha = 45^\circ$ . Gambar 5 (a) menunjukkan kondisi awal sebelum inisiasi retakan. Gambar 5 (b) menunjukkan persis terjadinya inisiasi retakan dalam bentuk retakan jenis geseran (*shear type fracture*). Setelah inisiasi, kemudian terjadi perambatan retakan dalam arah membelok (retakan jenis geseran) dan selanjutnya berubah ke mode I (retakan jenis bukaan) seperti ditunjukkan dalam Gambar 5 (c). Akhirnya, pertumbuhan retak terjadi dalam bentuk retakan jenis bukaan (*opening type fracture*) sampai patah akhir dengan arah tegak lurus terhadap arah pembebanan seperti dalam Gambar 5(d). Namun demikian, perilaku arah perambatan retak pada pembebanan mode campuran dengan komponen mode II lebih tinggi dari pada mode I, untuk sudut pembebanan  $\alpha = 30^\circ$  dan  $\alpha = 15^\circ$ , hampir serupa dengan perilaku retak dengan  $\alpha = 45^\circ$  (Gambar. 5).

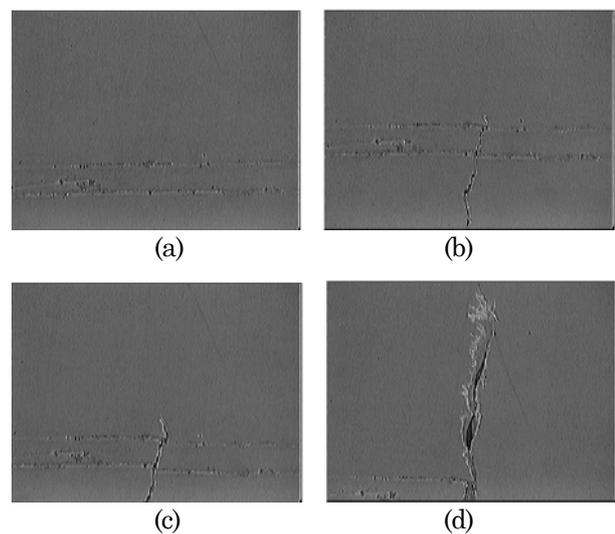


**Gambar 5. Foto Hasil Rekaman Video pada Perambatan Retak untuk Spesimen LT dengan  $\alpha = 45^\circ$  (Mixed Mode).**

Gambar 6 menunjukkan foto urutan proses retakan dan deformasi dekat ujung retak yang diambil dari rekaman video pada spesimen dengan orientasi LT pada pembebanan mode II dengan  $\alpha = 0^\circ$ . Gambar 6 (a) menunjukkan kondisi awal sebelum inisiasi retakan. Gambar 6 (b) menunjukkan persis terjadinya inisiasi retakan dalam bentuk retakan jenis geseran. Perambatan retak juga terjadi dalam bentuk retakan jenis geseran seperti ditunjukkan dalam Gambar 6 (c). Akhirnya, pertumbuhan retak terjadi dalam bentuk *shear type fracture* hingga patah akhir seperti pada Gambar 6 (d).

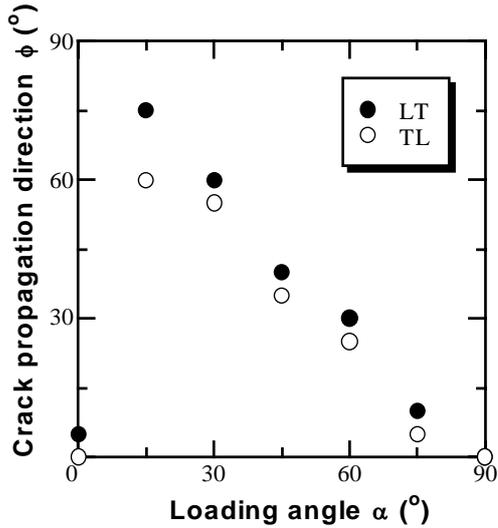
Perambatan retakan sejajar terhadap retakan awal dan permukaan retak adalah rata dan hasil ini adalah serupa dengan hasil pada patahan uji tarik. Hasil yang diperoleh ini, menyatakan bahwa fenomena yang sangat berbeda dengan hasil yang diperoleh sebelumnya pada aluminium paduan A5083-O [3] dan polimer paduan PC/ABS [4] yang mana hal ini disebabkan oleh struktur mikro dari material. Lebih lanjut, hasil yang diperoleh pada spesimen TL mengindikasikan bahwa perilaku retakan menunjukkan perilaku serupa dengan spesimen LT.

Sudut perambatan retak  $\phi$  diukur pada jarak 5 mm dari ujung retak pada arah yang sama dengan perambatan retak. Hasil-hasil dari arah perambatan retakan untuk lebih lengkap dari mode I murni ( $\alpha = 90^\circ$ ) sampai dengan mode II ( $\alpha = 0^\circ$ ) diplot pada Gambar 7.



**Gambar 6. Foto Hasil Rekaman Video pada Perambatan Retakan untuk Spesimen LT dengan  $\alpha = 0^\circ$  (Mode II).**

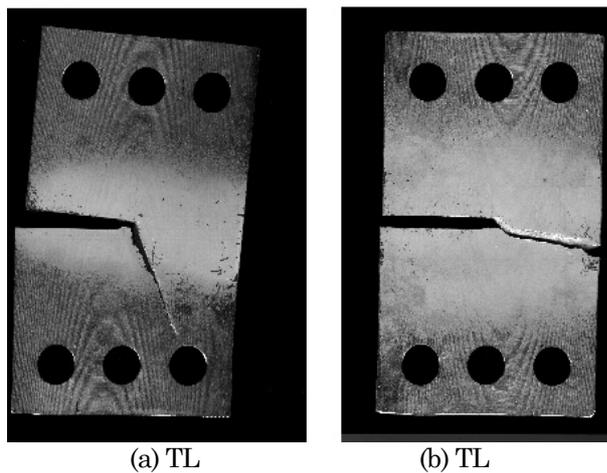
Data-data yang diplot pada Gambar 7 untuk kedua jenis spesimen LT dan TL. Terlihat dalam Gambar 7 bahwa, arah perambatan retakan pada mode I dan mode campuran dengan komponen mode II lebih rendah merambat tegak lurus terhadap arah pembebanan dalam bentuk *opening type fracture*. Lebih lanjut, arah perambatan retakan pada mode campuran dengan komponen mode II lebih besar pada sudut pembebanan  $\alpha = 15^\circ$ , adalah tegak lurus terhadap arah pembebanan untuk spesimen LT; namun demikian, sudut dari arah perambatan retak  $\phi$  untuk spesimen TL adalah sedikit lebih kecil dibandingkan dengan spesimen LT. Diperoleh juga bahwa, arah retakan sejajar terhadap arah beban dan ujung retakan awal dari spesimen LT dan TL pada mode II murni dan spesimen hanya retak dalam bentuk *shear type fracture*.



Gambar 7. Hubungan Sudut Pembebanan  $\alpha$  dengan Arah Perambatan Retak  $\phi$

Perbandingan arah perambatan retak antara spesimen LT dan TL pada mode campuran dengan sudut pembebanan  $\alpha = 15^\circ$  seperti ditunjukkan pada Gambar 8. Dapat terlihat dari Gambar 8 bahwa, arah perambatan retakan tegak lurus terhadap arah beban untuk spesimen LT dan retakan terjadi dalam bentuk jenis bukaan seperti ditunjukkan pada Gambar 8 (a).

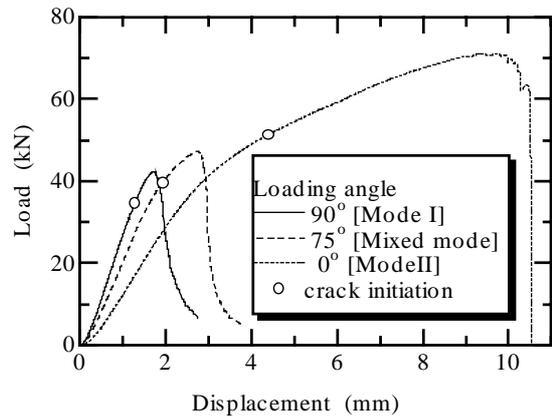
Namun arah perambatan retakan untuk spesimen TL adalah berbeda dengan spesimen LT karena pada spesimen TL terjadi transisi retakan dari retakan bukaan ke retakan geser dan patah akhir disebabkan karena retakan geser seperti terlihat pada Gambar (b).



Gambar 8. Perbandingan Arah Perambatan Retakan antara Spesimen LT dan TL (Sudut Pembebanan  $\alpha = 15^\circ$ )

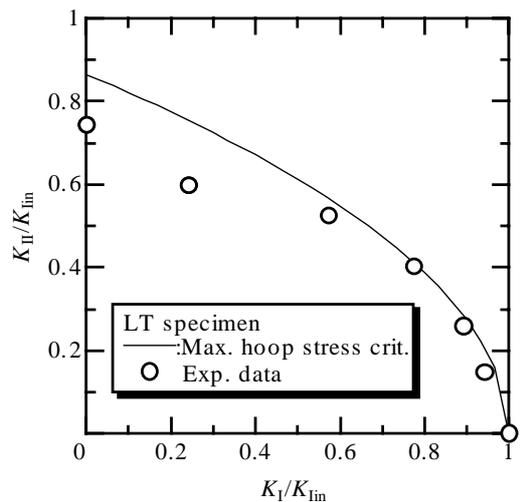
Gambar 9 menunjukkan kurva hubungan beban-perpindahan pada mode I, mode campuran ( $\alpha = 75^\circ$ ) dan mode II. Simbol kecil O pada kurva menunjukkan beban yang diberikan pada saat

terjadinya inisiasi retakan yang diidentifikasi sebelumnya dengan rekaman video seperti ditunjukkan dalam gambar (b) masing-masing untuk Gambar 4, 5, dan 6. Terlihat bahwa, inisiasi retakan terjadi dibawah beban maksimum. Inisiasi retakan juga terjadi pada bagian linier pada kurva hubungan beban-perpindahan. Oleh karena itu, kriteria retakan *small scale yielding* (SSY) dapat diaplikasikan dalam kasus ini [9].



Gambar 9. Kurva Hubungan Beban - Perpindahan

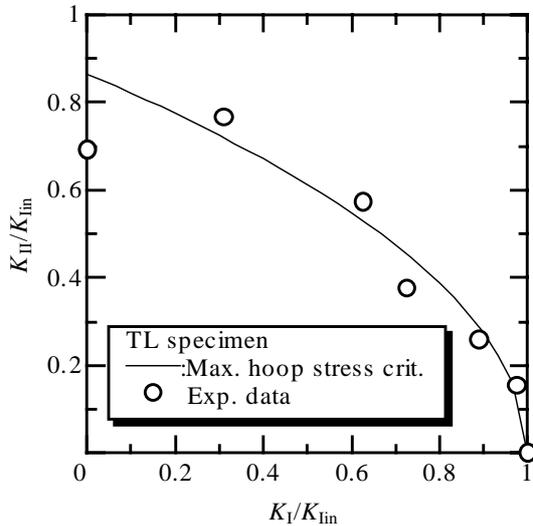
Harga kritis dari faktor intensitas tegangan pada inisiasi retakan pada pembebanan mode I [11] ditandai sebagai  $K_{lin}$ . Selanjutnya, faktor intensitas tegangan kritis, yang diperoleh dengan metode ini, akan dirujuk sebagai ketangguhan retak  $K_{lin}$ . Dari hasil penelitian diperoleh bahwa ketangguhan retak  $K_{lin} = 51.5 \text{ MPa.m}^{1/2}$  dan  $45.2 \text{ MPa.m}^{1/2}$  berturut-turut untuk spesimen LT dan TL.



Gambar 10. Faktor Intensitas Tegangan Kritis pada Mode Campuran untuk Spesimen LT

Faktor intensitas tegangan kritis pada saat terjadinya inisiasi retakan seperti ditunjukkan pada Gambar 10 untuk spesimen LT dan dalam Gambar 11 untuk spesimen TL dimana kedua sumbu

dinormalisasikan dengan ketangguhan retak  $K_{Ic}$ . Kurva Ddalam gambar tersebut menunjukkan kurva batasan retakan (*fracture boundary curve*) yang berhubungan dengan kriteria tegangan hoop maksimum (*maximum hoop stress criterion*)  $\sigma_{\theta\theta\max}$ . [1].



**Gambar 11. Faktor Intensitas Tegangan Kritis pada Mode Campuran untuk Spesimen TL**

Dalam kriteria ini, hubungan antara  $K_I$  dan  $K_{II}$  diberikan oleh persamaan (1)

$$\left( \frac{K_I}{K_{Ic}} \cos^2 \theta_0 - \frac{3 K_{II}}{2 K_{Ic}} \sin^2 \theta_0 \right) \cos \frac{\theta_0}{2} = 1, \quad (1)$$

dimana  $\theta_0$  adalah menunjukkan arah pada saat tegangan hoop menunjukkan harga maksimum yang diberikan oleh persamaan (2)

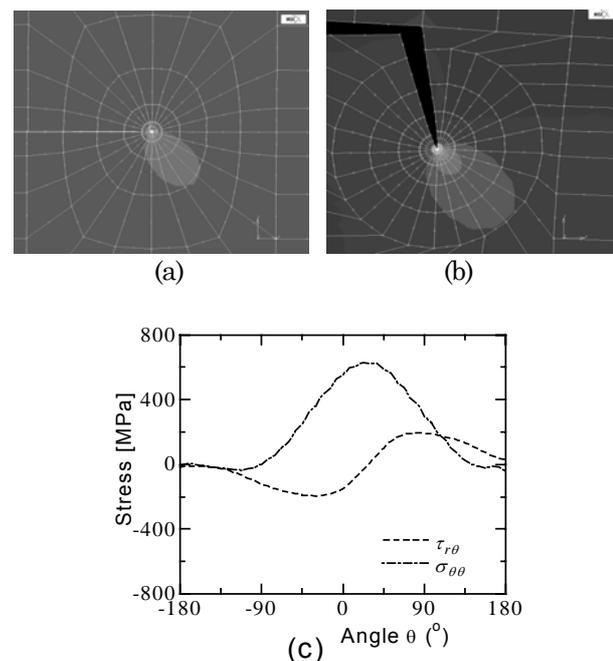
$$\theta_0 = \sin^{-1} \left( \frac{\kappa}{\sqrt{1+9\kappa^2}} \right) - \tan^{-1} 3\kappa \quad (2)$$

dengan rasio mode campuran,  $\kappa = K_{II} / K_I$ .

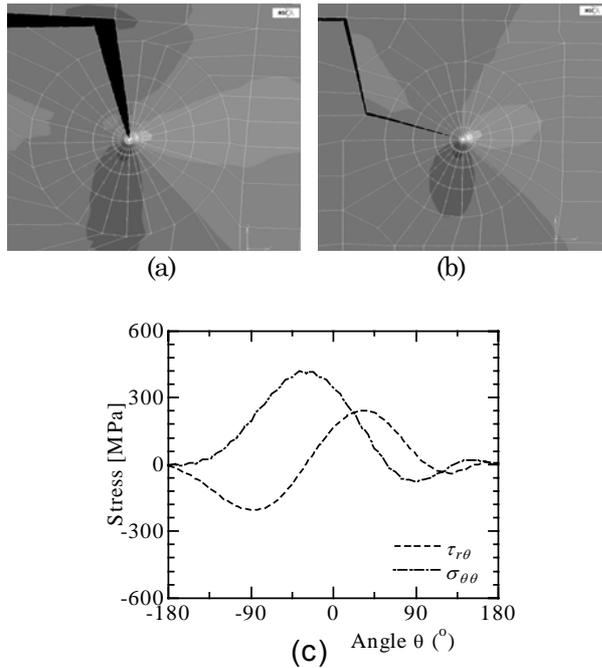
Gambar 10 dan 11 menunjukkan data eksperimental yang sesuai dengan kriteria *maximum hoop stress* hanya terjadi pada mode I murni dan mode campuran pada harga tertentu dari komponen mode II. Proses retakan ini juga diperkuat oleh data eksperimental seperti pada Gambar 8 (a). Sebaliknya, bila komponen mode II melampaui harga kritis, maka ketahanan retakan dari material uji menurun pada spesimen LT seperti ditunjukkan pada Gambar 10. Tetapi, pada spesimen TL ketahanan retakan menurun pada komponen mode II yang lebih tinggi seperti ditunjukkan pada Gambar 11. Perilaku retakan seperti ini adalah berhubungan dengan proses retakan yang berkaitan dengan munculnya *opening fracture* kemudian diikuti dengan *shear fracture*. Dari sudut pandang eksperimental, fenomena ini ditunjukkan pada Gambar 8 (b).

Untuk memprediksikan arah perambatan retakan pada mode campuran dengan komponen mode II lebih tinggi baik pada spesimen LT maupun pada spesimen TL (Gambar 8), maka dilakukan analisa metode elemen hingga (MEH). Hal ini untuk menjelaskan secara kualitatif hasil-hasil eksperimental dengan memperhitungkan *shear stress* dan *hoop stress* sekitar ujung retak.

Gambar 12 menunjukkan analisa elemen hingga pada spesimen LT. Gambar 12 (a) menunjukkan analisa MEH yang belum terjadi perambatan retak. Disini, bila hoop stress  $\sigma_{\theta\theta}$  pada harga maksimum sekitar 330 Mpa, sekitar ujung retak, maka harga shear stress  $\tau_{r\theta}$  adalah nol. Harga ini menunjukkan bahwa retak akan merambat sesuai kriteria ini dalam arah tegak lurus terhadap arah pembebanan. Oleh karena itu, dalam analisa MEH perambatan retak dimodelkan tegak lurus terhadap arah pembebanan seperti ditunjukkan dalam Gambar 12 (b). Tegangan yang terjadi sekitar ujung retak seperti ditunjukkan pada Gambar 12 (c) dimana harga  $\sigma_{\theta\theta\max}$  pada ligamen sekitar ujung retak sekitar 631 MPa lebih besar dari pada harga *rupture strength* seperti ditunjukkan dalam Tabel 1. Oleh karena itu, dari hasil ini dapat ditarik kesimpulan bahwa retakan akan merambat ke arah dimana pada kekuatan material lokal adalah lemah. Dalam kasus ini, arah perambatan retakan  $\phi$  adalah  $75^\circ$  seperti ditunjukkan pada Gambar 7 dan 8 dimana *hoop stress* menunjukkan harga maksimum dan kegagalan akhir disebabkan oleh *opening type fracture*.



**Gambar 12. Hasil Analisa MEH pada Spesimen LT ( $\alpha = 15^\circ$ ).**



Gambar 13. Hasil Analisa MEH pada Spesimen TL ( $\alpha = 15^\circ$ ).

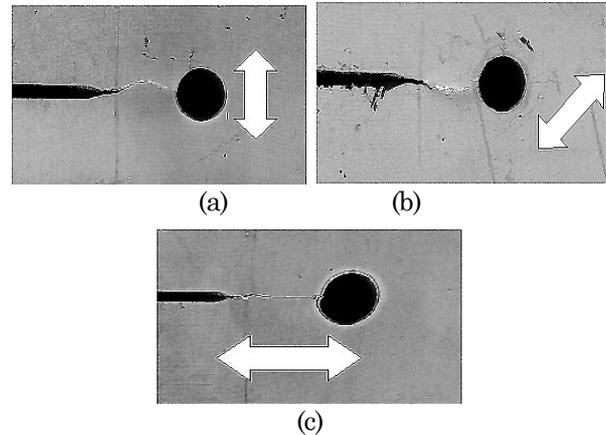
Gambar 13 menunjukkan analisa MEH pada spesimen TL. Gambar 13 (a) menunjukkan harga maximum hoop stress 410 MPa lebih besar dari pada yield strength sekitar 328 MPa (Tabel 1), kemudian perambatan retak terjadi karena *opening type fracture* dengan arah perambatan retakan tegak lurus terhadap arah pembebanan. Lebih lanjut, dalam analisa MEH perambatan retak dimodelkan seperti ditunjukkan pada Gambar 13 (a). Disini, hasilnya menunjukkan bahwa harga *shear stress maximum*  $\tau_{r\theta \max}$  terjadi pada ligamen dekat ujung retak sekitar 215 MPa lebih besar dari pada *shear strength* 183 MPa seperti pada Tabel 1. Hasil ini menyatakan bahwa perambatan retakan disebabkan oleh *shear fracture*. Hasil dari analisa MEH ditunjukkan pada Gambar 13 (c). Terlihat dari gambar bahwa *shear fracture maximum*  $\tau_{r\theta \max} = 243$  MPa lebih besar dari pada *shear strength* seperti pada Tabel 1. Hasil ini menunjukkan bahwa perambatan retak terjadi karena *shear type fracture* yang hasilnya serupa seperti yang diperoleh dengan cara eksperimental seperti ditunjukkan pada Gambar 8 (b).

Oleh karena itu, perambatan retakan dapat diestimasi, bahwa retak akan merambat dalam arah dimana kekuatan lokal dari material adalah lemah. Dalam kasus ini, ketahanan retakan paling rendah adalah dalam arah sejajar atau hampir sejajar arah pengerolan dari material.

### Efek Lubang Kecil

Gambar 14 menunjukkan perilaku perambatan retak untuk spesimen LT dengan satu lubang didepan ujung retak pada mode I murni, mode

campuran, dan mode II murni seperti ditunjukkan dalam gambar (a), (b), dan (c). Tanda panah dalam gambar menunjukkan arah pembebanan. Lubang dengan diameter 6 mm dibuat dengan jarak 11 mm didepan ujung retak awal pada spesimen.

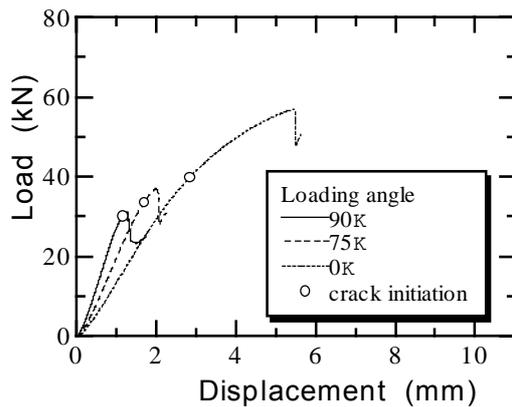


Gambar 14. Perilaku Perambatan Retak pada Spesimen LT dengan Satu Lubang.

Gambar 14 (a) menunjukkan perilaku perambatan retak pada mode I terjadi dalam bentuk *opening type fracture*. Disini permukaan retakan sekitar permukaan spesimen terlihat adanya *shear lip*, tetapi permukaan retakan adalah rata pada bagian tengah dari ketebalan spesimen. Dalam kasus ini, nampak bahwa permukaan retakan untuk keseluruhannya tidak rata karena orientasi butir mengubah proses pertumbuhan retak pada level kondisi lokal. Perilaku retak pada mode campuran dengan sudut pembebanan  $45^\circ$  adalah seperti ditunjukkan pada Gambar 14 (b). Dalam kasus ini inisiasi retakan terjadi dalam bentuk *opening fracture*. Lebih lanjut, perambatan retak terjadi karena harga kritis dari *shear stress* yang kemudian terjadi *shear fracture* karena terjadinya *shear stress* kritis pada ligamen.

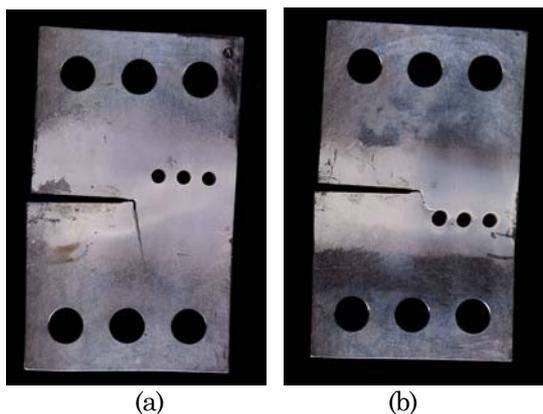
Dalam kasus mode II murni dengan sudut pembebanan  $0^\circ$  (Gambar 14 c) inisiasi dan perambatan retak terjadi hanya karena *shear fracture* dan permukaan retakan adalah rata.

Gambar 15 menunjukkan efek dari lubang kecil berkaitan dengan kurva hubungan beban-perpindahan pada mode I, mode campuran ( $\alpha = 75^\circ$ ), dan mode II. Simbol O yang terdapat pada kurva menunjukkan besarnya beban pada saat terjadinya inisiasi retakan yang diidentifikasi dengan rekaman video. Pada kurva terlihat bahwa untuk semua kasus menunjukkan beban turun setelah perambatan retak menyatu dengan lubang. Dari hasil analisa MEH diperoleh distribusi *shear stress* sekitar ujung retak diatas 150 MPa dan meningkat ke arah lubang yang kemudian terjadi retakan geseran antara ujung retak dan lubang.



Gambar 15. Kurva Hubungan Beban-Perpindahan untuk Spesimen Berlubang

Dari sudut pandang eksperimental diperoleh bahwa, perilaku perambatan retak pada spesimen LT dengan tiga lubang didepan ujung retak pada sudut pembebanan  $\alpha = 15^\circ$  (Gambar 16) menunjukkan hasil yang berbeda. Pada kasus lubang terletak pada bagian atas di depan ujung retak (Gambar 16 (a)), inisiasi dan perambatan retakan terjadi dalam bentuk *opening type fracture*. Tetapi, bila lubang terletak pada bagian bawah di depan ujung retak (Gambar 16 (b)), maka ada dua jenis proses retakan yang terjadi. Pertama, terjadi *opening type fracture* pada saat inisiasi retakan kemudian terjadi *shear type fracture* karena pengecilan ligamen antara ujung retak dan lubang. Dari hasil ini, dapat dinyatakan bahwa dengan adanya lubang kecil di depan ujung retak dapat mengecil ligamen antara ujung retak dengan lubang karena perambatan retak yang pada akhirnya terjadi ketidakstabilan retakan geser (*shear type fracture*).



Gambar 16. Perilaku Perambatan Retak pada Spesimen LT dengan Tiga Lubang Didepan Ujung Retak

### KESIMPULAN

Dalam uji retakan mode campuran dengan komponen mode I lebih dominan, maka arah perambatan retakan tegak lurus terhadap arah pembe-

banan dalam bentuk *opening mode*. Bila komponen mode II meningkat, maka retak geser (*shear type fracture*) menjadi lebih dominan.

Ketahanan terhadap retakan dipengaruhi oleh arah pengerolan dari material dan harganya lebih rendah dalam arah pengerolan dari pada dalam arah yang lain.

Bila komponen mode II lebih dominan, maka inisiasi retakan terjadi dalam bentuk retak geser. Oleh karena itu, kriteria retakan tidak mengikuti kriteria *maximum hoop stress*. Lebih lanjut, terjadi ketidak stabilan retak geser pada ligamen bila shear stress melebihi kekuatan geser (shear strength) dari material.

Dengan adanya lubang kecil didepan ujung retak, maka hal ini mempengaruhi arah perambatan retak, dan kemudian retak merambat ke arah lubang yang disebabkan oleh retak geser.

### Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih atas fasilitas labotatorium, dukungan dana dan arahan yang diberikan oleh Prof. Kikuo KISHIMOTO dan diskusi dan kerja sama yang baik dengan Dr. Masaki OMIYA, dan Mr. Munetsugu HANJI atas bantuannya pada pengambilan data, ketiganya dari Tokyo Institute of Technology (TIT), Tokyo Jepang. Penelitian ini terlaksana dibawah program *Visiting Researcher* yang disupport penuh oleh TIT. Terima kasih kami sampaikan juga kepada Prof. Dr. Mitsuo NOTOMI dari Meiji University, Tokyo, Jepang yang telah membantu sebagian dana kepada penulis.

### DAFTAR PUSTAKA

1. Erdogan, F., and Sih, G. C., "On the Crack Extension in Plates under Plane Loading and Transverse Shear," *J. of Basic Eng.*, Vol. 85, 1963. pp. 519-525.
2. Halback, N., and Nilsson, F., "Mixed mode I/II Fracture Behavior of an Aluminium Alloy," *J. Mech. Physics Solids*, Vol. 42, No. 9, 1994. pp. 1345-1374.
3. Aoki, S., Kishimoto, K., Yoshida, T., Sakata, M., and Richard, H. A., "Elastic-Plastic Fracture Behavior of an Aluminum Alloy under Mixed mode Loading," *J. Mech. Physics Solids*, Vol. 38, No. 2, 1990. pp. 195-213.
4. Husaini, and Kishimoto, K., *Mixed mode Fracture Behavior of PC/ABS Blends*, Proc. 2<sup>nd</sup> Int. Conf. on Exp. Mech. (ICEM 2000), Singapore, 2000. pp. 111-116,
5. Husaini, Kishimoto, K., Notomi, M., and Shibuya, T., "Fracture Behavior of PC/ABS Resin Under Mixed Mode Loading," *J. Fatigue Frac-*

- ture Eng. & Materials Structure, Vol. 24, No. 12, 2001, pp. 895-903.
6. Husaini, *Study on Fracture Behavior of ABS resin and PC/ABS Blends under Mode I and Mixed Mode Loading*, Doctoral Dissertation, Dept. of Mech. and Intelligent Systems Eng., Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japan. June 1998.
  7. JSME Standard Method of Test for Elastic-Plastic Fracture Toughness  $J_{IC}$ -S001-1981, JSME, 1981.
  8. Richard, H. A., and Benitz, K., "A Loading Device for the Creation of Mixed mode in Fracture Mechanics," *Int. J. Fracture*, Vol. 22, 1983., pp. R55-R58.
  9. Anderson, T. L., *Fracture Mechanics Fundamentals and Application*, CRC Press, Inc., Boca Raton Ann Arbor Boston, 1991.
  10. MARC Analysis Research Corporation, *MARC User's Manual*, California 94306 USA, 1994.
  11. Murakami, Y., *Stress Intensity Factor Handbook*, Pergamon Press, Vol.2, 1987. pp. 929.