

Perilaku Retak Aluminium Paduan A6061-T6 pada Pembebanan Mixed Mode

Husaini

Laboratorium Material dan Mekanika Retakan, Jurusan Teknik Mesin,
Fakultas Teknik UNSYIAH, Darussalam, Banda Aceh 23111
E-mail: husaini-m@mailcity.com

Zuhaimi

Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Lhokseumawe

ABSTRAK

Penelitian ini membahas perilaku retak material aluminium paduan (A6061-T6) pada pembebanan mode campuran (Mode I+II). Spesimen dibuat dalam bentuk *Compact Tension Shear (CTS)* dan menggunakan alat pembebanan dimana sudut antara sumbu pembebanan dan permukaan retak bervariasi dari 90^0 (mode I) sampai 0^0 (mode II). Perilaku retakan awal dan perambatan retak dimonitor dengan mikroskop digital. Semakin kecil sudut pembebanan, beban yang dibutuhkan pada spesimen untuk memulai terjadinya awal retakan semakin besar. Pada pembebanan dengan komponen mode II relatif tinggi, terlihat bahwa retak tipe geseran terjadi lebih dulu kemudian diikuti dengan retak tipe terbuka. Hasil-hasil eksperimen ini akan diklarifikasi dengan analisa numerik melalui simulasi metode elemen hingga.

Kata kunci: Aluminium paduan A6061-T6, mode campuran, ketangguhan retak, perambatan retak, analisa FEM.

ABSTRACT

Fracture behavior of aluminum alloys (A6061-T6) under mixed mode (Mode I+II) loading was studied. Compact-tension-shear (CTS) specimen was employed and angle between loading axis and the crack surface was varied from 90^0 (mode I) to 0^0 (mode II). The crack extension (crack initiation and propagation) behaviors observed by a digital 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

Keywords: Aluminum alloy A6061-T6, mixed mode, fracture toughness, crack propagation, FEM analysis.

PENDAHULUAN

Teknologi material dibidang teknik mesin disesuaikan dengan kebutuhan dan tingkat keandalan yang tinggi dengan keadaan konstruksi seringan mungkin. Paduan aluminium adalah salah satu jenis material yang banyak penerapannya pada industri maju [1] karena memiliki keunggulan dari sisi: kemampuan permesinan yang baik, penyelesaian permukaan sempurna, kekuatan yang tinggi dan ringan, ketahanan terhadap korosi. Kegagalan pada komponen mesin, seperti keretakan akibat beban yang terus menerus tidak dapat dihindari dan dihilangkan sama sekali, namun terus diminimalkan melalui penelitian-penelitian.

Masalah keretakan ini telah banyak dilakukan penelitian dalam berbagai bentuk pengujian, namun perilaku retak pada pembebanan mode campuran masih perlu terus dikembangkan. Aoki,S., dkk.[2], menyatakan perilaku keretakan secara elastis-plastis

paduan aluminium A5083-O di bawah pembebanan mode campuran dengan tingginya komponen mode II, retak awal pada perpatahan tipe geseran terjadi pada ujung retak di dekat permukaan spesimen, dan retak yang lain terjadi pada ketebalannya. Penelitian tentang perilaku perluasan retak aluminium A2024-T351 pada pembebanan mode campuran telah dilakukan pula oleh Husaini, dkk.,[3] dimana dengan adanya lubang-lubang kecil dimuka ujung retak mempengaruhi arah perambatan retak. Penelitian tentang perpatahan material di laboratorium menjadi hal penting dilakukan untuk memperkirakan dan mencegah kegagalan pada komponen mesin yang dapat membawa efek bagi keselamatan manusia. Penelitian dimaksud dilakukan melalui metode eksperimental dengan menggunakan spesimen *CTS (Compact Tension Shear)* dari material aluminium A6061-T6. Pemberian beban dilakukan pada kondisi mode I, mode II dan mode campuran (gabungan mode I dan mode II) pada laju

pembebanan yang konstan, yaitu 0,05 mm/second (*cross-head rate*).

Arah dari rambatan dan peluang mulai retak tergantung pada distribusi tegangan yang ada pada ujung retak. Harga kritis *Stress Intensity Factor* (*SIF*) menurut Y.Murakami [4], dapat ditentukan dengan persamaan:

$$\begin{aligned} K_I &= F_I \frac{P}{Wt} \sqrt{\pi a} \\ K_{II} &= F_{II} \frac{P}{Wt} \sqrt{\pi a} \end{aligned} \quad (1)$$

Dengan adanya mikromekanik di dalam proses retakan untuk masalah *plane*, kriteria retak ditetapkan dalam batas-batas K_I , K_{II} dan sifat-sifat material. Umumnya harga ketangguhan retak material logam diperoleh dari standar pengujian ASTM E 399 dengan menggunakan *CT* (*Compact Tension*) spesimen. Untuk spesimen CTS, harga kritis faktor intensitas tegangan K_I pada retak awal dibawah pembebanan mode I [3], dicatat sebagai K_{lin} yang menunjukkan harga ketangguhan retak bahan. Hubungan antara K_I dan K_{II} diberikan oleh persamaan:

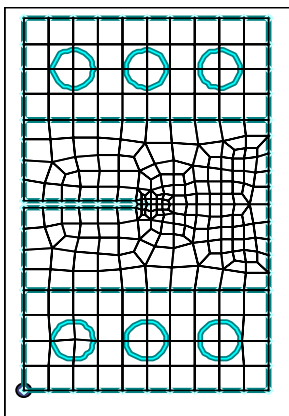
$$\begin{aligned} \left(\frac{K_I}{K_{IC}} \cos^2 \theta_0 - \frac{3}{2} \frac{K_{II}}{K_{IC}} \sin^2 \theta_0 \right) \cos \frac{\theta_0}{2} &= 1 \\ \theta_0 &= \sin^{-1} \left(\frac{K}{\sqrt{1+9K^2}} \right) - \tan^{-1} 3K \end{aligned} \quad (2)$$

Dengan ratio mode campuran: $K = K_I / K_{II}$

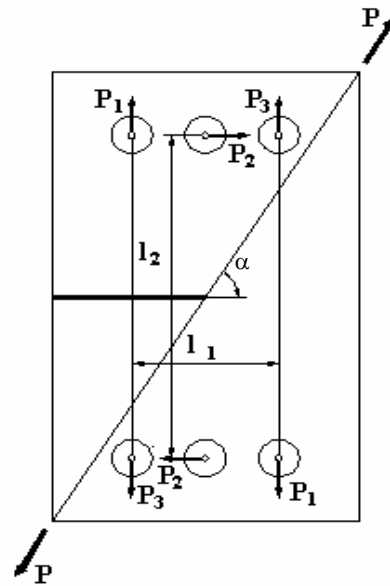
Di dalam model analisa elemen hingga, pengaturan *mesh* didekat ujung retak dibagi ke dalam geometri yang lebih kecil (*fine mesh*) seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Kondisi pembebanan untuk P_1 , P_2 dan P_3 pada lubang di dalam spesimen ditunjukkan oleh Gambar 2. Besarnya beban mengikuti persamaan:

$$\begin{aligned} P \cos \alpha &= P_2 \\ P \sin \alpha &= P_1 + P_3 \\ P_1 l_1 + P_2 l_2 &= P_3 l_1 \end{aligned} \quad (3)$$

Dimana P dicatat sebagai beban aplikasi pada alat pembebanan



Gambar 1. Mesh Elemen Hingga



Gambar 2. Aplikasi Pembebanan

METODE PENELITIAN

Material Uji (spesimen)

Material yang digunakan pada penelitian ini telah ditetapkan sesuai dengan judul, yaitu Aluminium A 6061-T6 berupa hasil coran dalam bentuk billet. Karena strukturnya dianggap homogen, dalam hal ini tidak memperhatikan orientasi arah (*rolling direction*). Komposisi kimia dan sifat-sifat mekanik dari material secara berurutan ditunjukkan pada Tabel 1 dan Tabel 2. Spesimen dibuat dalam bentuk CTS berdasarkan standar test JSME [5], untuk ketangguhan retak elastis-plastis J_{IC} - S001. Geometri spesimen seperti ditunjukkan pada Gambar 3.

Tabel 1. Komposisi Kimia Aluminium A6061-T6 (%)

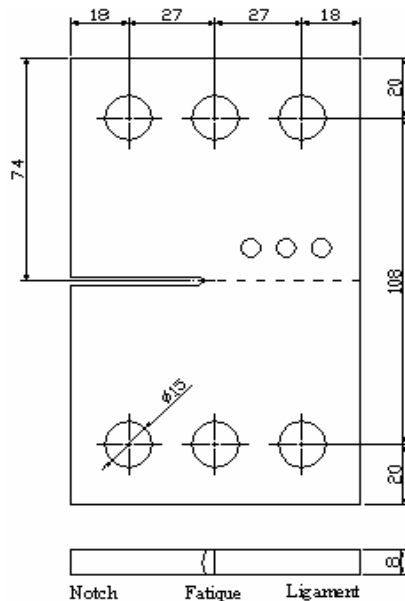
Si	Fe	Cu	Mn	Mg
0,6496	0,6777	0,2487	0,1129	0,9290
Zn	Ti	Cr	Pb	Al
0,1196	0,1810	0,1014	0,0073	97,135

Sumber: PT. Cakra Compact

Tabel 2. Sifat-sifat Mekanik Aluminium A6061-T6

Ultimate Tensile Strength	σ_u	310 Mpa
Yield Strength	σ_{ys}	276 Mpa
Modulus Of Elasticity	E	68.9 Gpa
Shear Strength	τ	207 Mpa
Poison ratio	ν	0.33
Elongation	δ	12 %

Sumber: ASM Hand Book



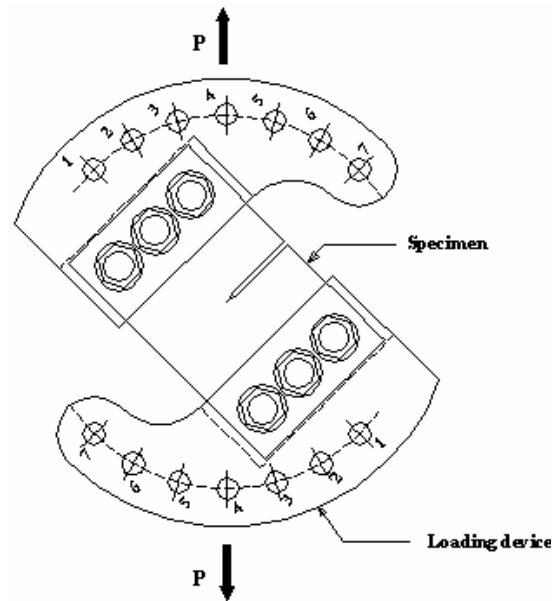
Gambar 3. Geometri Spesimen CTS

Prosedur Pengujian

Dalam metode eksperimen ini ada tiga tahapan yang dilakukan, yaitu: kalibrasi alat, pembuatan *fatik pre crack* dan uji retak dengan pembebanan pada quasi static. Untuk memegang spesimen, disiapkan alat pembebanan khusus yang dikembangkan oleh *Richard* dan *Benitz* [6], dan penjaran retak selama pengujian berlangsung dapat diamati di layar monitor pada mikroskop digital. Spesimen CTS diikat pada *loading device* dan dipasang pada alat *servo pulser*. Pertama spesimen diberi beban fatik untuk mendapatkan retak awal sepanjang 3 mm dari ujung *notch* sebagai standar spesimen. Selanjutnya diberi beban statik pada laju yang konstan sebesar 0,05 mm/second, kemudian hasilnya direkam melalui pengontrol dengan program rikhendensi pada alat *servopulser*.

Posisi pembebanan dapat diatur melalui lubang-lubang pada *loading device* seperti ditunjukkan pada Gambar 4. Pembebanan mode I yaitu dengan arah tegak lurus permukaan retak awal, dengan cara mengatur melalui lubang 1-1. Beban pada mode II dapat dilakukan dengan arah geseran melalui lubang 7-7, sedangkan untuk mode campuran dapat diatur antara keduanya.

Dari hasil pengujian pada *servopulser*, data beban dan perpindahan dalam besaran voltase dengan menggunakan rumus melalui program excel dirubah kedalam satuan N dan mm serta diperoleh grafik hubungan keduanya. Dengan memasukkan data beban pada saat terjadi inisiasi retak ke dalam persamaan (1), diperoleh harga ketangguhan retak. Arah penjaran retak dapat dicatat dengan alat ukur sudut (*bevel protector*). Analisa secara numerik dilakukan dengan metode elemen hingga dengan menggunakan software MSC/NASTRAN for windows yang mampu menyelesaikan persoalan-persoalan struktur. Distribusi tegangan pada spesimen CTS diamati disekitar dekat ujung retak.

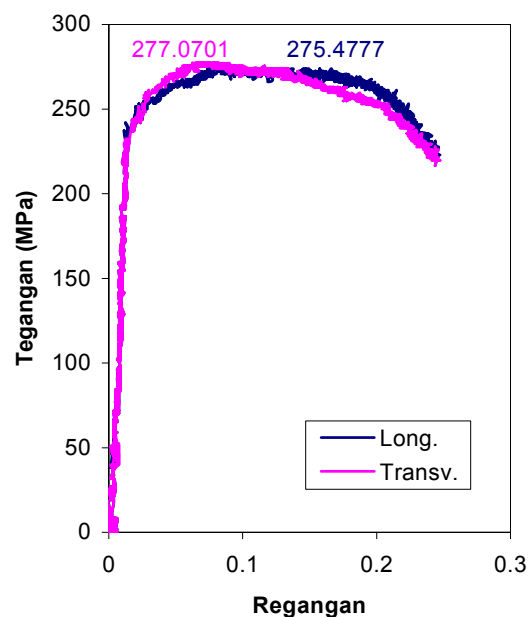


Gambar 4. Posisi Pembebanan (Mode Campuran)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Sifat Mekanik

Dari Tabel 2 di atas telah ditunjukkan sifat mekanik Aluminium A 6061-T6 yang diperoleh dari ASM Hand Book, dan untuk mendapatkan harga yang sebenarnya perlu dilakukan lagi pengujian tarik statik. Dengan menggunakan standar uji ASTM E8 dimana spesimen uji dibuat dalam dua arah (orientasi) yaitu arah memanjang (*longitudinal*) dan arah melintang (*transversal*). Hubungan tegangan dan regangan dari hasil uji tarik statik ditunjukkan pada Gambar 5, pada kedua arah menunjukkan hasil yang sama (*homogen*). Sifat mekanik dari aluminium A 6061-T6 ditunjukkan pada Tabel 3.



Gambar 5. Hubungan Tegangan vs Regangan

Tabel 3. Sifat Mekanik Aluminium A 6061-T6

Ultimate tensile strength	σ_u	276 MPa
0.2 % Yield strength	σ_y	243 MPa
Modulus of elasticity	E	61.1 GPa
Shear strength	τ	184 MPa
Poisson ratio	ν	0.33
Elongation	δ	18.5 %

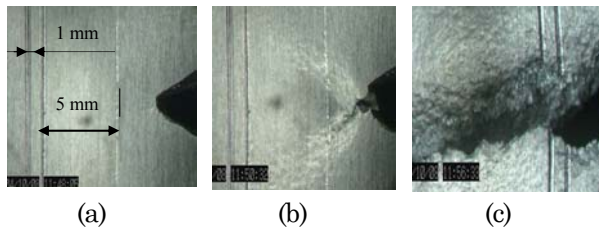
Ketangguhan Retak

Pengujian ketangguhan retak dilakukan berdasarkan standar test JSME untuk elastis-plastis J_{IC} . S001 dengan spesimen CTS pada retak lelah $a/w \cong 0,5$. Dengan menggunakan Rersamaan 1 harga ketangguhan retak diperoleh:

$$K_{Iin} = 27,03 \text{ MPa}\sqrt{m}$$

Perilaku dan Arah Penjalaran Retak

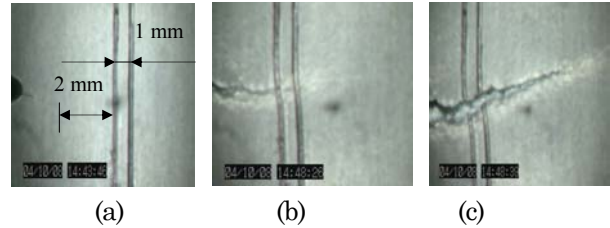
Perilaku retak pada pembebanan mode I yang direkam oleh mikroskop digital pada saat pengujian berlangsung dapat ditunjukkan pada Gambar 6 untuk sudut pembebanan $\alpha = 90^\circ$ (lubang 1-1)


Gambar 6. Hasil Rekaman Mikroskop Digital pada Perluasan Retak untuk Sudut Pembebanan $\alpha = 90^\circ$

Pada jarak 5 mm dari ujung retak yang diplot pada garis batas 1 mm pada permukaan spesimen seperti ditunjukkan pada Gambar 6 (a), dimana skala ini digunakan untuk mengidentifikasi retak awal yang mudah dan gambar ini juga menunjukkan pada kondisi sebelum dibebani. Kemudian pada awal pembebanan ($P=18,16$ kN) mulai terjadi inisiasi retak yang ditunjukkan pada Gambar 6 (b) dan laju penjalaran retak pada batas garis batas 1 mm tersebut dicatat oleh *digital stop watch* yaitu sebesar 2,165 detik. Perbedaan sudut penjalaran retak di ujung retak awal dapat diamati berdasarkan deformasi permukaan. Gambar 6 (c) menunjukkan retak yang telah menjalar jauh melewati garis batas 1 mm dan menjalar secara cepat dengan kondisi beban semakin menurun disebabkan penampang yang menahan beban (*ligament*) semakin mengecil. Pada pembebanan mode I ini, mekanisme perluasan retak terjadi di dalam perpatahan tipe terbuka dan pada saat awal perambatan retak terjadi secara paralel yang didahului oleh pengecilan penampang (*necking*).

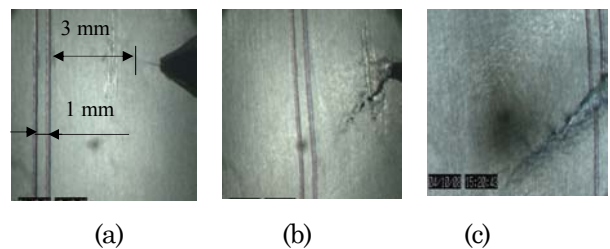
Gambar 7 menunjukkan deformasi dan proses penjalaran retak yang diambil dari rekaman mikroskop digital pada pembebanan mode campuran

dengan sudut $\alpha = 60^\circ$ (lubang 3-3). Gambar 7 (a) memperlihatkan kondisi awal sebelum retak menjalar dan garis batas 1 mm yang diplot pada jarak 2 mm dari ujung retak untuk mengetahui laju penjalaran retak.


Gambar 7. Hasil Rekaman Mikroskop Digital pada Perluasan Retak untuk Sudut Pembebanan $\alpha = 60^\circ$

Pada saat beban mencapai 18,65 kN terjadi inisiasi retak dan retak mulai menjalar dengan perbedaan sudut yang sangat jelas dari ujung retak awal yaitu mengikuti arah yang hampir tegak lurus arah pembebanan seperti ditunjukkan oleh Gambar 7 (b). Laju penjalaran retak yang melewati garis batas 1 mm yang dicatat oleh *digital stop watch* adalah 2,565 detik. Pada kondisi pembebanan mode ini, sudah mulai adanya komponen mode II sehingga pada awal keretakannya membentuk bibir geser (*shear lip*) yaitu perpatahan tipe geseran. Gambar 7 (c) menunjukkan retak yang terus menjalar mengikuti tegak lurus arah pembebanan dan akhirnya pertumbuhan retak terjadi di dalam perpatahan tipe terbuka sampai kegagalan akhir.

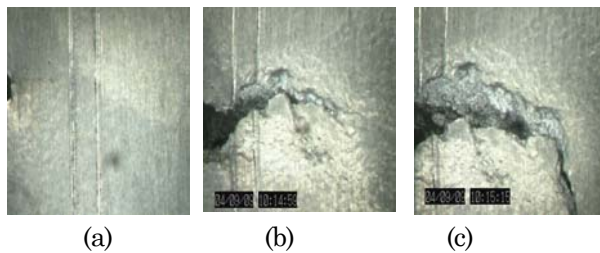
Gambar 8 juga memperlihatkan proses penjalaran retak saat pengujian berlangsung pada kondisi pembebanan mode campuran dengan sudut $\alpha = 45^\circ$ (lubang 4-4). Gambar 8 (a) menunjukkan keadaan awal sebelum dibebani dan garis batas 1 mm yang di plot pada jarak 3 mm dari ujung retak awal (*fatigue pre crack*). Gambar 8 (b) menjelaskan retak awal yang terjadi di dalam tipe geseran dimana dengan bertambahnya komponen mode II perluasan retak tipe ini terus berlangsung sampai melewati garis batas 1 mm yang berlanjut sampai seperti Gambar 8 (c). Beban pada saat inisiasi retak terjadi pada 18,80 kN dan laju penjalaran retak yang tercatat oleh *digital stop watch* sebesar 2,375 detik.


Gambar 8. Hasil Rekaman Mikroskop Digital pada Perluasan Retak Untuk Sudut Pembebanan $\alpha = 45^\circ$

Dari beberapa pengujian di atas terhadap perilaku perluasan retak pada pembebanan mode campuran dapat dijelaskan bahwa, dengan tingginya komponen mode II dari pada mode I seperti untuk sudut pembebanan $\alpha = 30^\circ$ dan sudut pembebanan $\alpha = 15^\circ$, perilaku perpatahan hampir sama dengan sudut pembebanan $\alpha = 45^\circ$ (gambar 8). Untuk sudut pembebanan yang lebih besar, seperti komponen mode I untuk sudut pembebanan $\alpha = 75^\circ$, perilaku perpatahan sama dengan sudut pembebanan $\alpha = 60^\circ$ (Gambar 7) yaitu pada awalnya membentuk bibir geser namun akhirnya tetap terjadi perpatahan jenis terbuka.

Untuk melihat laju penjaran retak dari hasil yang dicatat oleh *digital stop watch*, bahwa makin jauh dari ujung retak awal penjaran retak makin cepat merambat pada laju pembebanan yang sama.

Gambar 9 memperlihatkan urutan deformasi dan proses perpatahan di sekitar ujung retak yang diambil dari rekaman mikroskop digital pada kondisi pembebanan mode II dengan $\alpha = 0^\circ$ (lubang 7-7). Gambar 9 (a) menunjukkan kondisi awal sebelum retak menjaral dimana waktu yang dibutuhkan untuk terjadinya inisiasi retak lebih lama dan beban yang lebih tinggi.



Gambar 9. Hasil Rekaman Mikroskop Digital pada Perluasan Retak untuk Sudut Pembebanan $\alpha = 0^\circ$

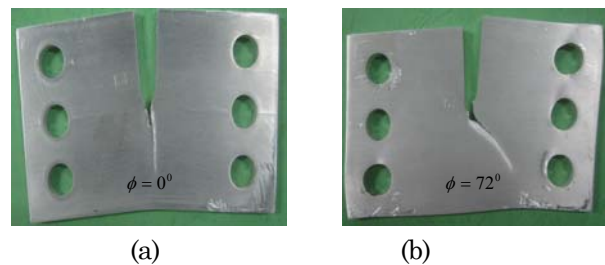
Pada saat beban mencapai 22,75 kN, terjadi inisiasi retak dan retak menjaral dengan cepat pada perpatahan tipe geseran yang ditunjukkan pada Gambar 9 (b). Perluasan retak yang terjadi tidak paralel dan akhirnya retak terus menjaral dengan sangat cepat di dalam perpatahan tipe geseran sampai kegagalan akhir yang ditunjukkan oleh Gambar 9 (c). Umumnya perambatan retak secara paralel untuk retak awal dan perpatahan permukaan tipe terbuka, sama dengan pada saat dilakukan uji tarik dimana pada uji keretakan secara beban statik sebelum patah juga terjadi pengcilan penampang yang terjadi sepanjang *ligament*.

Hasil pengujian dengan beban statik untuk berbagai posisi pembebanan mulai dari mode I ($\alpha = 90^\circ$), mode campuran ($\alpha = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$) dan mode II ($\alpha = 0^\circ$) dapat ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil uji beban statik spesimen CTS

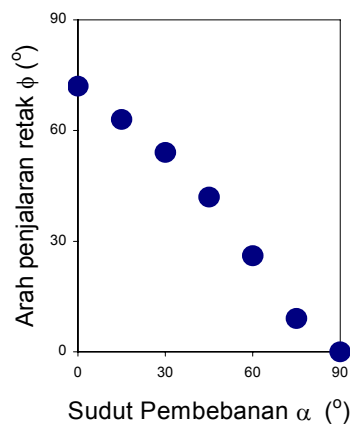
No.	Sudut α ($^\circ$)	P_{in} (kN)	P_{max} (kN)	Sudut ϕ (kN)
1	90	18,16	18,90	0
2	75	18,55	19,15	9
3	60	18,65	19,25	26
4	45	18,80	19,85	42
5	30	19,35	20,25	54
6	15	20,35	21,70	63
7	0	22,75	24,80	72

Arah penjaran retak yang diukur dengan *bevel protector* sama dengan sudut perluasan retak (ϕ) seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4 di atas. Secara teoritis bahwa arah penjaran retak selalu tegak lurus arah pembebanan dan dari tabel 4 dapat ditunjukkan pada pembebanan mode I yaitu pada sudut $\alpha = 90^\circ$, terjadi arah penjaran retak ($\phi = 0^\circ$). Dan seterusnya makin kecil sudut pembebanan, arah penjaran retak (ϕ) makin besar seperti terakhir untuk pembebanan mode II pada sudut $\alpha = 0^\circ$ diperoleh arah penjaran retak ($\phi = 72^\circ$) seperti ditunjukkan pada gambar 10 (a) dan (b)



Gambar 10. Spesimen yang telah retak (a) sudut $\alpha = 90^\circ$, (b) sudut $\alpha = 0^\circ$

Gambar 11 berikut menunjukkan hubungan antara sudut pembebanan (α) dan arah penjaran retak (ϕ) untuk berbagai posisi pembebanan.

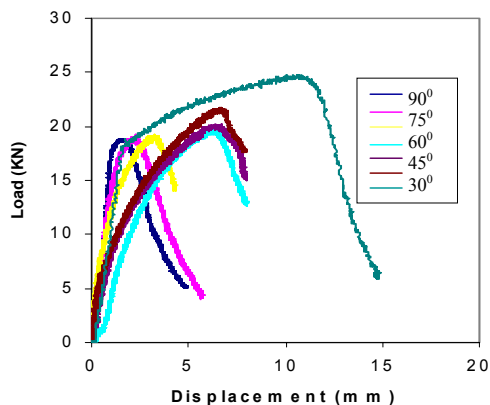


Gambar 11. Hubungan antara Sudut Pembebanan dan Arah Penjaran Retak

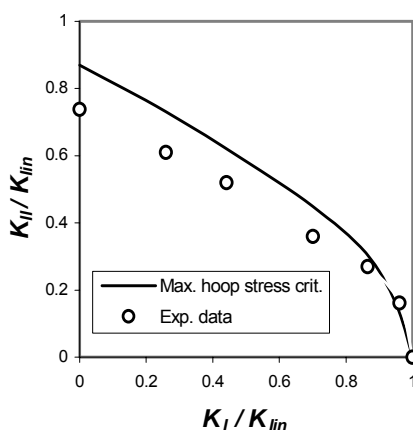
Dalam gambar 11 dapat dilihat bahwa pada sudut $\alpha = 90^\circ$, arah penjalaran retak saling tegak lurus dengan arah pembebanan dan ini sesuai dengan analisa teoritiknyanya. Selanjutnya makin kecil sudut pembebanan, penyimpangan arah penjalaran retak makin besar dan pada akhir pengujian untuk sudut pembebanan $\alpha = 0^\circ$, arah penjalaran retak yang idealnya pada sudut $\phi = 90^\circ$ pada kenyataannya terjadi adalah, $\phi = 72^\circ$. Hal tersebut dipengaruhi oleh arah dari pada *notch* yang terbentuk dan penjalaran retak yang tidak paralel.

Kriteria Retak

Gambar 12 menunjukkan hubungan beban dan perpindahan untuk berbagai posisi pembebanan. Kurva menunjukkan retak awal yang terjadi di bawah beban maksimum yaitu pada bagian-bagian garis lurus dari grafik hubungan beban vs perpindahan.



Gambar 12. Kurva Beban vs Perpindahan pada Berbagai Posisi Pembebanan

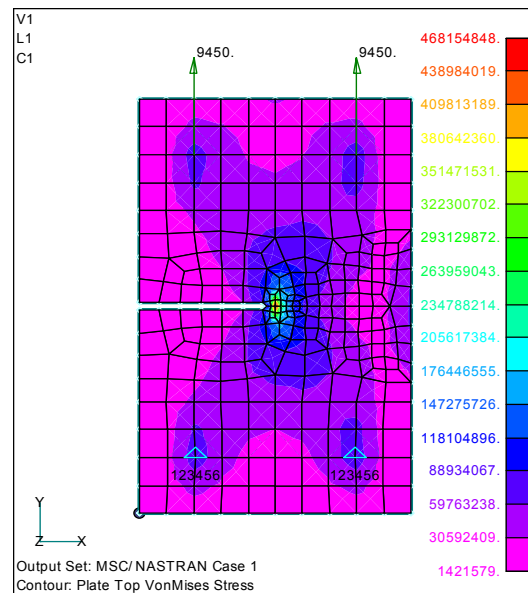


Gambar 13. Faktor Intensitas Tegangan Kritis pada Pembebanan Mode Campuran

Gambar 13 menunjukkan faktor intensitas tegangan kritis pada retak awal dimana kedua sumbu adalah dinormalisir oleh ketangguhan retak K_{Iin} . Garis padat pada gambar menunjukkan kurva

batas perpatahan untuk kriteria tegangan maksimum (*maximum hoop stress criterion*) yang dapat diselesaikan dengan Persamaan 2. Hasil pengujian yang berupa lingkaran kecil putus-putus pada kurva dapat diperoleh dengan Persamaan 1 dimana data beban yang dimasukkan adalah beban saat inisiasi retak. Kriteria retak yang diperlihatkan oleh kurva pada Gambar 13 menunjukkan bahwa ketika komponen mode II melebihi beberapa harga kritis pada saat pengujian material, daya tahan perpatahan akan berkurang yang ditunjukkan di bawah garis padat pada Gambar 13. Perilaku perpatahan ini berhubungan dengan proses perpatahan pada tipe terbuka kemudian diikuti oleh perpatahan geseran.

Gambar 14 memperlihatkan simulasi elemen hingga dua dimensi dengan beban aplikasi 18900 N dan analisa beban untuk P_1 dan P_3 masing-masing 9450 N sesuai dengan perhitungan pada Persamaan 3.



Gambar 14. Simulasi elemen hingga

Dari hasil simulasi diperoleh tegangan yang terjadi disekitar ujung retak sebesar 468,15 MPa seperti yang ditunjukkan oleh warna merah pada Gambar 14, sedangkan dari hasil pengujian sebesar 420 MPa.

KESIMPULAN

Dari hasil penelitian tentang perilaku retak aluminium A 6061-T6 pada pembebanan mode campuran, dapat diambil beberapa kesimpulan berikut ini:

1. Harga ketangguhan retak (fracture toughness) aluminium A 6061-T6 diperoleh dari hasil pengujian sebesar $K_{Iin} = 27,03 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$

2. Perilaku perambatan retak pada pembebanan mode campuran, dengan tingginya komponen mode II akan didominasi oleh perpatahan tipe geseran. Komponen mode I yang lebih dominan, awalnya terbentuk bibir geser (*shear lip*) dan selanjutnya terjadi perpatahan tipe terbuka sampai kegagalan akhir dengan arah perambatan retak tegak lurus arah pembebanan.

Untuk kriteria retak, menunjukkan bahwa ketika komponen mode II melebihi beberapa harga kritis pada saat pengujian material, daya tahan perpatahan akan berkurang, dan makin kecil sudut pembebanan makin besar beban yang dibutuhkan untuk mulai terjadinya retak.

DAFTAR PUSTAKA

1. ASM, Metal Handbook Ninth Edition, *Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Pure Metals*, Vol. 2, American Society for Metals, Ohio 44073. 1989,
2. Aoki, S., K. Kishimoto, T. Yoshida, M. Sakata, and H.A. Richard, *Elastic-Plastic Fracture Behavior of an Aluminium Alloy under Mixed Mode Loading.*, *J. Mechanical Physics Solids*, Vol.38, NO.2, 1990, pp. 195-213.
3. Husaini, K. Kishimoto, M. Hanji, M. Omiya, and T. Shibuya, *Mixed Mode Crack Extension Behavior of A 2024 – T351 Aluminium*, Proc. Int. Seminar on Experimental Mechanics (ETM 2002), Bali, 2002, pp. 69-77.
4. Murakami, Y., *Stress Intensity Factor Handbook*, Pergamon Press, Vol.2, 1987, pp. 929.
5. JSME Standard Method of Test for Elastic-Plastic Fracture Toughness J_{IC} -S001-1981, JSME, 1981.
6. Richard, H.A., K. Benitz, *A Loading device for the creation of Mixed Mode in Fracture Mechanics*, International Journal of Ffracture, Vol. 22, 1983, pp. R55 – R58.
7. Dieter, G.E., *Mechanical Metalurgi*, McGraw Hill Book Company, New York, 1986.