

ESTIMASI KERUSAKAN AWAL PADA GFRP MATERIAL KARENA BEBAN TUMBUKAN BERULANG

Gatot Prayogo* Danardono A.S.*

Departemen Teknik Mesin
Universitas Indonesia,
Kampus Baru UI Depok 16424
Tel. 021-7270032, Fax. 0217270033
e-mail: gatot@eng.ui.ac.id

ABSTRAK

Pengujian tentang perilaku bahan komposit GFRP karena beban tumbukan mekanik berulang telah dilakukan. Berdasarkan studi tersebut kerusakan awal (damage initiation) telah diprediksi berdasarkan pendekatan fracture mechanis (crack propagation rate) dan stress intensity factor. Hasil estimasi dibandingkan dengan hasil eksperimen menunjukkan bahwa pada tingkat impact energy yang lebih tinggi didapat perbedaan N (number of impacts) yang cukup berarti, tetapi pada tingkat impact energy yang lebih rendah didapat hasil estimasi N , menjadi lebih mendekati hasil pengujian.

Keywords: Impact fatigue, damage initiation, crack propagation.

1. Pendahuluan

Penerapan bahan komposit pada struktur pesawat terbang telah mengalami kemajuan yang sangat pesat pada decade terakhir ini. Bahan komposit tersebut mempunyai kekuatan dan kekakuan specific yang tinggi, tahan terhadap pengaruh bahan kimia (*high chemical resistance*), serta sangat baik menahan beban kelelahan (*high fatigue resistance*). Tetapi bahan komposit tersebut sangat rentan (*very susceptible*) terhadap kerusakan yang disebabkan oleh berbagai beban impak. Pada tempurpur ruang, beban impak pada bahan logam (*metallic materials*) dapat menimbulkan deformasi lokal (*local deformation*), tetapi beban impak pada bahan komposit akan menimbulkan kerusakan lokal (*local damage*).

Berbagai macam beban impak yang diterima struktur pesawat terbang yang terbuat dari bahan komposit dapat berupa, terpaan kerikil saat *landing and take off*, peralatan yang jatuh karena keteledoran bahwa benda uji (*target material*) mengalami kerusakan di daerah dekat permukaan impak berupa *ring-crack*, *intergranular-crack*, *transgranular-crack*, dan lain sebagainya, yang akan mengurangi transparansi Polymethylmethacrylate (*PMMA*), *zinc selenide*, *zinc sulfide*, *gallium arsenide*. Beberapa penelitian yang lainnya juga telah dilakukan untuk mempelajari erosi material disebabkan oleh raindrop, seperti mekanisme erosi pada beberapa material menggunakan *water jet* maupun *single raindrop impact*⁽⁵⁻⁶⁾.

personel pemeliharaan, dan impak akibat terpaan butir-butir hujan (*raindrop impacts*), dan lain sebagainya. Berbagai macam beban impak tersebut dapat mengakibatkan kerusakan yang cukup berarti pada bahan komposit baik yang kasat mata (*Visible Impact Damage / VID*) maupun yang tak kasat mata (*Barely Visible Impact Damage / BVID*). Ketika penggunaan dalam jangka waktu panjang suatu struktur terbuat dari bahan komposit diperhatikan, *single raindrop impact* berkecepatan sekitar 200 m/det mungkin tidak akan menimbulkan kerusakan, tetapi *raindrop impact* yang berulang-ulang akan menimbulkan erosi dari bahan komposit⁽¹⁾.

Beberapa penelitian telah dilakukan untuk mengklarifikasi respon material terhadap *raindrop impact* menggunakan teknik *water jet* atau *water drop impact*⁽²⁻⁴⁾. Penelitian tersebut menunjukkan

Sementara itu, beberapa penelitian terkait juga telah dilakukan untuk menemukan mode-mode kerusakan yang ditimbulkan oleh tumbukan berkecepatan rendah dari hard impactor⁽⁹⁻¹⁴⁾. Dari penelitian tersebut menunjukkan bahwa kerusakan pada plat komposit yang dikenai impak kecepatan rendah (low velocity impact) dapat diklasifikasikan menjadi empat mode, yaitu delamination, matrix-cracking, fiber breakage, dan debonding antara matrix dan fiber. Delamination adalah yang utama (major) diantara mode-

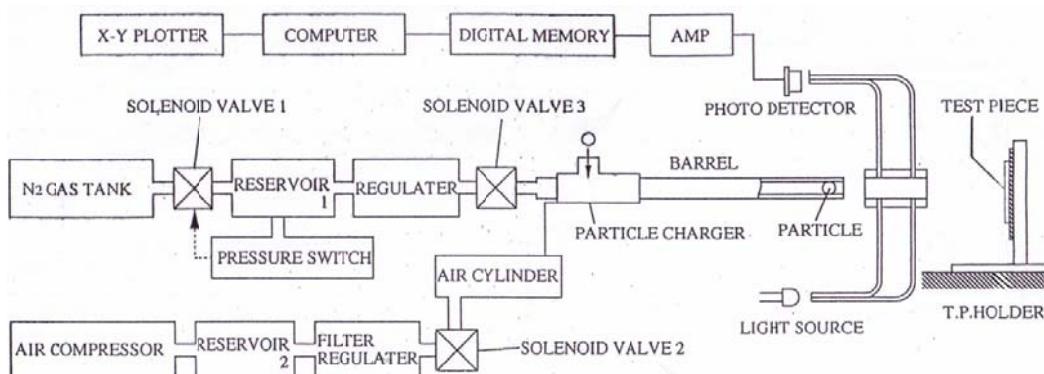


mode tersebut dan itu selalu terlihat bersamaan dengan kerusakan lainnya.

Makalah ini akan membahas tentang prediksi kerusakan awal yang berupa internal damage (debonding between fibre and matrix) dengan pendekatan fracture mechanis.

2. Pengujian

2.1 Peralatan Pengujian



Gambar 1. Skema peralatan pengujian

2.2 Material and Sample Preparation

Bahan uji yang digunakan yaitu material komposit GFRP sebagai material target, dan butiran

Skema peralatan uji impak yang digunakan adalah seperti dalam Gambar 1. Bagian utama dalam peralatan uji di atas adalah gas gun dan peralatan pengukur kecepatan. Sistem pengukur kecepatan terdiri dari photo diode, amplifier, memori digital, komputer dan plotter. Kecepatan impaktor akan tercatat pada saat impaktor melewati dua buah dioda. Penjelasan secara detail mengenai pengujian ini dapat dilihat di Referensi 15.

Nylon sebagai material impaktor. *Mechanical properties* impaktor dan benda uji secara lengkap disajikan pada Tabel 1. dan Tabel 2.

Table 1. Mechanical and physical properties of nylon bead

Diameter	Mass	Density	Hardness
4.0 mm	0.04 g	1.14	103 HRR

Table 2. Specification of GFRP Specimen

Matrix	Glass fiber	Glass content (wt %)	Poison ration	Young's Modulus (GPa)
Epoxy	EM60	33.0	0.3	10.8

2.3 Prosedur Pengujian

Material GFRP, yang berbentuk piringan plat, ditempatkan pada Test Piece Holder dengan alas karet seperti dalam Gambar 1. Setelah terpasang, material dibebani beban impak oleh butiran-butiran Nylon secara berulang-ulang. Seluruh proses impak butiran Nylon terhadap material uji mengikuti sudut normal impak, artinya arah tumbukan adalah tegak lurus dengan permukaan titik kontak material. Setelah material

ditumbuk dengan jumlah impak tertentu, kerusakan yang terjadi akan dilihat dengan menggunakan mikroskop optik. Kerusakan yang diamati adalah kerusakan yang terjadi di daerah sekitar permukaan depan dan permukaan belakang titik impak. Untuk mengamati kerusakan di bagian dalam material, maka material dipotong melintang melalui titik impak tersebut. Pengamatan terhadap penampang potongan tsb. dilakukan dengan menggunakan mikroskop elektron.



Pengamatan di sekitar permukaan depan titik impak, permukaan belakang dan potongan plat menunjukkan beberapa tipe kerusakan. Pada permukaan depan, terdapat retakan yang berbentuk cincin (*ring crack*), sedangkan kerusakan yang berbentuk retak

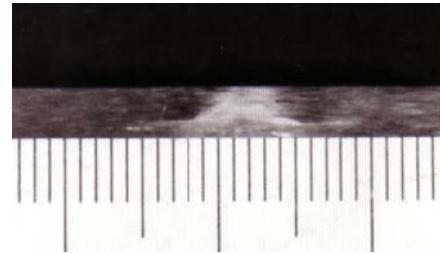
bintang (*star crack*) terdapat pada permukaan belakang benda uji. Kerusakan dalam (*internal damage*) berupa debonding antara fibre dan matrix. Gambar mode kerusakan tersebut dapat terlihat di Gambar 2a, 2b, 2c, dibawah.



Gb. 2a. Ring crack



Gambar 2b. Star crack



Gambar 2c. Internal damage

3. Pendekatan Teoritis

Untuk menentukan batas ketahanan dalam pengujian kelelahan material umumnya digunakan kurva S-N, dimana tegangan yang dikerjakan (S) dan jumlah siklus (N) yang ditoleransi oleh sampel sebelum sampel itu patah. Pendekatan yang sama dapat diterapkan dalam kasus tumbukan mekanik berulang. Dalam hal ini, Paris' equation ⁽¹⁶⁾ dapat digunakan untuk menentukan jumlah tumbukan yang ditoleransi sebelum kegagalan sampel.

Patahan akan terjadi ketika faktor intensitas tegangan mencapai nilai kritis, K_{IC} , dikenal sebagai *fracture toughness* atau *fracture resistance* yang diperoleh dengan menggunakan dua persamaan berikut

$$K_{IC} = Y\sigma_0\sqrt{a} = \sqrt{2E\gamma_{eff}} \quad \dots \dots \dots (3)$$

Dimana E adalah modulus Young, σ_0 adalah modulus patah dan γ_{eff} adalah energi efektif permukaan.

Dengan menggabungkan persamaan (1) dan (2), rumus berikut ini didapat:

$$\frac{da}{dN} = AY^n\sigma_{app}^n a^{\frac{n}{2}} \quad \dots \dots \dots (4)$$

Persamaan (4) telah diselesaikan dan dijabarkan dengan detil oleh Sebbani ⁽¹⁷⁾, selanjutnya didapat rumusan untuk kasus impak tertentu sbb.:

Untuk kondisi sifat material tetap, daripada tegangan yang bekerja, maka didapat persamaan:

$$N = \frac{D}{\frac{w_{app}^2}{\pi}} \quad \dots \dots \dots (5)$$

Dimana w_{app} adalah impact energy dan D adalah konstan. Nilai-nilai dari w_{app} dan D tergantung pada

Persamaan ini dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\frac{da}{dN} = AK_I^n \quad \dots \dots \dots (1)$$

Di mana a adalah panjang retak, K_I merupakan faktor intensitas tegangan, A dan n adalah konstanta. Nilai A dan n tergantung pada karakteristik bahan dan kondisi pengujian. Faktor intensitas tegangan terkait dengan tegangan yang diterapkan σ dan panjang retak a sebagai berikut:

$$K_I = Y\sigma\sqrt{a} \quad \dots \dots \dots (2)$$

sifat fisik bahan dan dapat ditentukan dengan persamaan berikut ini:

$$D = \frac{1}{(n-2)AY^2 2^{\frac{3}{2}n-2} (E)^{n-1}} \left(\frac{\sigma_0^2}{\gamma_{wof}} \right)^{\frac{n-2}{2}} \quad \dots \dots \dots (6)$$

Nilai crack growth rate untuk material GFRP dapat diperkirakan dari data hasil pengujian yang telah dilakukan oleh Yon Jig Kim Yon Jig Kim ⁽¹⁸⁾, dan hasilnya dapat dilihat di persamaan berikut ini

$$\dots \dots \dots (7)$$

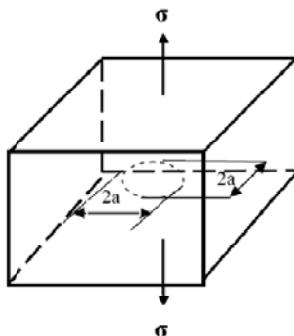
$\frac{da}{dN} = 5,75 \cdot 10^{-14} (\Delta K)^{2,17}$ uk circular internal crack of radius a (penny-shaped crack) embedded in an infinite solid subjected to uniform tension (lihat gambar), adalah seperti ditunjukkan pada persamaan 8, dibawah ini.

$$K_I = \frac{2}{\pi} \sigma \sqrt{\pi a} \quad \dots \dots \dots (8)$$



Dan didapat nilai Y adalah :

$$Y = \frac{2}{\sqrt{\pi}} = 1,1284$$

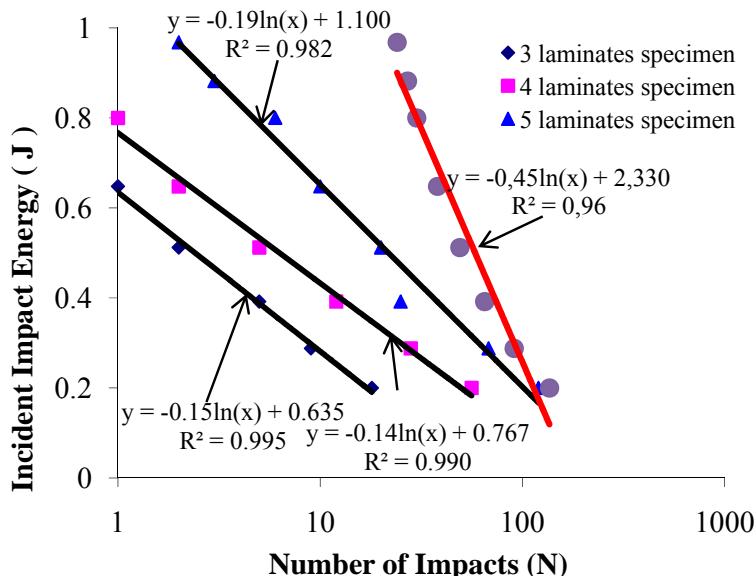


Gambar 3, Circular internal crack in an infinite solid

4. Hasil Pengujian dan Pembahasan

Hasil pengujian berupa kerusakan awal (damage initiation) untuk 3, 4, 5 laminasi komposit dapat dilihat pada Gambar dibawah ini. Pada gambar tersebut ditunjukkan bahwa jumlah impact (number of impacts)

untuk menimbulkan kerusakan awal (damage initiation) digambarkan dalam bentuk grafik impact energy VS number of impacts. Grafik dengan garis solid warna hitam adalah dari hasil pengujian, dan grafik dengan garis solid warna merah adalah hasil dari estimasi.



Gambar 4 , Damage initiation untuk 3,4,5 laminates, dan hasil estimasi

Dari grafik terlihat pada gambar 4 , menunjukkan bahwa grafik hasil estimasi pada impact energy yang lebih tinggi (0,9 Joule) diperlukan jumlah impact yang lebih banyak jika dibandingkan dengan hasil pengujian. Hal ini dimungkinkan karena beberapa sebab antara lain adalah karena nilai Y (faktor korensi bentuk crack) pada proses estimasi dengan asumsi sebuah penny-shaped

crack embedded in an infinite solid subjected to uniform tension (lihat gambar) yang menunjukkan bahwa pada impak kecepatan tinggi maka sebagian energy impak ter-reflected, sedang energy yang diserap akan lebih kecil. Disamping itu, faktor getaran membran pada hasil pengujian juga akan sangat berpengaruh terhadap proses kerusakan terutama pada hasil pengujian.



5. Kesimpulan

Dari hasil proses estimasi dapat disimpulkan bahwa pada tingkat energy impak yang lebih tinggi didapat perbedaan yang cukup significance, tetapi pada tingkat energy yang lebih rendah didapat hasil estimasi menjadi lebih mendekati hasil pengujian. Perlu beberapa pertimbangan untuk memperbaiki hasil estimasi diantaranya faktor Y (faktor koreksi bentuk crack), serta absorbed enegy oleh benda uji.

Referensi

1. Zukas J.A., Limitations of Elementary Wave Theory,
4. Peterson, T.L., Multiple Water Drop Impact Damage in Layered Infrared Transparent Materials, in Erosion: Prevention and Useful Applications, ASTM STP 664, W.F. Adler, Ed., American Society for Testing and Materials, 1979, pp. 279-297
5. Field, J. E., Gorham, D. A., and Rickerby, D. G., High-Speed Liquid Jet and Drop Impact on Brittle Targets, in Erosion: Prevention and Useful Applications, ASTM STP 664, W.F. Adler, Ed., American Society for Testing and Materials, 1979, pp. 298-319.
6. Gorham, D.A., et.al., Damage Mechanisms in Polymers and Composites Under High-velocity Liquid Impact, in Erosion: Prevention and Useful Applications, ASTM STP 664, W.F. Adler, Ed., American Society for Testing and Materials, 1979, pp.320-342.
7. Adler F. William, Rain Erosion Mechanism in Brittle Materials, Wear, 50, 1978, 11-38.
8. Van Der Zwaag S. , Field J.E., Rain Erosion Damage in Brittle Materials, Engineering Fracture Mechanics, Vol.17, No.4, pp.367-379, 1983.
9. Joshi S.P. , Sun C.T., Impact Induced Fracture in a Laminated Composite, J. of Comp. Mater., Vol.19- Jan. 1985.
10. Lin H.J. and Lee Y.J. Impact-Induced Fracture in Laminated Plates and shells, J. of Comp. Mat., Vol. 24-Nov. 1990.
11. Jang B.P., et. al., Repeated Impact failure of in ed. Zukas J.A., et. al., Impact Dynamics, John Wiley & Sons, 1982, USA.
2. Rosenblatt, M., Ito, Y.M., and Eggum, G.E., Analysis of Brittle Target Fracture from a Subsonic Water Drop Impact, in Erosion: Prevention and Useful Applications, ASTM STP 664, W.F. Adler, Ed., American Society for Testing and Materials, 1979, pp. 227-254.
3. Hackworth, J. V., Kocher, L. H., and Snell, I. C., Response of Infrared Transmitting Materials to High-Velocity Impact by Water Drops, in Erosion: Prevention and Useful Applications, ASTM STP 664, W. F. Adler, Ed., American Society for Testing and Materials, 1979, pp. 255-278.
12. Peter O. Sjöblom, et. al., On Low-Velocity Impact testing of Composite Materials, J. of Comp. Mater., Vol. 22-January 1988.
13. Hong S., Liu. D., On the Relationship Between Impact Energy and Delamination Area, Experimental Mechanics, June 1989, pp. 115-120.
14. Rakumar R.L., Chen P.C., Low-Velocity Impact Response of Laminated Plates, AIAA Journal, Vol.21, No.10, Oct. 1983.
15. Gatot Prayogo, Hiroomi Homma, Yasuhiro Kanto, *Repeated Rain-drop Impact Damage in Glass-Fibre Reinforced Plastics*, 2nd ISIE (International Symposium on Impact Engineering), Beijing, China, 1996.
16. David Broek, Elementary Engineering Fracture Mechanics, Martinus Nijhoff Publishers, 1982
17. M. J. E. Sebbani and C. Allaire, Mechanical impact fatigue of refractories, British Ceramic Transactions 2001 Vol. 100 No. 5
18. Yon Jig Kim and Jae Kyoo Lim, A study on fatigue crack propagation mechanism of GFRP in synthetic sea water , Journal of Mechanical Science and Technology, 2001, Volume 15, Number 10, Pages 1380-1385



