

PERAMBATAN RETAK AKIBAT PEMBEBANAN MULTIAKSIAL

H. Agus Suhartono

Balai Besar Teknologi Kekuatan Struktur (B2TKS) - BPPT
Kawasan Puspiptek, Serpong15314, Tangerang

ABSTRAK

PERAMBATAN RETAK AKIBAT PEMBEBANAN MULTIAKSIAL. Makalah ini medeskripsikan perambatan retak pada logam dibawah pengaruh beban fatik uniaksial dan multiaksial. Pengujian fatik dilakukan untuk menyelidiki perilaku perambatan retak tahap I dan tahap II. Hasil uji digunakan untuk verifikasi rumus retak perambatan retak yang berasal dari rumus mekanika retak. Pengujian fatik tarik-tekan, uji fatik kombinasi tarik-tekan dan torsi baik dengan kombinasi beban secara proporsional maupun non-proporsional menyebabkan retak merambat tegak lurus terhadap tegangan tarik maksimum, hal ini sesuai dengan rumus tegangan tangensial maksimum yang diberikan oleh G. C. Sih di Richard [1]. Tetapi pada pembebanan torsi murni terjadi penyimpangan dari hukum tersebut, retak merambat paralel terhadap tegangan geser maksimum

Kata kunci : Perambatan retak, fatik, tegangan tangensial maksimum

ABSTRACT

CRACK PROPAGATION UNDER MULTIAXIAL LOADING. This paper describes the crack propagation of the metallic material under uniaxial and multiaxial fatigue loading. Uniaxial and multiaxial fatigue testing was conducted to examine the stage I and stage II crack propagation behavior. The testing result is used to verify the crack propagation criteria for fatigue crack growth, which based on fracture mechanics law. Tension-compression and mixed loading of tension-compression and torsion proportional loading as well as non proportional fatigue loadings cause cracks to propagate perpendicular to maximum tension stress which is conform to the maximum tangential stress criteria suggested by G.C. Sih in Richard[1]. However under pure torsion loading, a deviation of the rule is taken place, the cracks propagate parallel to the maximum shear stress.

Key words : Crack Propagation, fatigue, maximum tangential stress

PENDAHULUAN

Perambatan retak merupakan faktor yang berperan penting pada prediksi umur komponen yang menerima beban fatik. Retak akibat beban fatik umumnya terjadi pada permukaan komponen/ benda uji. Inisiasi retak pada bahan polikristalin tersebut terjadi pada bidang geser, batas butir, batas fasa, inklusi dan endapan. Jenis inisiasi retak umumnya tergantung dari strukturmikro bahan [2]. Pergerakan bidang-bidang geser oleh beban fatik tarik-tekan mengakibatkan terjadinya pergerakan relatif dalam butir, sehingga terjadi tonjolan dan cekungan hingga mencapai beberapa milimeter pada permukaan benda uji. Keadaan tersebut disebut sebagai ekstrusi dan intrusi [3].

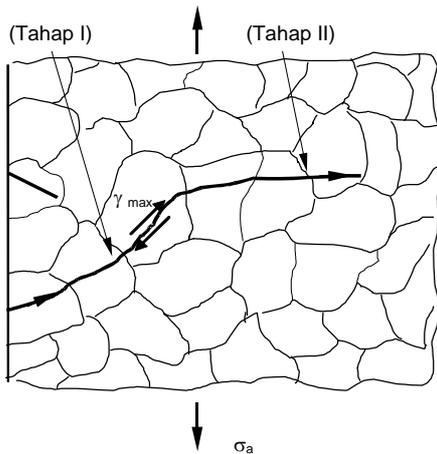
Inisiasi retak pada paduan logam yang mengandung endapan dan fasa ke 2 yang menerima beban dinamis dengan amplitudo yang kecil umumnya terjadi pada permukaan di sekitar endapan. Inklusi non metalik memiliki modulus elastisitas yang berbeda dengan matriks logam, sehingga terjadi inkompatibilitas

regangan yang dapat menyebabkan lepasnya endapan tersebut dari matriks logam induk dan menimbulkan awal retak[3].

Setelah terbentuk inisiasi pada permukaan, retak tersebut merambat pada bidang-bidang geser utama, kemudian setelah panjang retak memungkinkan terjadinya pembukaan akibat tegangan normal, retak dapat berbelok arah di bawah pengaruh tegangan normal.

Mekanisme kerusakan pada tahap 1 dikendalikan oleh regangan geser γ_{max} . Arah regangan geser maksimum bertahan minimal sepanjang 1 besar butir, lihat Gambar 1. Retak mikro umumnya terjadi transgranular, yaitu retak yang terjadi dan merambat di tengah butir. Retak tersebut tumbuh pada bidang geser hingga menemui hambatan berupa batas butir, fasa kedua, atau hambatan strukturmikro yang lain.

Bila amplitudo tegangan melebihi tegangan batas, maka retak tersebut dapat merambat melewati hambatan



Gambar 1. Perambatan retak tahap 1 dan tahap 2.

strukturmikro, bila amplitudo tegangan lebih rendah dari tegangan batas maka retak tidak merambat.

Perubahan orientasi perambatan retak dipengaruhi oleh besarnya tegangan normal. Bila tegangan normal makin rendah maka perambatan retak pada tahap 1 akan semakin panjang.

Pada pembebanan torsi tegangan normal maksimum memiliki besar yang sama dengan tegangan geser maksimum. Sedangkan pada pembebanan tarik, tegangan tarik maksimum dua kali lipat dibanding tegangan geser maksimum. Hal tersebut menyebabkan pada pembebanan tarik umumnya perambatan retak tahap 2 berbelok arah menjadi retak yang tegak lurus terhadap tegangan normal maksimum, sedangkan pada pembebanan torsi perambatan retak tahap 2 memiliki arah yang sama dengan arah tegangan geser maksimum.

Baja BS 970 605H32 yang telah dikeraskan dan diberi beban dinamis torsi menunjukkan perubahan arah perambatan retak dari retak geser menjadi retak yang tegak lurus tegangan normal sangat sulit terjadi [4]. Pembebanan perpaduan proporsional tarik-tekan dan torsi mekanisme kerusakan utama didominasi oleh retak yang tegak lurus terhadap tegangan normal (mode I) [4]. Tetapi khusus pada pembebanan torsi menunjukkan bahwa pada pembebanan torsi murni pada benda uji baja dan AlMg4,5 Mn, berbentuk silinder mekanisme kegagalan terutama disebabkan perambatan retak tegangan geser yang terus merambat paralel terhadap tegangan geser tersebut.

Perubahan arah perambatan retak dari tahap 1 dan tahap 2 diterangkan dengan beberapa rumus. Rumus tersebut diambil dan diterapkan pada retak permukaan. Beberapa masalah yang belum terpecahkan pada mekanika patahan diantaranya termasuk perpaduan antara pembebanan tarik dan torsi (*mixed mode*) dan pembebanan torsi murni (mode II). Pada makalah yang ditulis oleh Richard [1, 5] beberapa rumus yang terkenal untuk pembebanan *mixed mode* di tampilkan dan dibandingkan bersama-sama. Hal-hal yang diperbandingkan diantaranya adalah rumus kegagalan

dan perubahan arah perambatan retak. Richard^[1] juga memperkenalkan metode perhitungan yang cukup mudah dilakukan.

Pada makalah ini rumus tegangan tangensial maksimum dikembangkan oleh Erdogan dan G.C. Sih dalam Richard [1] tersebut digunakan untuk menghitung perambatan retak fatik pada paduan Aluminium type 6061. Verifikasi penggunaan rumus tersebut dengan hasil uji fatik untuk berbagai macam pembebanan dilakukan. Penyimpangan arah perambatan retak pada pembebanan torsi dari rumus tersebut dibahas dari segi besar tegangan geser dan tegangan aksial yang bekerja pada bahan beserta dengan orientasi retak yang telah terbentuk. Berdasarkan bahasan dan hasil eksperimen dicoba dibuat algoritma untuk menggambarkan proses perambatan retak yang diakibatkan oleh beban torsi.

TEORI

Kondisi tegangan akibat beban multiaksial berpengaruh terhadap bahan dalam bentuk elemen volume pada system koordinat x-y-z. Pengaruh tegangan tersebut dapat dituliskan dalam bentuk matriks tegangan, dimana $|\tau_{ij}| = |\tau_{ji}|$, yang berarti tegangan geser yang timbul dalam arah yang berlawanan sama besar.

$$S = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} \dots\dots\dots (1)$$

Penggambaran dan analisa tensor-tensor tegangan pada tegangan multiaksial di terangkan sebagai berikut[6].

Komponen tegangan pada kondisi tegangan bidang pada permukaan yang bebas dari pembebanan maka akan terbentuk kondisi tegangan bidang. Matriks tegangan akan menjadi:

$$S = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} \\ \tau_{yx} & \sigma_y \end{bmatrix} \text{ dimana } |\tau_{xy}| = |\tau_{yx}| \dots\dots\dots (2)$$

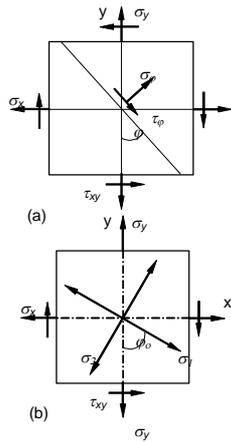
yang berarti kondisi tegangan diwakili oleh dua tegangan normal dan satu tegangan geser. Komponen tegangan pada kondisi tegangan bidang dan letak dari tegangan utama pada sistem koordinat ditunjukkan pada Gambar 1[6].

Diketahui bahwa tegangan σ_ϕ und τ_ϕ pada arah sembarang bidang geser dapat dinyatakan sebagai fungsi:

$$\sigma_\phi = \sigma_\phi(\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}, \phi) \dots\dots\dots (3)$$

$$\tau_\phi = \tau(\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}, \phi) \dots\dots\dots (4)$$

Hubungan parameter-parameter tersebut dinyatakan pada persamaan 1 dan persamaan 2.

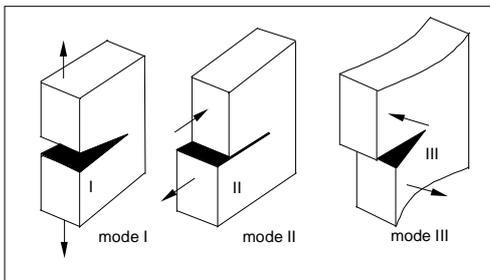


Gambar 2. (a) Komponen tegangan pada kondisi tegangan permukaan (b) Letak tegangan-tegangan utama pada system koordinat.[6]

$$\sigma_\phi = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) + \frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_y)\cos(2\phi) + \tau_{xy}\sin(2\phi) \dots\dots (5)$$

$$\tau_\phi = -\frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_y)\sin(2\phi) + \tau_{xy}\cos(2\phi) \dots\dots (6)$$

Dasar perhitungan perambatan retak makroskopis adalah mekanika patahan elastis. Sebagai pemicu perambatan retak adalah tegangan elastis pada ujung retak yang dinyatakan dengan menggunakan intensitas tegangan. Jenis (mode) perambatan retak dibedakan dari pergerakan relatif permukaan retak dan dinamai dengan sebutan mode I, mode II dan mode III, lihat Gambar 3.



Gambar 3. Mode pembebanan pada mekanika patahan [1].

Medan tegangan elastis tunggal pada ujung retak dapat dinyatakan dengan faktor intensitas tegangan K_I, K_{II}, K_{III} . Mode patahan III jarang digunakan dalam perhitungan sedangkan yang sering diaplikasikan adalah mode I dan mode II.

Faktor intensitas tegangan ditentukan oleh tegangan dan panjang retak dan dinyatakan dalam persamaan (7) dan persamaan (8).

$$\text{Mode I: } K_I = \sigma\sqrt{\pi a}Y_I \dots\dots\dots (7)$$

$$\text{Mode II: } K_{II} = \tau\sqrt{\pi a}Y_{II} \dots\dots\dots (8)$$

Konstanta Y_I dan Y_{II} tidak memiliki satuan merupakan konstanta yang menunjukkan pengaruh geometri dan ukuran benda. Konstanta tersebut dapat ditemukan diliteratur seperti pada Bolz [2] atau ditentukan dari metode eksperimen serta perhitungan [1].

Pada pembebanan campuran antara Mode I dan Mode II faktor intensitas tegangan diwakili oleh faktor intensitas tegangan ekuivalen yang merupakan fungsi dari faktor intensitas tegangan mode I dan faktor intensitas tegangan mode II [1].

$$\text{Mode campuran } K_{ekv} = f(K_I, K_{II}) \dots\dots\dots (9)$$

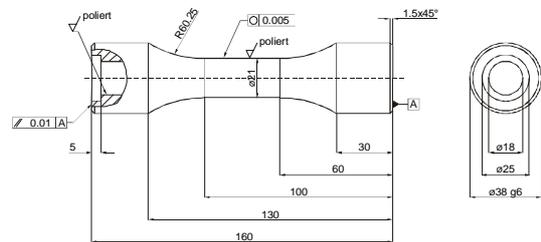
K_{ekv} adalah faktor intensitas tegangan ekuivalen.

METODE PERCOBAAN

Bahan

Paduan Aluminium type 6061 yang digunakan pada penelitian ini diterima dalam bentuk silinder berdiameter 1 inch. Bahan baku tersebut kemudian dilakukan permesinan berupa pemotongan, pengeboran dan pembubutan halus.

Untuk pengujian fatik digunakan benda uji berbentuk silinder berlubang dengan tebal dinding 1,5 mm (Konsentrasi tegangan 1). Lubang silinder memiliki diameter 18 mm. Dimensi spesimen ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Dimensi benda uji (mm).

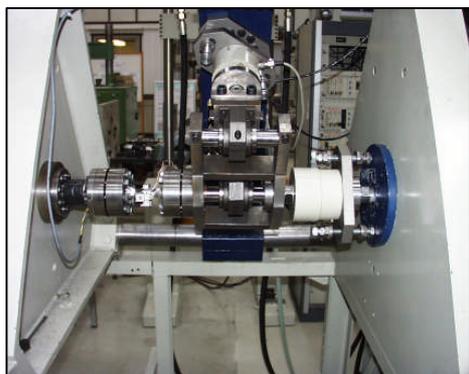
Permukaan dalam dari benda uji dilakukan pengasahan halus (proses *hohning*), sedang bagian luar diampas dan dipoles halus untuk menghilangkan efek konsentrasi tegangan yang timbul akibat permesinan dan sebisamungkin menghasilkan permukaan yang halus mengkilat agar pengamatan retak mikro dapat dilakukan. Kehalusan permukaan bagian dalam sama pentingnya agar permukaan tersebut bebas takik. Bila hal ini diabaikan maka jejak pengeboran akan mendominasi dan retak mungkin timbul pada dinding bagian dalam sehingga pengamatan perambatan retak tidak dapat dilakukan. Pengeboran mengakibatkan jejak yang lebih dalam dibandingkan pembubutan halus dari permukaan, sehingga diperlukan pengerjaan permukaan dalam lebih lanjut.

Untuk mendapatkan penguatan mekanis dinding dalam, digunakan perkakas rol halus dari Firma Ecoroll, yang dapat menekan jejak bekas bor, sehingga terjadi

efek penghalusan permukaan. Pemolesan selanjutnya menghasilkan permukaan dengan kekasaran $R_a 0,1 \mu m$. Pengujian fatik selanjutnya menunjukkan bahwa setelah proses ini retak timbul pada permukaan yang merupakan syarat dari penelitian ini. permukaan pada permukaan benda uji juga memiliki kekasaran $R_a 0,1 \mu m$.

Pengujian

Mesin uji *servohidraulik* multiaksial untuk tarik tekan dan torsi dibuat untuk penelitian ini, lihat Gambar 5. Pemberian beban tarik diberikan oleh silinder aktuator 63 kN dari Fa., Schenk. Mesin uji tersebut dilengkapi dengan pompa hidraulik tersendiri.



Gambar 5. Mesin uji fatik multiaksial untuk beban tarik tekan dan torsi.

Program pengujian fatik siklus rendah terdiri dari pembebanan tarik-tekan dan torsi, proporsional tarik-tekan dan torsi, dan pembebanan pergeseran fasa 90° .

Pengujian tersebut dilakukan dengan kontrol regangan tarik dan geser. Perbandingan amplitudo regangan geser dan regangan aksial (γ_a/e_a) adalah 1,33.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Pengujian

Pengujian dilakukan masing-masing pada 3 tingkat tegangan dengan hasil pengujian diberikan pada Tabel 1 sampai dengan Tabel 4.

Orientasi perambatan retak hasil pengujian digunakan untuk melakukan verifikasi persamaan (rumus) perambatan retak yang ada, diantaranya adalah rumus yang diajukan oleh G. C. Sih dalam Richard [1]. Hasil pengujian divisualisasikan dengan simulasi yang dibuat dengan pemrograman *Visual Basic*. Pemrograman tersebut menggambarkan pengaruh jenis pembebanan terhadap arah perambatan retak. Penampakan perambatan retak pada benda uji hasil eksperimen dan perhitungan ditampilkan untuk verifikasi. Persamaan yang diusulkan oleh G.C. Sih dan rumus baru diusulkan berdasarkan hasil percobaan yang dilakukan.

Tabel 1. Arah retak tahap I dan tahap II setelah pembebanan tarik-tekan.

Pembebanan tarik tekan			
No	ϵ_a	Orientasi retak tahap I ^{*)}	Orientasi retak tahap II
1	1,2	$\pm 45^\circ$	90°
2	0,8	$\pm 45^\circ$	90°
3	0,6	$\pm 45^\circ$	90°
4	0,5	$\pm 45^\circ$	90°

^{*)} mayoritas arah retak tahap I

Tabel 2. Arah retak tahap I dan tahap II setelah pembebanan torsi

Pembebanan Torsi			
No	γ_a	Orientasi retak tahap I ^{*)}	Orientasi retak tahap II
1	1,2	0° & 90°	0°
2	0,8	0° & 90°	0°
3	0,6	0° & 90°	0°
4	0,35	0° & 90°	90°

^{*)} mayoritas arah retak tahap I

Tabel 3. Arah retak tahap I dan tahap II setelah pembebanan kombinasi tarik tekan dan torsi secara proporsional.

Pembebanan proporsional tarik-tekan dan torsi				
No	ϵ_a	γ_a	Orts. retak tahap	
			I ^{*)}	II
1	0,8	1,0	22.5°	-22.5°
2	0,6	0,8	22.5°	-22.5°
3	0,45	0,6	22.5°	-22.5°
4	0,35	0,45	22.5°	-22.5°

^{*)} mayoritas arah retak tahap I

Tabel 4. Arah retak tahap I dan tahap II setelah pembebanan kombinasi tarik tekan dan torsi secara nonproporsional (beda fasa 90°).

Pembebanan proporsional tarik-tekan dan torsi				
No	ϵ_a	γ_a	Orts. retak tahap	
			I ^{*)}	II
1	0,8	1,0	segala arah	-22.5°
2	0,6	0,8	segala arah	-22.5°
3	0,45	0,6	segala arah	-22.5°
4	0,35	0,45	segala arah	-22.5°

^{*)} mayoritas arah retak tahap I

Pembahasan

Formula untuk perhitungan arah perambatan retak yang dikenal sebagai rumus tegangan tangensial maksimum dikembangkan oleh Erdogan dan G.C. Sih dalam Richard [1]. Formula tersebut didasarkan pada tiga asumsi yaitu perambatan retak yang tidak stabil dimulai pada ujung retak dengan arah radial, perambatan retak terjadi pada satu arah tegak lurus terhadap tegangan tangensial maksimum. Perambatan retak tidak stabil terjadi

Perambatan Retak Akibat Pembebanan Multiaksial (Agus Suhartono)

bila tegangan tangensial maksimum σ_φ melewati nilai batas s_{jC} atau salah satu faktor intensitas tegangan ekuivalen K_{vmax} yang dihitung dari mencapai ketahanan retak.

Penentuan arah perambatan retak didapat dari penurunan (persamaan 5) terhadap koordinat polar [1]

$$\frac{d\sigma_\varphi}{d\varphi} = 0 \text{ dan } \frac{d^2\sigma_\varphi}{d\varphi^2} < 0 \dots\dots\dots (10)$$

atau menurut persyaratan $\tau_{r\varphi} = 0$. Dari penurunan persamaan 5 terhadap φ didapatkan persamaan 11.

$$[K_I \sin \varphi + K_{II}(3\cos \varphi_0 - 1)]\cos \frac{\varphi}{2} = 0 \dots\dots (11)$$

Arah perambatan retak j_0 dapat diturunkan dari persamaan 11 menjadi persamaan 12 dan persamaan 13.

$$K_I \sin \varphi + K_{II}(3\cos \varphi_0 - 1) = 0 \dots\dots\dots (12)$$

$$\sin \varphi + \frac{K_{II}}{K_I}(3\cos \varphi_0 - 1) = 0 \dots\dots\dots (13)$$

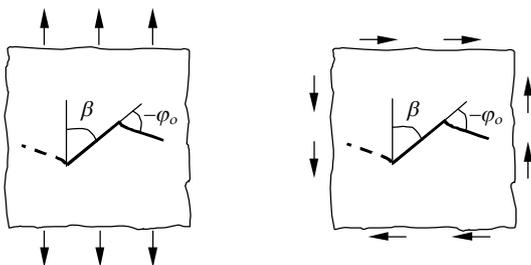
Penggambaran retak dan arah perambatannya di tunjukkan pada Gambar 6 dan Gambar 7.

Persamaan diatas menunjukkan bahwa sudut pembelokan retak j_0 hanya tergantung pada faktor intensitas tegangan K_I dan K_{II} . Untuk pembebanan mode I murni dimana $K_I \neq 0$ dan $K_{II} = 0$ maka didapat $j_0 = 0$, sedangkan untuk pembebanan Mode II murni ($K_I = 0, K_{II} \neq 0$) didapat $j_0 = -70,5^\circ$.

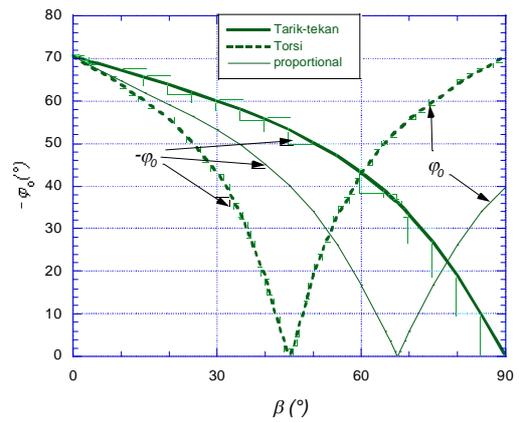
Pembebanan Tarik Tekan

Orientasi retak dan perambatannya untuk pembebanan tarik tekan diberikan pada Gambar 8.

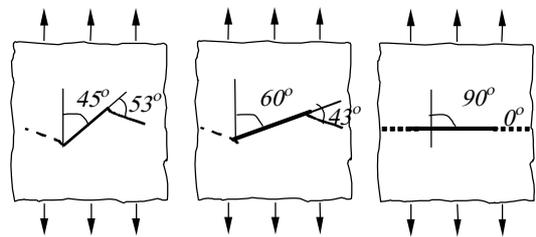
Pada pembebanan tarik tekan mula mula timbul inisiasi retak dan perambatan retak tahap I yaitu retak yang memiliki orientasi 45° ($b = 45^\circ$) lihat Gambar 6. Berdasarkan perhitungan dari persamaan 13 yang telah dijabarkan lebih lanjut pada Gambar 7 didapat $-j_0 = 53^\circ$. Pada perambatan retak selanjutnya orientasi retak b berubah menjadi 60° . Dengan perubahan pada sudut b arah perambatan retak $-j_0$ yang dihitung berdasarkan persamaan 13 akan berubah menjadi $-j_0 = 43^\circ$. Demikian seterusnya hingga perubahan arah perambatan retak berakhir saat b mencapai sudut 90° (tegak lurus terhadap arah beban normal), arah



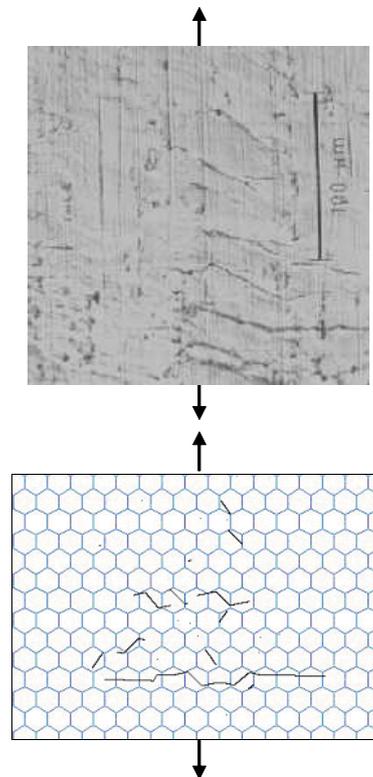
Gambar 6. Orientasi retak dan arah perambatannya.



Gambar 7. Arah perambatan retak φ_0 sebagai fungsi dari orientasi retak awal β dan jenis pembebanan.



Gambar 8. Sketsa urutan perambatan retak pada pembebanan tarik tekan.

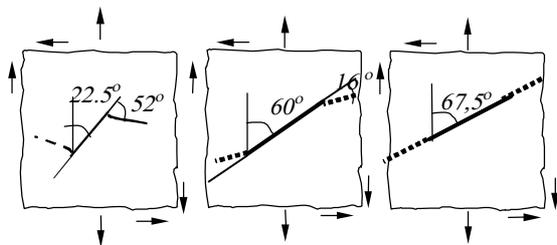


Gambar 9. Bentuk retak tahap I dan tahap II hasil percobaan dan perhitungan yang disimulasikan pada beban tarik tekan.

perambatan retak $-j_0 = 0$. Perambatan retak diatas ditunjukkan pada Gambar 10. Hasil eksperimen dan simulasi yang didasarkan pada persamaan 13 yang dihitung dengan program *visual basic* ditunjukkan pada Gambar 11. Pada Gambar 11 tampak bahwa fenomena perambatan retak tahap I dan tahap II dapat digambarkan dengan baik berdasarkan perhitungan dan simulasi. Patahan akhir pada benda uji setelah diberi pembebanan tarik tekan ditunjukkan pada Gambar 10.



Gambar 10. Patahan akhir pada pembebanan tarik-tekan hasil percobaan.



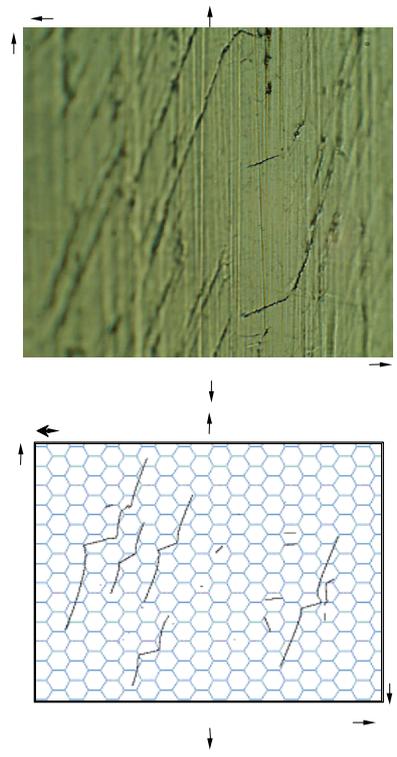
Gambar 11. Sketsa urutan perambatan retak pada pembebanan proporsional.

Pembebanan Kombinasi Tarik-Tekan dan Torsi dengan Perbedaan Fasa 0° (Proporsional)

Pada pembebanan campuran antara tarik tekan dan torsi, pada pengujian digunakan tegangan tarik-tekan sebesar 2 kali dari tegangan geser. Penggambaran orientasi retak dan perambatannya untuk pembebanan campuran antara tarik tekan dan torsi dengan perbedaan fasa 0° (proporsional) diberikan pada Gambar 11.

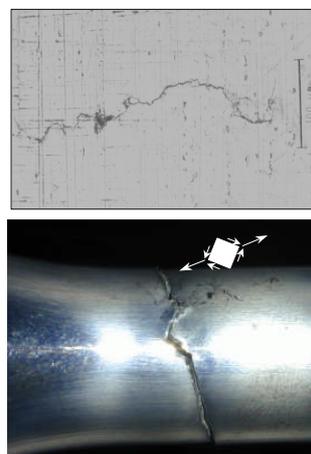
Diketahui bahwa tegangan geser maksimum pada pembebanan campuran proporsional menghasilkan retak awal dengan orientasi 22,5° ($b = 22,5^\circ$).

Pada orientasi $b = 22,5^\circ$ maka dari persamaan 13 dan Gambar 7 untuk pembebanan tarik tekan di dapat $-j_0 = 52^\circ$. Pada perambatan retak selanjutnya orientasi retak b berubah menjadi 60°, sedangkan, arah perambatan retak ($-j_0$) = 16°. Demikian seterusnya hingga saat b mencapai sudut 67,5° (tegak lurus terhadap arah beban normal), arah perambatan retak ($-j_0$) konstan pada sudut 0°. Perambatan retak diatas ditunjukkan pada Gambar 11. Hasil pengujian perambatan retak akibat beban proporsional menunjukkan kesesuaian dengan hasil perhitungan sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 12.



Gambar 12. Bentuk retak tahap I dan tahap II hasil eksperimen dan perhitungan yang disimulasikan pada beban proporsional.

Dari hasil percobaan dan perhitungan simulasi yang didasarkan pada persamaan yang diberikan oleh GC Sih, tampak bahwa persamaan tersebut dapat menerangkan dengan baik fenomena pembelokan perambatan retak dari tahap I ke tahap II. Pada gambar diatas terlihat beberapa retak mikro yang merambat secara bersamaan, selain itu dapat juga diamati terjadinya pembelokan retak ke arah tegak lurus arah tegangan tarik utama. Retak-retak tersebut merupakan suatu sistem inisiasi dan perambatan retak tersendiri yang dapat saling bertumbukan menjadi retak yang lebih besar atau

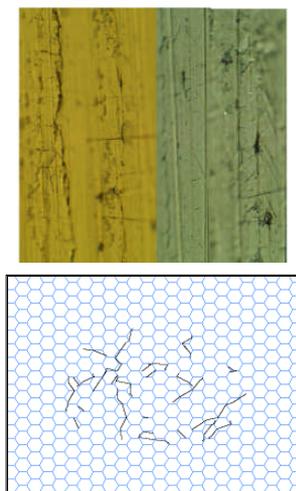


Gambar 13. Retak Teknis dan patahan akhir pada pembebanan proporsional hasil eksperimen.

membentuk suatu patahan akhir. Patahan akhir akibat tumbukan beberapa retak ditunjukkan pada Gambar 14. Patahan akhir yang diakibatkan oleh tumbukan dari beberapa retakan mengakibatkan bentuk permukaan patahan yang bertingkat-tingkat.

Pembebanan Kombinasi Tarik-Tekan dan Torsi dengan Perbedaan Fase 90° (Non-Proporsional)

Perhitungan arah perambatan retak akibat beban kombinasi non proporsional pada dasarnya sesuai dengan perambatan retak akibat beban tarik tekan, karena tegangan maksimum yang dominan adalah pada bidang tegak lurus tegangan tarik. Perbedaannya dengan pembebanan tarik tekan adalah pada pembebanan campuran non proporsional retak tahap I atau inisiasi retak yang terjadi lebih banyak akibat tegangan geser yang berotasi ke segala arah. Retak makro yang timbul dipercepat dengan tumbukan antar retak yang semakin banyak. Hasil pengujian perambatan retak akibat beban non proporsional dengan hasil perhitungan ditunjukkan pada Gambar 14.



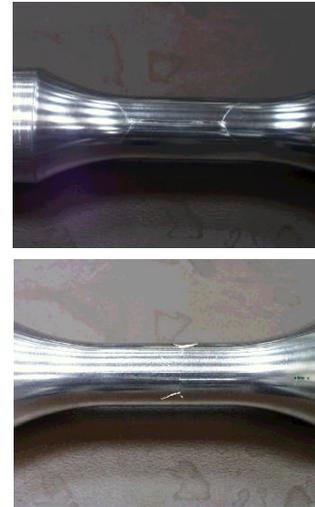
Gambar 14. Bentuk retak tahap I dan tahap II hasil percobaan dan perhitungan yang disimulasikan pada beban non proporsional.

Pembebanan Torsi

Pada pembebanan torsi diketahui bahwa faktor konsentrasi tegangan mode I, $K_{I=0}$ dan faktor konsentrasi tegangan mode II, $K_{II=1}$ (0) menurut persamaan GC Sih dalam Richard[1] (persamaan 13) perambatan retak torsi stabil pada sudut 45°.

Hasil perhitungan tersebut tidak sesuai dengan kenyataan yang didapat pada eksperimen. Retak yang terjadi pada pembebanan fatik torsi pada benda uji silinder tipis memiliki orientasi 0° atau 90°. Beberapa percobaan lain menemukan hal yang sama [4, 7, 8, 9, 10].

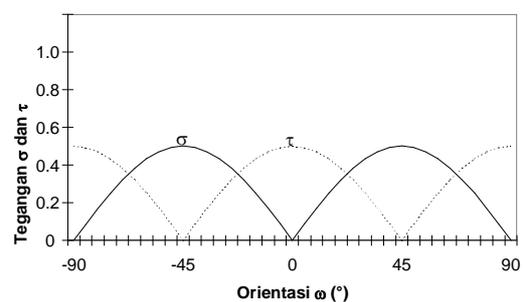
Hasil pengamatan retak yang diakibatkan oleh beban torsi untuk perambatan retak makro ditunjukkan pada Gambar 15. Dari hasil percobaan ini diketahui bahwa persamaan rumus tegangan tangensial maksimum tidak bisa digunakan untuk menjelaskan fenomena perambatan retak pada pembebanan torsi.



Gambar 15. Perpatahan akibat beban torsi.

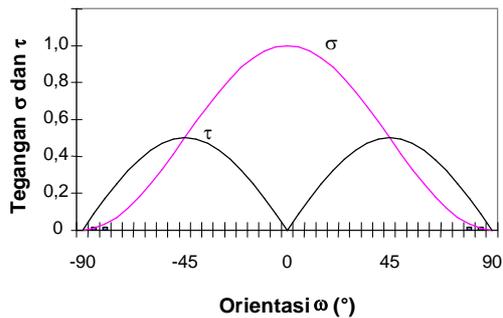
Untuk menjelaskan fenomena perambatan retak pada pembebanan torsi maka dilakukan perhitungan pada tegangan yang bekerja pada bahan. Besar tegangan tarik dan tegangan geser yang bekerja pada semua sudut/ orientasi dapat dihitung berdasarkan persamaan 5 dan persamaan 6.

Kedua persamaan diatas bila dipetakan pada grafik hubungan antara besar tegangan dan sudut/orientasi pada bahan pada pembebanan torsi maka akan didapat hubungan seperti pada Gambar 16, sebagai pembanding diberikan besar tegangan tarik dan geser pada pembebanan tarik tekan.



Gambar 16. Tegangan yang bekerja pada tiap orientasi dalam bahan pada pembebanan torsi berdasarkan perhitungan.

Gambar 16 dan Gambar 17 menunjukkan besar tegangan tarik dan tegangan geser pada setiap orientasi pada bidang permukaan bahan. Pada pengujian torsi (Gambar 16) ditunjukkan bahwa tegangan tarik maksimum dan tegangan geser maksimum sama



Gambar 17. Tegangan yang bekerja pada tiap orientasi dalam bahan pada pembebanan tarik berdasarkan perhitungan.

besar, sedangkan pada pengujian tarik, besar tegangan tarik maksimum adalah dua kali dari tegangan geser maksimum.

Menurut hukum mekanika patah, tegangan yang lebih besar akan mengontrol arah perambatan retak, sehingga pada pembebanan torsi karena tegangan tarik maksimum dan tegangan geser maksimum sama besar maka kedua tegangan tersebut memiliki peluang yang sama untuk mengontrol arah perambatan retak.

Pada pembebanan tarik tekan (Gambar 16) dikarenakan tegangan tarik maksimum lebih besar dibanding tegangan geser maksimum, maka tegangan tarik mengontrol arah perambatan retak, sehingga retak tahap II berbelok dari sudut 45°, (arah regangan geser maksimum, retak tahap I) menjadi tegak lurus terhadap arah tegangan tarik maksimum, seperti ditunjukkan pada Gambar 16, Perambatan retak tersebut dapat digambarkan dengan pendekatan rumus G.C. Sih dan telah ditunjukkan pada Gambar 8, Gambar 9 dan Gambar 10.

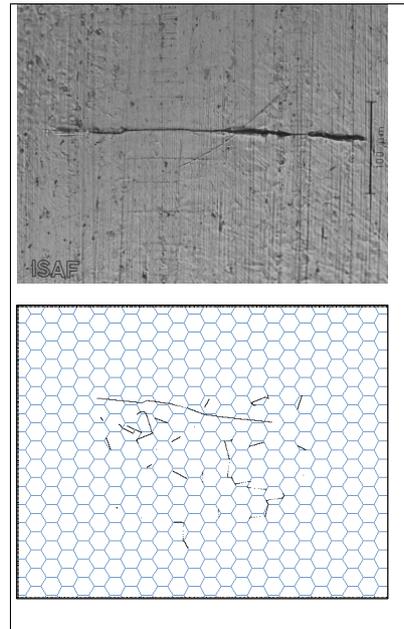
Retak awal (retak tahap I) pada pembebanan torsi memiliki orientasi 0° dan 90° yaitu paralel terhadap tegangan geser maksimum. Retak akan merambat pada arah yang membutuhkan energi paling rendah. Pembelokan retak memerlukan energi tambahan sehingga retak tidak mengalami pembelokan arah rambat. Retak yang telah terbentuk paralel terhadap tegangan geser maksimum akan terus merambat tanpa mengalami pembelokan pada perambatan retak tahap II.

Berdasarkan fenomena tersebut maka pada simulasi dibuat algoritma untuk mengontrol proses perambatan retak yang diakibatkan oleh beban torsi. Hasil percobaan dan perhitungan yang didasarkan ditunjukkan pada Gambar 18 yang divisualisasikan dalam simulasi dengan pemrograman *visual basic*. Perhitungan dapat menggambarkan secara memuaskan perambatan retak torsi tersebut.

KESIMPULAN

Dari hasil eksperimen dan perhitungan dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Inisiasi retak pada pembebanan fatik umumnya terjadi pada bidang yang paralel terhadap



Gambar 1. Hasil eksperimen dan perhitungan/simulasi dengan program *visual basic*.

bidang yang mengalami tegangan geser maksimum.

2. Retak tahap II umumnya merambat pada arah tegak lurus terhadap tegangan tarik maksimum.
3. Pada pembebanan torsi baik pada tahap I maupun tahap II, retak merambat paralel terhadap tegangan geser maksimum, retak tidak mengalami pembelokan arah perambatan disebabkan tegangantarik maksimum dan tegangan geser maksimum sama besar.
4. Fenomena perambatan retak dapat dihitung dan divisualisasikan dengan program *visual basic*, berdasarkan *teorema fracture mechanic* yang ada maupun yang dikembangkan dari hasil *eksperimen*.

DAFTARACUAN

- [1]. RICHARD, H. A., *Bruchvorhersagen Bei Ueberlagerter Normal- und Schubbeanspruchung von Rissen*. VDI Forschungsheft 631/ (1985)
- [2]. BOLZ, G., *Ermuedungsverhalten Unter Mehrachsiger Beanspruchung im Ein- und im Zweistufenversuch am Beispiel der Legierung AlCuMg1*. Diss. Technische Universitaet Braunschweig, (1995)
- [3]. SCHUBERT, R., *Verformungsverhalten und Risswachstum bei Low Cycle Fatigue*. *Fortschrittberichte VDI, Nr. 73*, (1989)
- [4]. SAVIDIS, G., *Berechnung der Bauteilanrisslebensdauer bei mehrachsigen proportionalen Beanspruchungen*, *Veröffentlichungen des Instituts fuer Stahlbau und*

- Werkstoff-mechanik*, TH Darmstadt, Darmstadt, (1995)
- [5]. RICHARD, H. A., M. SCHÖLLMANN, B. MAY, *Ermuedungsrisswachstum bei komplexer Beanspruchung. DVM-Bericht 230. 30. Tagung des DVM-Arbeitskreises Bruchvorgaenge*, Dresden (1998)
- [6]. ISSLER, L., H. RUOSS, P. HAEFELE, *Festigkeitslehre Grundlagen*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, (1995)
- [7]. HUA, C. T., D. F. Socie: Fatigue Damage in 1045 Steel Under Constant Amplitude Biaxial Loading. *Fatigue Fracture Engng. Mater. Structures* **7**, (1984) 165-179
- [8]. HU, Z., L. MA, S. CAO: A Study of Shear Fatigue Crack Mechanisms. *Fatigue Fracture Engng. Mater. Structures* **15**, (1992) 563-572
- [9]. YOKOBORI, T., A. KAMEI, A. T. YOKOBORI, Fatigue Crack Propagation Under Mode II Loading. *Int. J. Fracture*, (1976) 158-160
- [10]. TANAKA, K., S. MATSUOKA, M. KIMURA, Fatigue Strength of 7075-T6 Aluminium Alloy Under Combined Axial Loading and Torsion. *Fatigue Fracture Engng. Mater. Structures* **7**, (1984) 195-211