

KAJI EKSPERIMENTAL DAN NUMERIK TENTANG FAKTOR KETANGGUHAN RETAK MODUS I DAN II PADA LAMINATE KARBON/EPOXY SERAT TERANYAM

IGN Wiratmaja Puja, Rochim Suratman,
Aditianto Ramelan, Hariadi Tri Prasetya

Jurusan Teknik Mesin ITB

Abstrak

Makalah ini menyajikan analisis eksperimental dan numerik tentang pengaruh arah retakan pada laminate karbon/epoxy serat teranyam empat lapis terhadap faktor ketangguhan retak modulus I dan modulus II. Analisis eksperimental dilakukan dengan pengujian tarik (*off axis tensile test ASTM D 3039-76*) dengan sembilan variasi arah retakan yaitu 5°, 10°, 15°, 30°, 45°, 65°, 75°, 80° dan 90°. Pengujian geser (*three rail shear test ASTM D 4255-83*) dilakukan untuk sudut orientasi retakan 0°. Kontour tegangan-regangan disekitar ujung retak didapatkan secara numerik dengan menggunakan metoda elemen hingga. Hasil analisis, baik numerik maupun eksperimental ditampilkan dalam bentuk grafik kombinasi harga faktor ketangguhan retak modulus I (K_I) dan modulus II (K_{II}) sebagai fungsi dari arah retakan. Dengan mengadopsi kriteria Wu^[11] untuk lamina unidirectional dan kriteria Hahn^[6] untuk lamina anisotropik, disini dikembangkan kriteria baru kombinasi faktor ketangguhan retak untuk laminate serat teranyam.

Abstract

This paper presents experimental and numerical analysis on the influence of crack orientations to the fracture toughness of mode I and mode II for woven type carbon/epoxy four ply laminate. The experimental procedure is carried out through *off axis tensile test (ASTM D 3039-76)* with nine variation of crack orientations i.e. 5°, 10°, 15°, 30°, 45°, 65°, 75°, 80°, and 90°. *Three rail shear test (ASTM D 4255-83)* is utilized for zero degree crack orientation. The stress and strain contours around crack tips are obtained numerically using the finite element method. Numerical and experimental results of the mode I (K_I) and mode II (K_{II}) fracture toughness are presented in graphical form as a function of crack directions. Adopting Wu's^[11] Criteria for unidirectional lamina and Hahn's^[6] Criteria for general anisotropic lamina, a new mixed mode fracture toughness criteria is developed for woven fiber matrix laminate.

Keywords : fracture toughness, crack, komposite, stress, laminate

1. Pendahuluan

Komposit laminate serat-matrik saat ini semakin luas digunakan untuk struktur atau komponen mesin. Keunggulan sifat-sifat mekaniknya yang dalam beberapa hal mengungguli baja, bahan yang umum digunakan sebagai komponen mesin, membuat komposit dapat dijadikan sebagai material alternatif unggulan. Keunggulan sifat mekanik tersebut antara lain dalam hal ketahanan korosi, massa jenisnya yang ringan, kekuatan mekanik, dan ketahanan lelah^[3,5]. Namun material laminate serat matrik memiliki sifat yang *anisotropik*, sehingga mekanika isotropik tidak dapat digunakan sebagai metoda analisis komponen mesin atau struktur yang terbuat dari laminate serat matrik. Keanisotropikan laminate serat matrik ini sangat bergantung pada jenis bahan, arah susunan serat dan lapisan lamina yang menyusun material komposit tersebut.

Akibat beban-beban yang bekerja atau karena adanya cacat pembuatan, sering kali terdapat retakan pada

struktur komposit. Untuk itu diperlukan suatu metoda analisis kekuatan material laminate komposit serta memprediksi bilamana kegagalan akan terjadi. Sifat anisotropik material komposit serat matrik menyebabkan perhitungan kekuatan struktur yang mengandung retak tidak lagi sederhana. Beberapa penelitian sebelumnya memfokuskan pada fenomena fracture dan analisis faktor intensitas tegangan (SIF) pada laminate dengan fiber fracture^[8], matriks crack^[10], dan interlaminar crack^[3]. Sedangkan analisis fracture untuk laminate yang tersusun dari lamina yang berbeda-beda dibahas oleh Kamiya^[7]. Stabilitas retak melintang pada fiber laminate juga telah diturunkan secara analitik dan numerik oleh Phillips^[9]. Kriteria faktor ketangguhan retak untuk unidirectional lamina pertama dipublikasikan oleh Wu^[11], dan pembahasan mode kombinasi untuk lamina yang anisotropik yang umum diberikan oleh Hahn^[6]. Metoda eksperimental ketangguhan retak laminate fiber-matriks dalam penelitian ini diadopsi dari metoda yang dikembangkan oleh Donaldson^[4].

Melanjutkan penelitian-penelitian yang telah dilakukan sebelumnya tersebut, makalah ini memfokuskan penelitian pada pengaruh arah retakan terhadap ketangguhan retak pada laminate. Laminate yang dijadikan bahan penelitian adalah carbon/epoxy dengan susunan serat lamina teranyam yang disusun sebanyak empat lapis. Laminate carbon/epoxy dipilih karena material ini memiliki keunggulan dalam sifat mekanik dan aplikasinya cukup luas dalam bidang otomotif, perkapalan, pesawat terbang, dan lain-lain.

Metoda eksperimental dan numerik dilakukan untuk mengetahui tegangan kritis laminate yang mengandung crack dengan variasi arah dari 0° sampai 90° terhadap arah beban yang searah dengan sumbu utama. Dengan diketahuinya tegangan kritis pada saat retak mulai merambat, maka faktor ketangguhan retak modulus I dan modulus II dapat ditentukan. Analisis eksperimental dilakukan dengan pengujian tarik (*off axis tensile test ASTM D 3039-76*) dan pengujian geser (*three rail shear test ASTM D 4255-83*). Dari analisis numerik juga didapatkan kontour tegangan-regangan disekitar ujung retak. Hasil analisis, baik numerik maupun eksperimental selanjutnya ditampilkan dalam bentuk grafik kombinasi harga faktor ketangguhan retak modulus I (K_I) dan modulus II (K_{II}) sebagai fungsi dari arah retakan. Harga-harga K_I dan K_{II} hasil analisis juga dibandingkan dengan teori Wu^[1] dan Hahn^[6]. Berdasarkan kriteria Wu yang berlaku khusus untuk lamina unidirectional dan kriteria Hahn yang berlaku untuk lamina anisotropic yang umum, dari penelitian ini dikembangkan kriteria baru kombinasi faktor ketangguhan retak untuk laminate serat teranyam.

2. Dasar Teori

Material komposit laminate yang dianalisis dalam makalah ini adalah tipe material simetri *specialty orthotropic* yang terdiri dari susunan beberapa lamina serat-matrik dengan arah yang sama. Bentuk umum hubungan tegangan-regangan untuk material *orthotropic* adalah^[2]

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \gamma_4 \\ \gamma_5 \\ \gamma_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & -\frac{\nu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{31}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_4 \\ \tau_5 \\ \tau_6 \end{Bmatrix} \quad (1)$$

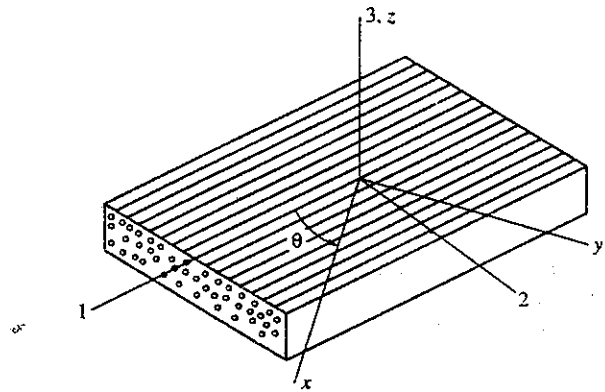
dimana ϵ_i , γ_j adalah komponen regangan; σ_i , τ_j komponen tegangan; ν_{ij} poisson ratio; E_i modulus elastisitas; dan G_{ij} modulus geser. Subscript $ij = 1,2$ menyatakan arah principal lamina seperti ditunjukkan pada gambar 1.

Untuk laminate yang tipis dimana kondisi tegangan adalah plane stress ($\sigma_3 = \tau_4 = \tau_5 = 0$), hubungan tegangan-regangan (1) dapat disederhanakan menjadi dua dimensi, yaitu

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \gamma_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{22} & 0 \\ S_{21} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_6 \end{Bmatrix}, \quad (2)$$

dengan compliances,

$$\begin{aligned} S_{11} &= \frac{1}{E_1}, & S_{22} &= \frac{1}{E_2} \\ S_{12} &= S_{21} = -\frac{\nu_{21}}{E_2} = -\frac{\nu_{12}}{E_1}, & S_{66} &= \frac{1}{G_{12}} \end{aligned} \quad (3)$$



Gambar 1. Sistem koordinat lamina serat-matrik^[5]

Harga-harga konstanta elastis material pada persamaan (3) di atas, di dalam makalah ini ditentukan dengan metoda eksperimental.

Faktor Ketangguhan Retak

Ketangguhan retak yang dimiliki oleh suatu material adalah kemampuan material tersebut untuk menahan penjarangan retakan. Salah satu cara untuk menentukannya adalah dengan melakukan uji tarik dan uji geser terhadap benda yang mengandung retakan. Dalam makalah ini akan dianalisis faktor ketangguhan retak pada modulus I, modulus II dan kombinasi kedua modulus tersebut. Hasil yang diperoleh kemudian akan dibandingkan dengan kriteria Wu dan kriteria Hahn.

Penentuan harga K_{Ic} dan K_{IIc} dilakukan dari pengujian tarik dan geser spesimen dengan berbagai arah retakan dari 0° sampai 90° , untuk mendapatkan harga tegangan kritis setiap spesimen. Selanjutnya harga-harga kritis ini digunakan untuk perhitungan faktor ketangguhan retak dengan persamaan^[5]

- dari uji tarik :

$$K_{Ic} = \sigma_{\infty c} \sqrt{\pi a} \sin^2 \beta$$

$$\sigma_{\infty c} = \frac{P_c}{l.t}$$
(4)

- dari uji geser:

$$K_{IIc} = \tau_{\infty c} \sqrt{\pi a}$$

$$\tau_{\infty c} = \frac{P_c}{2.l.t}$$
(5)

Harga tegangan kritis pada pengujian tarik dan geser diperoleh dari besarnya gaya tarik maupun geser dibagi dengan luas penampang spesimen yang menyebabkan spesimen yang diuji tepat mengalami kegagalan. Sedangkan harga tegangan kritis pada pemodelan elemen hingga diperoleh dengan cara membagi besarnya gaya maksimum hasil iterasi dengan luas penampang model. Gaya maksimum diperoleh dengan cara mengiterasi besar gaya pembebanan yang menyebabkan tegangan maksimum disekitar retakan saat mencapai kekuatan maksimum laminate.

Perhitungan gabungan modulus K_I dan K_{II} dengan Kriteria Wu^[11] adalah

$$\left(\frac{K_I}{K_{Ic}} \right)^{m_1} + \left(\frac{K_{II}}{K_{IIc}} \right)^{m_2} = 1$$
(6)

dengan m_1 dan m_2 adalah variabel yang ditentukan dari data-data pengujian.

Perhitungan gabungan modulus K_I dan K_{II} menurut Kriteria Hahn^[6] dinyatakan dengan persamaan

$$g \left(\frac{K_I}{K_{Ic}} \right)^2 + (1-g) \left(\frac{K_{II}}{K_{IIc}} \right)^2 = 1$$

$$g = \left(\frac{E_L}{E_T} \right)^{1/2} \left(\frac{K_{Ic}}{K_{IIc}} \right)^2$$
(7)

Dengan catatan bahwa modulus retak I menyebabkan perambatan retak dengan arah normal terhadap arah tegangan normal yang bekerja, sedangkan modulus retak II menyebabkan perambatan retak yang searah dengan arah tegangan geser yang bekerja. Dalam kondisi sebenarnya, seringkali perambatan retak merupakan kombinasi dari kedua modulus ini

3. Metoda Pengujian

Uji Tarik

Kekuatan tarik lamina $S_L^{(+)}$ dan $S_T^{(+)}$; Modulus elastisitas, E_1 dan E_2 ; dan Poisson ratio, ν_{12} dan ν_{21} dapat ditentukan melalui pengujian tarik longitudinal (0°) dan transversal (90°) dengan menggunakan spesimen unidirectional sesuai standar ASTM D 3039-76^[1].

Uji Geser (In-Plane Shear Test)

Pengujian geser untuk spesimen laminate pada penelitian ini mengacu pada standar ASTM D 4255-83 yang terdiri atas dua metode. Metode A melibatkan dua penjepit, dan metode B menggunakan tiga penjepit. Spesimen pada kedua metode ini dijepit diantara penjepit-penjepitnya dan diberikan beban uniaksial melalui mesin uji tarik. Beban uniaksial dari penjepit menimbulkan beban geser pada spesimen dan menyebabkan terjadinya regangan yang dapat diukur dengan *strain gage*. Tegangan geser rata-rata yang terjadi untuk metode A adalah:

$$\tau_{xy} = \frac{P}{Lt}$$
(8)

dengan : L = panjang spesimen pada arah x

P = beban yang diberikan pada arah x

t = tebal spesimen

Sedangkan untuk metode B, tegangan geser ditentukan sebagai berikut:

$$\tau_{xy} = \frac{P}{2Lt}$$
(9)

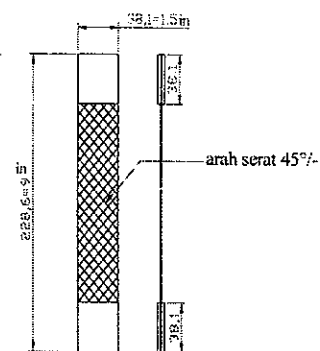
Modulus Geser, G_{12}

Untuk mengetahui harga modulus geser laminate, G_{12} , dapat dilakukan dengan uji tarik terhadap spesimen yang arah seratnya dibuat 45° terhadap arah pembebanan. Bentuk spesimen uji ditunjukkan pada gambar 2.

Harga modulus geser G_{12} dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan^[2]

$$\frac{1}{G_{12}} = \frac{4}{E_x} - \frac{1}{E_1} - \frac{1}{E_2} + \frac{2\nu_{12}}{E_1}$$
(10)

Pengujian geser terhadap spesimen dengan arah serat 45° ini akan menghasilkan modulus elastisitas, E_x , untuk arah serat 45° . Harga E_x diperoleh dengan cara menghitung kemiringan/gradien kurva uji tarik tegangan-regangan di daerah liniernya (σ_x/ϵ_x). Dari pengujian-pengujian sebelumnya harga-harga E_1 , E_2 , dan ν_{12} sudah diperoleh, sehingga harga modulus geser, G_{12} , pun dapat ditentukan.



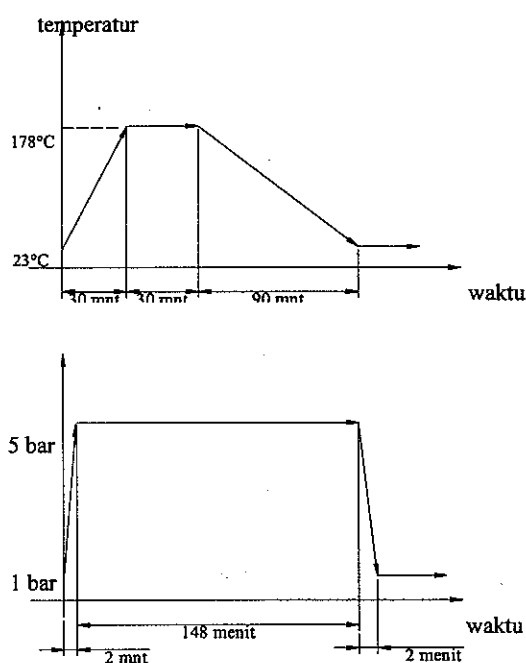
Gambar 2 Spesimen tarik susunan serat 45° / -45°

Sifat-sifat mekanik material yang didapat secara eksperimental di atas diperlukan dalam analisis tegangan regangan laminate yang mengandung retak secara numerik.

4. Spesimen Uji

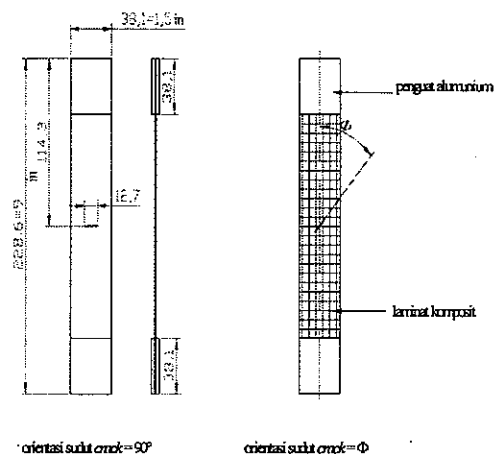
Proses pembuatan spesimen komposit karbon/epoxy-4 lapis dalam penelitian ini secara garis besar terdiri atas dua tahap. Tahap pertama adalah tahap *polimerisasi* yang sering disebut *curing* bahan *prepreg*, dan tahap kedua adalah pemessinan pelat laminat karbon/epoxy-4 lapis hasil proses *polimerisasi*.

Pada proses polimerisasi, bahan lamina tipe serat teranyam (*prepreg*) disusun dalam empat lapis dan diberikan perlakuan panas untuk mendapatkan laminate yang diinginkan. Proses perlakuan panas ini dilakukan pada temperatur dan tekanan yang tinggi menggunakan mesin *autoclave*. Kurva temperatur dan tekanan selama proses perlakuan panas untuk mendapatkan spesimen dalam pengujian ini ditunjukkan pada gambar 3. Orientasi serat dalam laminate tetap dalam arah $0^\circ/90^\circ$.



Gambar 3 Kurva temperatur dan tekanan terhadap waktu pada proses polimerisasi

Pelat laminate yang diperoleh dari proses *polimerisasi* selanjutnya dipotong sesuai dengan ukuran spesimen tarik dan geser yang diinginkan (ASTM D 3039-76). Contoh gambar teknik spesimen ditunjukkan pada gambar 4. Selanjutnya dibuat *crack* pada bagian tengah spesimen dengan orientasi 5° , 10° , 15° , 30° , 45° dan 90° .

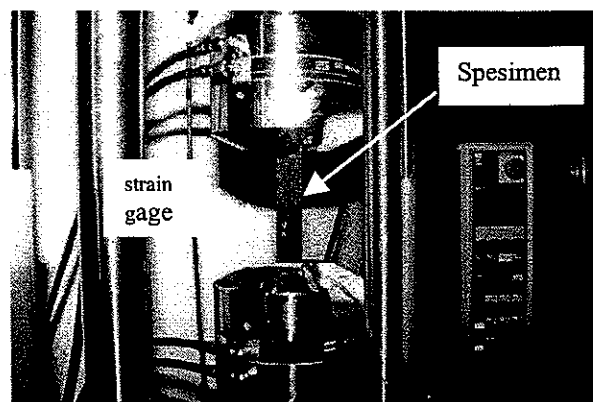


Gambar 4 Spesimen uji dengan arah retak Φ

75° , 80° dan 90° . Tebal *crack* pada tiap-tiap spesimen adalah 0,25 mm, yang dibuat dengan mesin freis vertikal. Penguat aluminium digunakan pada daerah tempat spesimen akan dijepit pada saat pengujian tarik untuk menghindari retakan yang ditimbulkan oleh tekanan penjepit. Perekat yang digunakan untuk merekatkan penguat aluminium dan spesimen komposit adalah perekat *plastic-steel*, suatu perekat berbahan dasar resin epoxy.

5. Kaji Eksperimental

Pengujian spesimen laminate komposit dilakukan dengan menggunakan MTS 810 *Universal Testing Machine*. Kontrol pembebanan, pembacaan output dan pengolahan data pengujian dilakukan dengan membuat program rangkaian pengujian dengan bantuan software *Test Star* dan *Test Ware*. Uji tarik uniaksial dilakukan untuk mendapatkan sifat-sifat mekanik laminate dan tegangan kritis spesimen yang mengandung retakan dengan arah 5° , 10° , 15° , 30° , 45° , 65° , 75° , 80° dan 90° . Set up pengujian uniaksial ditunjukkan pada gambar 5.



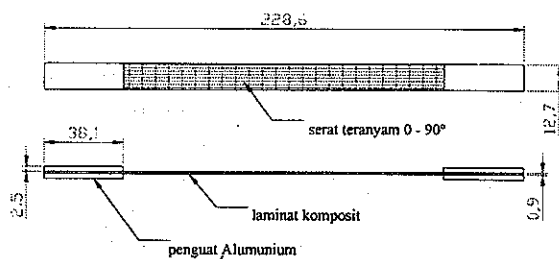
Gambar 5 Set-up pengujian uniaksial

Uji uniaksial dilakukan dengan kecepatan penarikan 0,5 mm/menit, sedangkan untuk pengujian dengan metode *modified three rail shear test* digunakan kecepatan penarikan 0,2 mm/menit. Kecepatan penarikan yang cukup rendah ini mampu menghilangkan efek patahnya spesimen menjadi beberapa bagian seperti yang terjadi bila penarikan dilakukan terlalu cepat.

Pada pengujian dengan metode *off axis tensile test* untuk spesimen dengan arah retak 0°, gaya yang berhubungan dengan perambatan retak modulus II akan mencapai harga nol. Seharusnya pada arah 0° ini hanya perambatan retak modulus II-lah yang berperan, sehingga dengan menggunakan metode pengujian *off axis tensile test* tidak akan didapat harga ketangguhan retak modulus I. Untuk mengatasi hal ini, maka digunakan metode *modified three rail shear test*. Metode ini menggunakan suatu sistem penjepit spesimen yang terdiri atas tiga pasang pelat penjepit dengan baut. Pasangan pelat luar dibuat tetap/tidak bergerak dan pasangan pelat penjepit di tengah dapat bergerak dan memberikan beban tekan. Dengan susunan seperti ini, bagian spesimen yang tidak terjepit akan mengalami tegangan geser bidang sehingga arah retakan 0° terhadap gaya penekanan benar-benar mengalami gaya geser yang menyebabkan perambatan retak modulus II terjadi. Khusus untuk spesimen metode pengujian ini, retakan tidak terletak pada bagian tengah spesimen, tetapi pada bagian dimana spesimen tidak terjepit.

5.1 Penentuan Modulus Elastisitas E_1 dan E_2

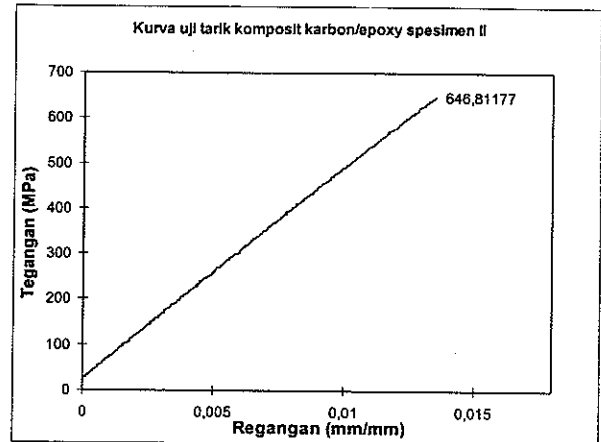
Untuk mengetahui kekuatan material laminate yang dibuat menjadi spesimen, maka dilakukan pengujian tarik sesuai dengan standar ASTM D 3039-76. Bentuk spesimen ditunjukkan pada gambar 6 dan hasil pengujian kekuatan tarik komposit searah beban pada dua spesimen tarik yang diuji dicantumkan pada tabel 1.



Gambar 6 Gambar teknik spesimen uji tarik ASTM D 3039-76

Tabel 1, Hasil uji tarik spesimen tanpa retakan

	S_{u1}	ϵ_{max}
Spesimen I	652,98 MPa	0,012422
Spesimen II	646,81 MPa	0,013507



Gambar 7 Kurva uji tarik laminat komposit karbon/epoxy serat teranyam - 4 lapis

Kurva tegangan-regangan laminate serat-matriks dengan arah serat 0°/90° seperti yang terlihat pada gambar 7 tersebut mendekati linier sampai spesimen putus. Tegangan tarik maksimum yang diambil menjadi dasar perhitungan selanjutnya adalah 646,81177 MPa dengan regangan maksimum sebesar 0,013507. Dengan demikian harga modulus elastisitas searah pembebanan, E_1 , dapat ditentukan sebesar 47,887 GPa. Harga ini adalah juga harga modulus elastisitas untuk arah tegak lurus pembebanan atau E_2 , hal ini disebabkan laminate komposit karbon/epoxy yang dibuat adalah mempunyai susunan serat 0/90° di setiap laminanya.

Patahan yang terjadi adalah tegak lurus terhadap arah pembebanan (90°) dan searah dengan arah serat yang melintang (karena serat komposit spesimen ini adalah teranyam). Tidak terlihat adanya perpatahan yang memotong serat yang melintang ini, seluruh permukaan patah yang ada terletak pada matriks diantara serat-serat yang melintang.

5.2 Penentuan Poisson Ratio

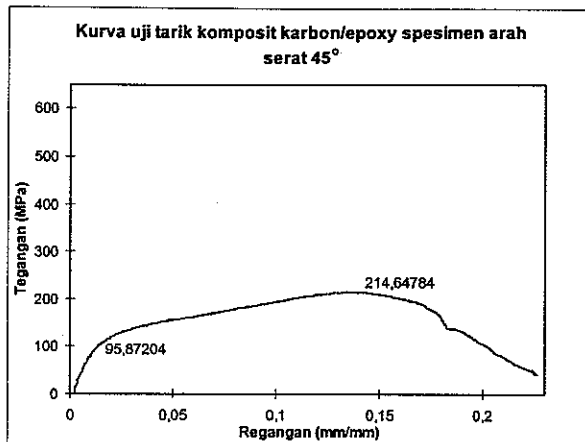
Untuk mendapatkan harga *Poisson ratio*, dilakukan pengujian tarik uniaksial dengan memasang *strain gage* arah 90° terhadap arah beban. Perpindahan searah dengan pembebanan diukur dengan sensor LVDT. Dari hasil pengukuran regangan dalam arah 0° dan 90° ini maka dapat dihitung harga *poisson ratio*

Pengambilan data regangan dari *strain gage* dan LVDT dilakukan setiap 5 detik, dan hasil rata-rata pengukuran regangan dalam arah 1 dan 2 dapat dihitung harga *poisson ratio* sebagai berikut :

$$\nu_{12} = \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} = \frac{0,0000476}{0,000923} = 0,0516 \quad (11)$$

5.3 Penentuan Modulus Geser, G_{12}

Untuk mengetahui harga modulus geser laminate, G_{12} , maka dilakukan uji tarik uniaksial terhadap spesimen yang arah seratnya dibuat 45° terhadap arah pembebanan. Kurva tegangan regangan hasil pengujian dengan arah serat 45° terhadap arah beban ditunjukkan pada gambar 8:



Gambar 8 Kurva uji tarik spesimen dengan orientasi serat 45°

Terlihat bahwa karakteristik kurva tegangan-regangan untuk orientasi serat 45° tidak linier. Dalam pengujian, spesimen mengalami pengecilan penampang (*necking*) saat tegangan tepat melewati daerah tegangan-regangan linear pada kurva. Spesimen putus pada tegangan sebesar 41,44 MPa dan regangan 0,2261. Harga tegangan maksimum adalah 214,93 MPa dengan regangan sebesar 0,1339. Harga modulus elastisitas didapat dari kurva yang masih linear mengingat *necking* atau deformasi plastis mulai terjadi setelah melewati garis linear. Harga modulus elastisitas searah beban untuk arah serat 45° , E_x , dapat ditentukan sebesar 7,836 GPa. Selanjutnya modulus geser G_{12} dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (6). Dari pengujian-pengujian sebelumnya harga-harga E_x , E_1 , E_2 , dan ν_{12} sudah diperoleh, sehingga harga modulus geser, G_{12} , dapat dihitung, yaitu sebesar 2,124 GPa.

Harga-harga kekuatan dan sifat mekanis laminate karbon/epoxy dari pengujian tarik uniaksial dicantumkan pada tabel 2.

Tabel 2, Kekuatan & sifat mekanis laminate karbon/epoxy hasil eksperimental

S_{u1} [MPa]	S_{u2} [MPa]	ϵ_{u1}	ϵ_{u2}
646,81	646,81	0,013507	0,013507

E_1 [Gpa]	E_2 [Gpa]	ν_{12}	G_{12} [Gpa]
47,887	47,887	0,0516	2,124 GPa

5.4 Tegangan Kritis Spesimen yang Mengandung Crack

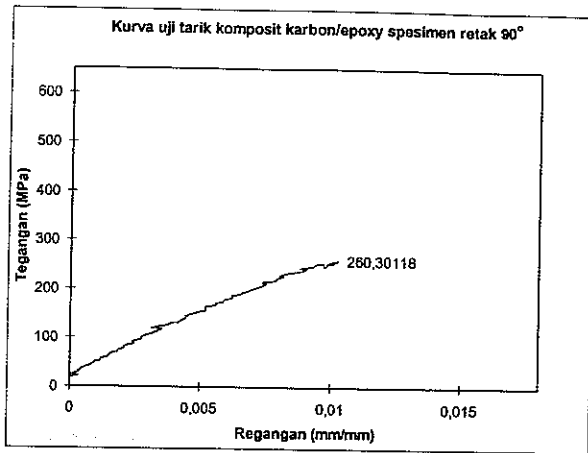
Pengujian Uniaksial

Pengujian spesimen dengan retakan 90° dilakukan dengan kecepatan penarikan yang sama dengan uji tarik spesimen tanpa retakan, yaitu 0,5 mm/menit. Penekanan penjepit dibuat sebesar 6,5 bar, karena pada tekanan tersebut, slip dapat dieliminir seminimal mungkin dengan tidak merusak spesimen yang dicekam.

Semua spesimen tarik mengalami inisiasi perambatan retak di ujung retakan awal yang telah dibuat sebelumnya. Arah perambatan retak pada seluruh orientasi retakan adalah searah dengan orientasi serat 90° yang melintang atau tegak lurus terhadap arah penarikan. Arah perambatan retak tidak mengikuti arah retakan awal yang dibuat, walaupun pada spesimen dengan orientasi sudut retakan 90° . Perambatan retak seluruh spesimen terjadi sangat cepat dan sulit untuk diamati. Untuk penelitian perambatan retak pada material ini diperlukan *high speed camera* untuk merekam fenomena perambatan retak. Salah satu contoh kurva tegangan regangan hasil pengujian spesimen laminate dengan orientasi retakan 90° dicantumkan pada gambar 9.

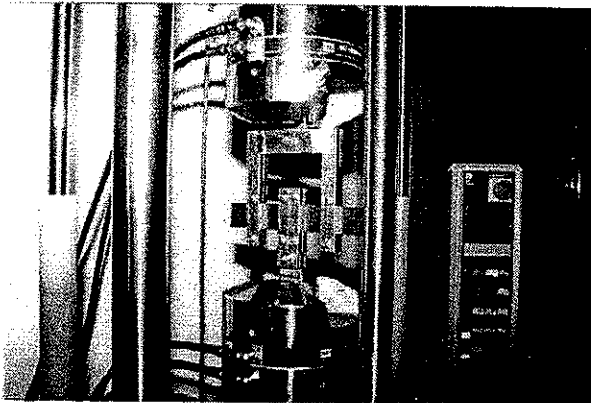
Three Rail Shear Test

Set up pemasangan spesimen three rail shear test ditunjukkan pada gambar 10. Kecepatan penarikan pada metode pengujian ini dibuat lebih kecil daripada metode uji tarik dengan pertimbangan bahwa deformasi yang terjadi lebih kecil mengingat penempatan spesimen yang melintang terhadap arah gaya geser. Perambatan retak dimulai dari ujung retakan awal menuju keluar searah dengan arah serat. Perambatan retak ini terjadi sangat cepat dan sulit diamati.



Gambar 9 Kurva tegangan-regangan spesimen dengan orientasi retakan 90°

Harga K_{II} untuk uji geser retakan 0° adalah juga merupakan harga K_{IIC} untuk material komposit yang diuji dalam penelitian ini, mengingat pada kondisi pengujian hanya modulus geser atau modulus II yang berperan.

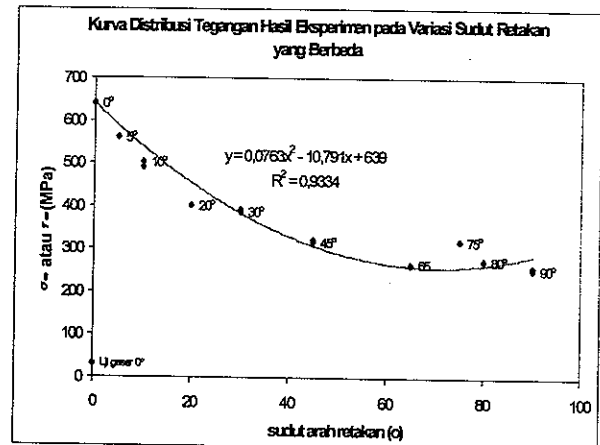


Gambar 10 Set up three rail shear test

Pengaruh arah retakan terhadap tegangan kritis atau tegangan saat spesimen tepat gagal selanjutnya ditampilkan dalam bentuk kurva seperti yang ditunjukkan pada gambar 11. Dari kurva terlihat bahwa data untuk sudut 75° jauh menyimpang dari data-data lainnya, hal ini disebabkan karena kesalahan *zero setting* saat pengujian dimulai.

Kurva *trend line* ideal dari hasil eksperimen tersebut memiliki gradien yang tidak pernah positif (kurva selalu turun) dengan titik balik minimum parabolik yang sekaligus sebagai titik akhir kurva adalah sudut 90°. Sudut 90° merupakan spesimen dengan kekuatan terendah dan sudut 0° (uji tarik) merupakan spesimen dengan kekuatan tertinggi. Hal ini dapat dipahami bahwa spesimen dengan retakan bersudut 90° terhadap arah penarikan mempunyai penampang efektif melintang terkecil (dihitung dari ujung retakan ke luar tegak lurus arah penarikan). Analisis ini didukung oleh bentuk perpatahan spesimen yang selalu terletak pada

ujung retakan ke arah luar melintang tegak lurus terhadap arah beban.

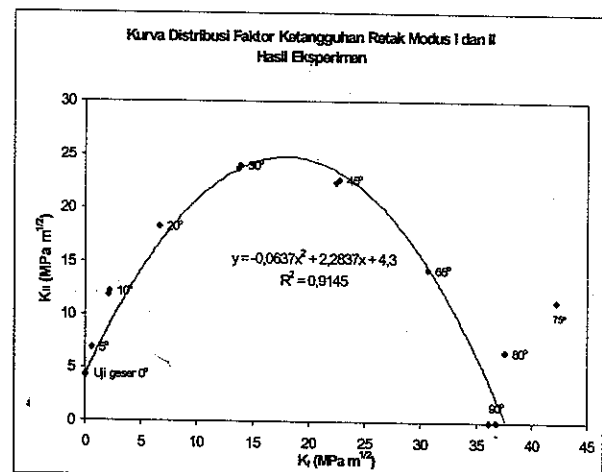


Gambar 11 Kurva distribusi tegangan kritis hasil eksperimen

Tegangan kritis menurun secara tajam dengan gradien rata-rata -6,67 MPa/° antara sudut 0° sampai dengan 45°, atau setiap satu derajat orientasi retakan, tegangan kritis menurun sebesar 6,67 MPa. Gradien yang cukup tajam tersebut hanya terdapat pada orientasi sudut 0° sampai dengan 45°. Pada orientasi 45° sampai dengan 65° gradien penurunan tegangan kritis terlihat lebih landai, yaitu -2,7 MPa/°. Akhirnya pada orientasi 65° sampai dengan 90° gradiennya jauh lebih landai, yaitu 0,32 MPa/°.

5.5 Faktor Ketangguhan Retak Eksperimental

Dengan diketahuinya harga-harga tegangan kritis, maka faktor ketangguhan retak eksperimental dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (4 s/d 7). Kombinasi faktor ketangguhan retak eksperimental untuk berbagai arah retakan ditampilkan pada gambar 12.



Gambar 12, Distribusi harga K_I dan K_{II} pada berbagai spesimen yang diberi retakan

Kurva pada gambar 12 menunjukkan bahwa data untuk sudut 75° menyimpang jauh dari *trend line*, begitu juga dengan data untuk sudut 80°. Namun demikian, penyimpangan data 80° pada kurva distribusi K_I dan K_{II} masih dapat ditolerir, karena pada kurva distribusi tegangan, data 80° masih terletak pada *trend line*, tetapi tidak untuk data 75° yang menyimpang dari *trend line* pada kurva distribusi tegangan ini. Penyimpangan pada data 75° ini, seperti telah dijelaskan sebelumnya, disebabkan oleh kesalahan *setting* nol gaya dan perpindahan.

Kurva trend line hasil eksperimen dapat didekati dengan persamaan $y = -0,0637x^2 + 2,2837x + 4,3$ dengan harga *least square standard error* $R^2 = 0,9145$. Mengikuti metoda Wu dan Hahn yang dinyatakan dengan formula (6) dan (7), maka persamaan tersebut dapat ditulis dalam bentuk:

$$19,5135 \left(\frac{K_I}{K_{Ic}} \right)^2 + \left(\frac{K_{II}}{K_{IIc}} \right)^1 - 0,5373 K_I = 1 \quad (12)$$

$$\text{dengan: } K_{Ic} = 36,28 \\ K_{IIc} = 4,25$$

atau:

$$a \left(\frac{K_I}{K_{Ic}} \right)^{m_1} + \left(\frac{K_{II}}{K_{IIc}} \right)^{m_2} - b K_I = 1 \quad (13)$$

$$\text{dengan: } a = 19,5135 \\ b = 0,5373 \\ m_1 = 2 \\ m_2 = 1$$

6. Kaji Numerik Tegangan Kritis Dengan Metode Elemen Hingga

Untuk mengetahui distribusi tegangan disekitar retakan dan perbandingan dengan hasil eksperimen, di sini dilakukan kaji numerik dengan menggunakan metoda elemen hingga. Model laminate komposit dibuat sesuai dengan eksperimen yang dilakukan, yaitu mengandung retakan dengan orientasi 0°, 5°, 10°, 20°, 30°, 45°, 65°, 75°, 85°, dan 90°. Pembuatan model sesuai dengan spesimen yang diuji ini diharapkan mampu menunjukkan kelakuan harga gabungan faktor ketangguhan retak modulus I (K_I) dan modulus II (K_{II}) sebagai pembanding terhadap keadaan sebenarnya.

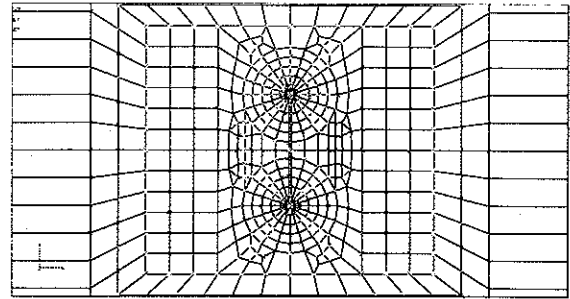
Model elemen hingga dibuat dengan cara membuat elemen-elemen segiempat dengan pola melingkar di ujung retakan. Penggunaan elemen segiempat ini dipertahankan sampai dengan elemen-elemen yang sangat kecil di ujung retakan. Salah satu contoh model elemen hingga dengan retakan arah 90° ditunjukkan pada gambar 13. Harga sifat-sifat mekanik material untuk analisis numerik menggunakan data-data yang telah didapat dari analisis eksperimen. Data-data tersebut adalah:

Jenis : Orthotropic Material

Modulus elastisitas:

$$E_1 : 4,7888 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$$

$$E_2 : 4,7888 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$$



Gambar 13 Model elemen hingga spesimen uji

Modulus geser :

$$G_{12} : 2,124 \text{ GPa}$$

$$G_{13} : 2,124 \text{ GPa}$$

$$G_{23} : 2,124 \text{ GPa}$$

Mass density : 1278 kg/m³

Poisson Ratio, ν_{12} : 0,0516

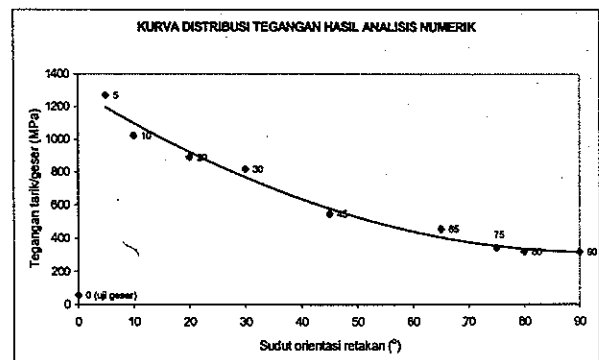
Limit Stress:

$$S_{u1} : 6,468 \times 10^8 \text{ N/m}^2$$

$$S_{u2} : 6,468 \times 10^8 \text{ N/m}^2$$

$$S_{12} : 9,028 \times 10^7 \text{ N/m}^2$$

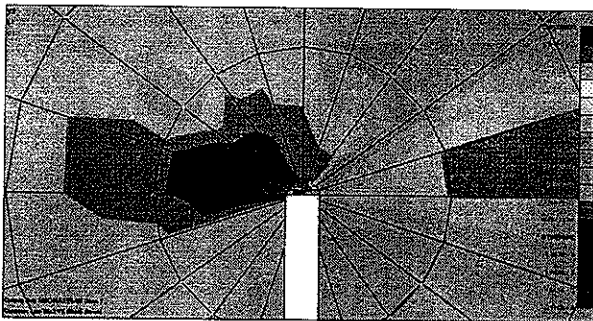
Hasil yang diperoleh dari analisis numerik ini adalah diketahuinya harga tegangan kritis dari tiap-tiap model dengan orientasi retak tertentu. Harga tegangan hasil analisis tersebut kemudian dibandingkan dengan harga tegangan maksimum yang menyebabkan material komposit tepat akan gagal, yaitu 646 MPa. Apabila harga tegangan maksimum masih belum sama dengan 646 MPa, maka besar pembebanan diiterasi sampai dengan dihasilkan harga tegangan maksimum hasil analisis yang sama dengan 646 MPa. Besarnya pembebanan maksimum yang menyebabkan model dengan retakan tepat gagal adalah pembebanan yang menyebabkan harga tegangan rata-rata hasil analisis mendekati harga tegangan maksimum kekuatan komposit, yaitu 646 MPa



Gambar 14 Kurva tegangan kritis hasil analisis numerik

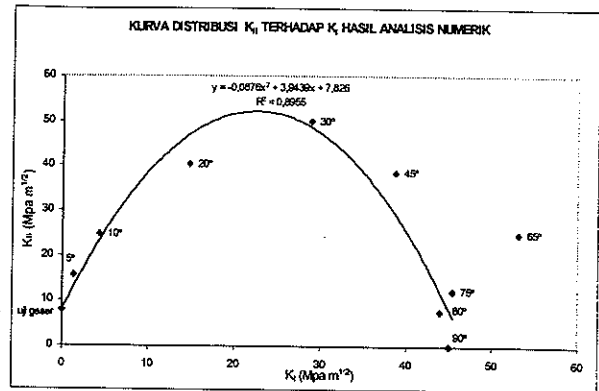
Khusus untuk model uji geser, harga tegangan kritis diambil pada titik-titik yang terletak pada garis searah pembebanan antara ujung retakan sampai dengan permukaan bebas. Pembebanan yang menyebabkan model tepat gagal adalah apabila harga tegangan geser rata-rata hasil analisis mendekati harga kekuatan geser material, yaitu 90,28 Mpa.

Harga tegangan kritis dalam bentuk kurva ditunjukkan pada gambar 14. Terlihat bahwa tegangan kritis cenderung menurun dengan bertambahnya sudut arah retakan. Trend line analisis numerik juga menunjukkan kemiripan dengan hasil analisis eksperimental. Sedangkan contoh distribusi tegangan disekitar retakan dengan orientasi arah retak 90° akibat beban geser ditunjukkan pada gambar 15.



Gambar 15 Distribusi tegangan disekitar retak untuk sudut retakan 0°, pengujian geser

Harga faktor ketangguhan gabungan retak modulus I dan II untuk berbagai orientasi arah retakan ditampilkan pada gambar 16. Dari titik-titik penyebaran data K_I dan K_{II} dibuat kurva pendekatan (*trend line*) berderajat dua dengan acuan titik uji geser 0° sebagai titik perpotongan. Terlihat pada grafik di atas bahwa titik data 65° tidak tercakup atau jauh dari kurva pendekatan. Namun demikian, titik-titik penyebaran data lainnya cukup baik membentuk suatu kecenderungan berupa kurva parabola tertutup dengan persamaan kuadrat, yaitu $y = -0,0876x^2 + 3,9439x + 7,826$ dengan *least square error* sebesar $R^2 = 0,8955$. Titik potong kurva pada sumbu K_I adalah sudut 90°, yaitu pada K_I sebesar 44,90 MPa $m^{1/2}$. Sedangkan titik potong kurva pada sumbu K_{II} adalah sudut 0° uji geser, yaitu pada K_{II} sebesar 7,83 MPa $m^{1/2}$. Titik maksimum adalah titik data sudut 30° dengan harga K_I sebesar 28,83 MPa $m^{1/2}$ dan K_{II} sebesar 49,94 MPa $m^{1/2}$.



Gambar 16 Variasi faktor ketangguhan retak modulus I dan II hasil analisis numerik

Dengan mengadopsi metoda Wu dan Hahn, persamaan tersebut dapat ditulis kembali dalam bentuk sebagai berikut:

$$22,579 \left(\frac{K_I}{K_{Ic}} \right)^2 + \left(\frac{K_{II}}{K_{IIc}} \right) - 0,5039 K_I = 1 \quad (14)$$

$$\text{dengan: } K_{Ic} = 44,90$$

$$K_{IIc} = 7,826$$

Atau:

$$a \left(\frac{K_I}{K_{Ic}} \right)^{m_1} + \left(\frac{K_{II}}{K_{IIc}} \right)^{m_2} - b K_I = 1 \quad (15)$$

$$\text{dengan: } a = 44,90$$

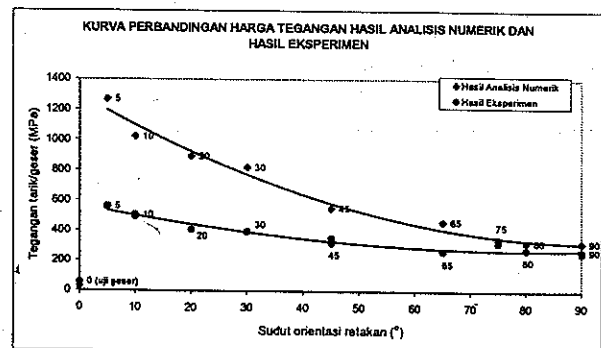
$$b = 7,826$$

$$m_1 = 2$$

$$m_2 = 1$$

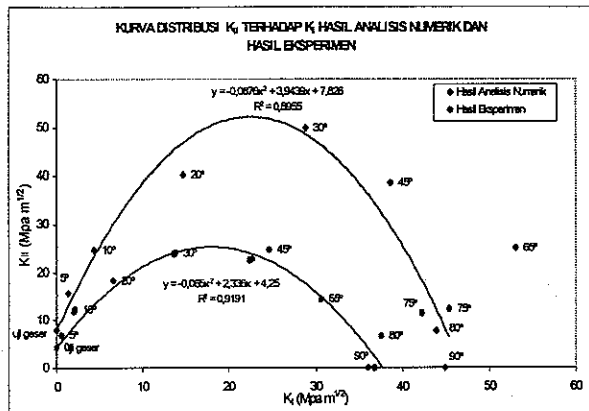
7. Perbandingan Antara Kaji Eksperimental Dengan Kaji Numerik

Untuk tujuan validasi, analisis numerik maupun eksperimental perlu dibandingkan. Hasil analisis tegangan kritis dengan metoda eksperimental dan metoda numerik memiliki kecenderungan yang sama seperti ditunjukkan pada gambar 17. Terlihat bahwa distribusi tegangan eksperimental dan distribusi tegangan numerik menunjukkan *trend line* berbentuk parabola terbuka, dengan satu titik balik minimum pada titik 90°.



Gambar 17 Perbandingan tegangan kritis antara hasil eksperimen dengan hasil analisis numerik

Perbandingan faktor ketangguhan retak hasil analisis eksperimental dengan hasil numerik ditampilkan pada gambar 18. Terlihat bahwa kedua kurva adalah sebangun. Kurva hasil eksperimen dan analisis numerik memiliki titik potong dengan sumbu K_{II} pada eksperimen adalah $4,2503954 \text{ MPa m}^{1/2}$ sedangkan pada hasil analisis numerik adalah $7,826 \text{ MPa m}^{1/2}$.

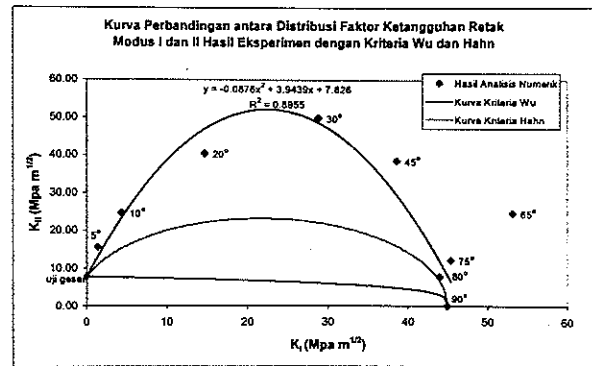


Gambar 18 Perbandingan antara hasil eksperimen dengan hasil analisis numerik

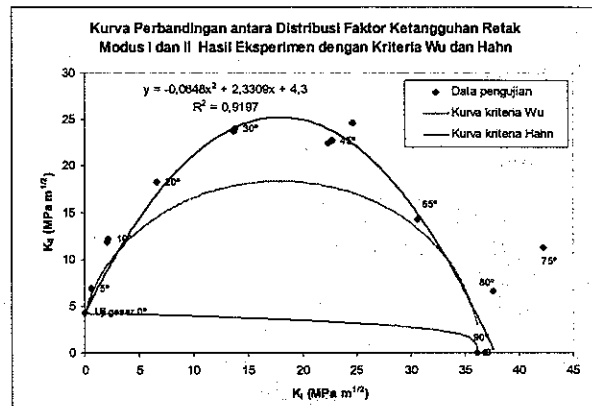
Titik perpotongan dengan sumbu K_I pada eksperimen adalah $36,0799 \text{ MPa m}^{1/2}$ sedangkan pada hasil analisis adalah $44,90 \text{ MPa m}^{1/2}$. Pada kurva *trend line* eksperimen harga K_{II} maksimum adalah $24 \text{ MPa m}^{1/2}$ pada K_I sebesar $14 \text{ MPa m}^{1/2}$, sedangkan untuk kurva *trend line* analisis numerik harga K_{II} maksimum adalah $51 \text{ MPa m}^{1/2}$ pada K_I sebesar $23 \text{ MPa m}^{1/2}$.

Kurva analisis numerik pada gambar 18 memberikan daerah aman (daerah di bawah kurva) yang lebih luas dibandingkan dengan daerah aman yang dihasilkan oleh kurva eksperimen. Hal ini disebabkan karena analisis numerik mengasumsikan keadaan material dan lingkungan yang sempurna, mengabaikan cacat material dan kondisi lingkungan yang terjadi pada keadaan sesungguhnya sehingga sangat wajar apabila harga tegangan kritis yang didapat dari hasil analisis numerik lebih besar daripada hasil eksperimen.

Distribusi harga K_I dan K_{II} hasil eksperimen dan analisis numerik selanjutnya dibandingkan Kriteria Wu dan Hahn. Perbandingan dalam bentuk kurva ditunjukkan pada gambar 19 dan 20. Terlihat bahwa Kriteria Wu cukup jauh berbeda dengan hasil eksperimen ataupun hasil numerik. Sedangkan kecenderungan bentuk kurva yang lebih baik didapatkan dari kriteria Hahn. Seperti halnya hasil eksperimen, pada hasil analisis numerik ini kurva Hahn memberikan "daerah aman", yaitu dibawah kurva, yang ekstrim atau "sangat aman".



Gambar 19 Perbandingan antara hasil analisis numerik dengan kurva kriteria Wu dan Hahn



Gambar 20 Perbandingan antara hasil eksperimen dengan kurva kriteria Wu dan Hahn

8. Kesimpulan dan Pengembangan Selanjutnya

Kesimpulan yang dapat diambil dari kaji eksperimental dan numerik tentang pengaruh arah retakan terhadap faktor ketangguhan retak pada laminate karbon/epoxy antara lain

- Hasil eksperimen dan numerik menunjukkan bahwa faktor ketangguhan retak untuk laminate serat teranyam cenderung menurun dengan kenaikan sudut orientasi retakan, dan mencapai titik minimum pada orientasi 90° .
- Faktor ketangguhan retak hasil analisis numerik memberikan daerah aman yang lebih besar dibandingkan eksperimen, karena dalam analisis numerik material dianggap tanpa cacat dan bonding antar lamina dianggap sempurna.
- Kriteria Wu dan Hahn untuk mixed mode K_I - K_{II} dibandingkan hasil eksperimen maupun numerik memberikan bentuk kurva yang sebangun tetapi memiliki nilai yang berbeda cukup besar ($\geq 71\%$)
- Berdasarkan metoda Wu dan Hahn, dari hasil analisis dalam makalah ini dapat dikembangkan kriteria untuk laminate serat teranyam yang dinyatakan dalam persamaan 12,13,14,15.

Metoda dan hasil penelitian yang telah disajikan dalam makalah ini dapat dijadikan dasar untuk penelitian lebih lanjut antara lain penelitian tentang pengaruh susunan lapisan, perambatan retak, retak lelah untuk laminate serat teranyam. Metoda eksperimental dan numerik yang digunakan juga masih perlu disempurnakan dengan memperhatikan faktor-faktor cacat material, spesimen yang lebih banyak, dan perekat yang lebih bagus sehingga didapat perbandingan hasil analisis numerik dengan ekseperimental yang lebih baik

Sumber dana :

Dana Penelitian yang didasari artikel ini adalah melalui dana "Kaji Teoritis dan Eksperimental Tentang Medan Elastis-Plastis Di Sekitar Crack Pada Struktur Komposit Laminate", Grant No. 63/P2IPT/DPPM/98 /PHBVII/1/1998, yang dikelola oleh Dit Binlitabmas Ditjen Dikti, Depdiknas.

9. Daftar Pustaka

1. ASTM, 1990, Standard Test Method for Tensile Properties of Fiber-Resin Composites, *ASTM Standards and Literature References for Composite Materials*, 2nd ed., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA
2. Daniel, Isaac M., 1994, *Engineering Mechanics of Composite Material*, Oxford University Press, New York.
3. DeVilbiss, T.A., July 1985, SEM/XPS Analysis of Fracture Adhesively Bonded Graphite Fibre-reinforced Polyimide Composites, *Composites* vol. 16 no. 3.
4. Donaldson, S.L., 1985, Fracture Toughness Testing of Graphite/Epoxy and Graphite/PEEK Composites, *Composites*, vol.16 no.2.
5. Gibson, Ronald F., 1994, *Principles of Composite Material Mechanics*, Mc Graw Hill, Singapore.
6. Hahn, H.T., 1983, A Mixed Mode Fracture Criterion for Composite Materials, *Composites Techn Rev* 5 no 1.
7. Kamiya, S., 1993, The Law of Similarity on The Fracture Behaviour of Continuous Fiber-Reinforced Composite Laminates with Different Ply Thicknesses, *JSME International Journal* series vol.36 no.3 .
8. Leach, D.C., 1985, Failure and Fracture of Short Glass Fibre-reinforced Nylon Composites, *Composites* vol. 16 no. 2.
9. Phillips, D.C., 1982, The Stability of Transverse Cracks in Fibre Composites, *Journal of Materials Science Letters* , pp. 321-324
10. T Shimamura, Y., 1995, Fractal Property of Matrix Cracking in GFRP Cross-Ply Laminates, *JSME International Journal* series A vol. 38 No.4.
11. Wu, E.M., 1968, Discontinuous Mode of Crack Extension in Unidirectional Composites, *T & AM Report no.309*, University of Illinois, USA.