

ANALISIS EKSPERIMENTAL KERUSAKAN PANEL *FIBERGLASS REINFORCED POLYESTER* AKIBAT IMPAK KECEPATAN TINGGI

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF THE FAILURE OF GLASSFIBER REINFORCED POLYESTER PANEL DUE TO HIGH-VELOCITY IMPACT

Nazarudin
Puslitbang Iptekhan Balitbang Kemhan
Jl. Jati No. 1, Pondok Labu, Jakarta
Nazar_els@yahoo.com

ABSTRAK

Dalam percobaan ini dilakukan pengujian terhadap panel komposit fiberglass reinforced polyester. Terdapat tiga prosedur yang diujikan, yaitu uji balistik, uji tarik, dan uji tekuk. Uji balistik dilakukan dengan menembakkan amunisi 9 mm tumpul menggunakan pistol FN 46. Penembakan dilakukan pada jarak 5 meter dengan spesimen dalam posisi tergantung. Setelah dikenai uji balistik, spesimen dikenai uji tarik dan uji tekuk. Tujuannya adalah untuk mengetahui gejala material yang muncul setelah uji balistik. Rangkaian percobaan ini ditujukan untuk mengetahui kerusakan panel komposit fiberglass reinforced polyester akibat impak berkecepatan tinggi.

Kata Kunci: *Fiberglass Reinforced Polyester; Uji Balistik; Uji Tarik; Uji Tekuk.*

ABSTRACT

In this experiment, composite panel of fiberglass reinforced polyester was tested. There were three testing procedures, namely ballistic test, tensile test, and bending test. Ballistic test was administered by firing 9 mm bullet using FN 46 pistol. The firing was taken from a distance of 5 meters long to hanged specimen. After endured the ballistic test, the same specimen will be subjected to tensile test and bending test. The aim of these tests was to analyze material condition of the specimen after ballistic test. These series of tests aimed to find out the damage of fiberglass reinforced polyester composite panel caused by high-velocity impact.

Keywords: *Fiberglass Reinforced Polyester; Ballistic Test; Tensile Test; Bending Test.*

PENDAHULUAN

Panel komposit *Fiberglass Reinforced Polyester* (GRP) dibuat dengan metode *hand lay-up* yang terdiri dari bahan *fiberglass* sebagai penguat dan resin poliester sebagai matriks. Dalam penelitian ini, panel komposit GRP dijadikan sebagai spesimen uji. Terdapat tiga kategori uji yang dilakukan: uji balistik, uji tarik (*tensile*), dan uji tekuk (*bending*). Eksperimen uji balistik dilakukan dengan menggunakan Pistol FN 46 dengan amunisi 9 mm tumpul buatan PT Pindad. Pengujian balistik dilakukan pada jarak 5 meter dengan spesimen tergantung. Panel komposit terdiri dari dua lempengan panel yang tidak diklem.

Pengujian berikutnya menggunakan peralatan uji tarik (*tensile*) dan peralatan uji tekuk (*bending*). Spesimen yang diuji adalah spesimen yang telah

mengalami uji balistik. Tujuan dilakukannya uji tarik dan uji tekuk adalah untuk mengetahui gejala material yang muncul setelah uji balistik.

Dalam uji balistik, spesimen akan terkena impak oleh proyektil tumpul kaliber 9 mm, massa 1 gram, dan kecepatan impak 780 m/s. Pengujian direkam dengan kamera video kecepatan tinggi (APX Photron FASTCAM) dengan sistem akuisisi data mampu mengambil hingga 120.000 *frame* per detik. Data dikumpulkan dari gambar yang digunakan untuk memperkirakan kecepatan proyektil. Untuk semua struktur yang terkena impak, perpanjangan kerusakan daerah ditentukan dengan teknik optik (Kant, 1982).

METODOLOGI

Metodologi dalam eksperimen ini terdiri dari dua tahap. Tahap pertama adalah melakukan

pembuatan spesimen dan tahap kedua melakukan pengujian. Pembuatan spesimen dilakukan dengan metode hand lay-up dimana material dasarnya terdiri dari fiberglass tipe S woven denier 800 sebagai penguat (reinforced), lalu matrik yang dipakai adalah resin unsaturated polyester Yukalac dengan katalis MEKPO. Perbandingan resin dengan katalis adalah 1 % dari resin. Pembuatan spesimen ini dilakukan dalam temperatur ruang 25 0C dengan pemberian kompres beban 10 kg.

Kemudian pada tahap kedua, spesimen ini dilakukan pengujian. Terdapat tiga kategori uji yang dilakukan yaitu: uji balistik, uji tarik (tensile), dan uji tekuk (bending). Eksperimen uji balistik dilakukan dengan menggunakan Pistol FN 46 dengan amunisi 9 mm tumpul buatan PT Pindad. Pengujian balistik dilakukan pada jarak 5 meter dengan spesimen tergantung. Panel komposit terdiri dari dua lempengan panel yang tidak diklem.

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Analisis Material Komposit

Ada dua pendekatan yang dapat digunakan dalam analisis material komposit, yaitu pendekatan mikromekanik dan makromekanik. Pada pendekatan mikromekanik, analisis dilakukan pada level mikroskopik, di mana sifat fisik komposit diturunkan secara matematis dari sifat dasar yang dikandung oleh material yang dipilih tersebut. Pada analisis makromekanik, hanya sifat rata-rata yang dipertimbangkan sebagai penting, sementara mikrostruktur dari lamina diabaikan. Dua metode analisis tersebut digunakan sebagai kombinasi satu sama lain, di mana kestabilan sifat lamina yang diperoleh dari analisis mikromekanik digunakan untuk mendapatkan sifat rata-rata dari lamina. Akan tetapi, perlu dicatat bahwa analisis mikromekanik terbatas.

2. Kriteria Kegagalan (*Failure*) untuk Material Komposit

Adalah penting untuk memperkirakan secara akurat kekuatan komposit yang terkena dampak tegak lurus oleh beban kompleks, mengingat kekuatan sering menjadi parameter krusial dalam desain. Metode yang digunakan untuk

menganalisis kekuatan pada *material isotropic* tidak cukup hanya menganalisis karakteristik kekakuan dan kekuatan komposit yang saling bergantung. Analisis kegagalan (*failure*) material komposit juga penting dan cukup kompleks, termasuk kegagalan akibat interaksi berbagai kegagalan di tingkat mikro—sebagai contoh, retak matriks, *interface separation*, *delamination*, *fiber rupture*, dan sebagainya, yang menyebabkan jenis-jenis kegagalan yang berbeda. Untuk model matematika, upaya menyeluruh analisis mikro kegagalan (*failure*) menjadi permasalahan yang sulit untuk diatasi. Teori kegagalan (*failure*) adalah fungsi matematika dari tekanan (*stress*) dan kekuatan (*strength*). Fungsi ini cenderung menampilkan kegagalan material di bawah beban kompleks yang ditafsirkan secara geometrik, seperti kegagalan pada permukaan pembungkus (*envelope failure*).

Teori kekuatan untuk material *isotropic* dan *anisotropic* dikembangkan pada awal tahun 1920 (Hildebrand, Reissner, & Thomas, 1949) dan sekarang terdapat lebih dari empat puluh kriteria kegagalan dalam berbagai literatur. Kendati demikian, mereka dapat dibagi ke dalam dua kategori, yaitu kriteria non-interaktif seperti tekanan maksimum (*maximum stress*) atau tegangan maksimum (*maximum strain*), dan kriteria interaktif seperti variasi taksiran kuadrat. Kriteria non-interaksi umumnya digunakan untuk material *brittle* dan material *ductile* dengan menggunakan *yielding* kriteria interaktif. Kriteria kegagalan yang sangat umum digunakan untuk memprediksi kekuatan material komposit dengan penguatan fiber (*fiber reinforced composite*) adalah salah satu dari teori-teori sebagai berikut: tekanan maksimum (*maximum stress*), tegangan maksimum (*maximum strain*), atau *quadratic polynomial*—seperti Tsai-Wu (dalam Kant & Manjunatha, 1988), Hoffman (dalam Hildebrand, Reissner, & Thomas, 1949), Hill (dalam Kant, 1982) dan Chamis (dalam Kant & Manjunatha, 1988). Akan tetapi, teori *quadratic polynomial* diturunkan dari bentuk kriteria kegagalan *tensor polynomial*. Kriterianya dapat digunakan untuk memprediksi munculnya kegagalan, tetapi tidak menggambarkan bentuk kegagalannya.

a. Teori Tekanan Maksimum (*Maximum Stress*)

Postulat untuk kriteria kegagalan tekanan maksimum menyatakan bahwa kegagalan akan terjadi bila satu (atau semua) tekanan dalam hubungan arah yang simetri dengan material melebihi kekuatan yang diizinkan. Nilai kekuatan dalam arah material pokok ditentukan dengan eksperimen di bawah beban *uniaxial* dan aksi tekanan dalam material simetri sebelum menggunakan kriteria ini. Menurut kriteria kegagalan ini, kegagalan tidak akan terjadi sepanjang kondisi dalam persamaan (1) atau (2) dipenuhi.

Untuk *tensile stress*,

$$\begin{aligned} \sigma_{-1} &\leq X_{-1} \\ \sigma_{-2} &\leq Y_{-1} \\ |\sigma_{-12}| &\leq \hat{S} \end{aligned} \quad (1)$$

dan untuk *compressive stress* ($\sigma \leq 0$)

$$\begin{aligned} \sigma_{-1} &\leq X_{-1} \\ \sigma_{-2} &\leq Y_{-c} \end{aligned} \quad (2)$$

di mana σ_{-1} , σ_{-2} dan σ_{-12} adalah tekanan dalam arah simetri material dan X_{-1} , Y_{-1} , X_{-c} , Y_{-c} , dan \hat{S} adalah *uniaxial tensile*, *compressive normal*, dan *shear strength* respective.

b. Teori Tegangan Maksimum (*Maximum Strain*)

Dalam kriteria kegagalan tegangan maksimum, kegagalan diprediksi terjadi ketika nilai kritis lamina tercapai pada tegangan longitudinal, *transverse*, atau *shear*. Komponen tegangan semestinya merujuk pada sumbu dasar material, sementara batas nilai tegangan ditentukan dengan eksperimen dari uji *tensile*, *compression*, dan *torsion uniaxial* sederhana. Material tersebut dikatakan gagal apabila satu atau lebih persamaan berikut terpenuhi.

Untuk *tensile strain*

$$\begin{aligned} \epsilon_{-1} &\leq X_{\epsilon t} \\ \epsilon_{-2} &\leq Y_{\epsilon t} \\ |\epsilon_{-12}| &\leq S_{\epsilon e} \end{aligned} \quad (3)$$

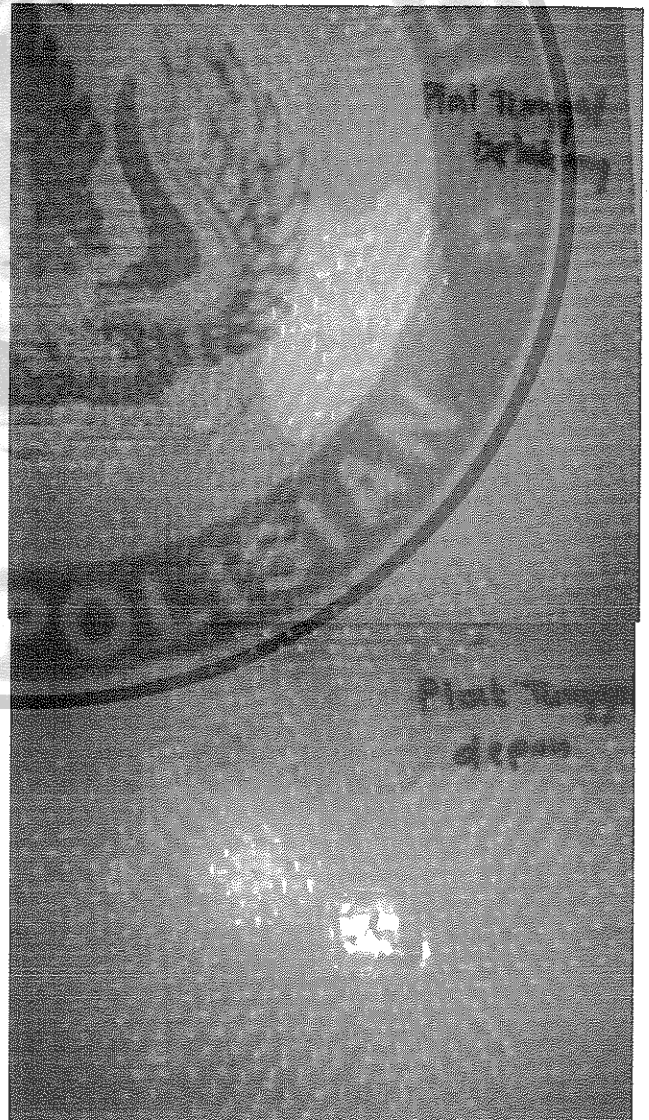
dan untuk *compressive strain*, ($\epsilon \leq 0$)

$$\begin{aligned} \epsilon_{-1} &\leq X_{\epsilon c} \\ \epsilon_{-2} &\leq Y_{\epsilon c} \end{aligned} \quad (4)$$

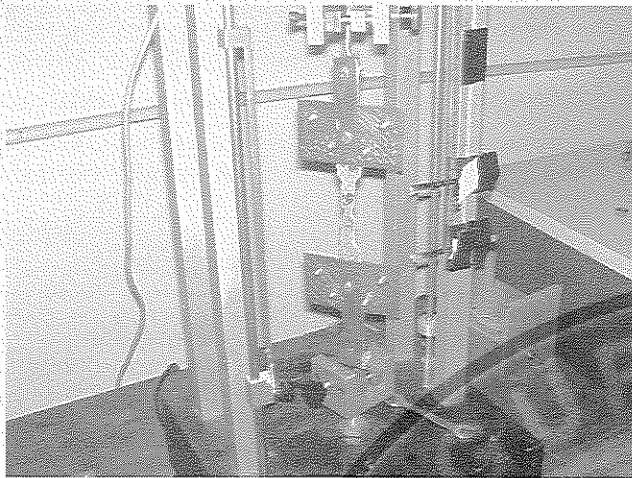
Di mana ϵ_{-1} , ϵ_{-2} dan ϵ_{-12} adalah

tegangan normal dan *shear* dan $X_{\epsilon t}$ dan $X_{\epsilon c}$ adalah *tensile* maksimum dan *strain compressive* normal dalam respektif 1 arah. Selanjutnya, $Y_{\epsilon t}$ dan $Y_{\epsilon c}$ adalah *tensile* maksimum dan *strain compressive* normal dalam respektif 2 arah dan S_{ϵ} adalah *shear strain* maksimum dalam 1–2 bidang.

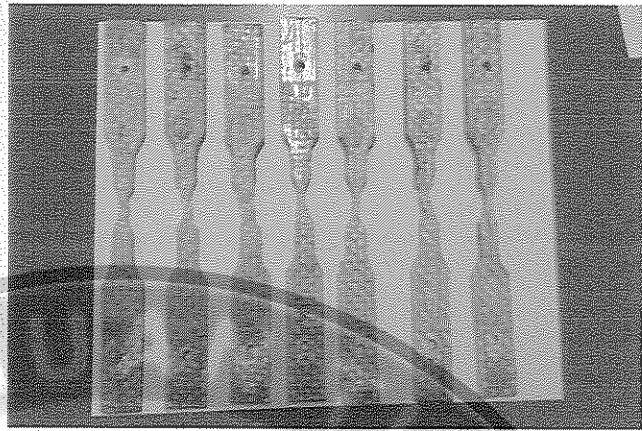
Perlu diperhatikan bahwa kriteria tegangan maksimum dapat diturunkan dari teori tekanan maksimum dengan menggunakan persamaan (1) dan (2). Tekanan dibagi oleh pendekatan konstanta elastik. Tetapi, dua kriteria ini tidak sama. Keduanya hanya identik ketika rasio Poisson pada material *unidirectional* adalah nol (Kant & Swaminathan, 2001).



Gambar 1. Uji balistik terhadap spesimen panel tunggal yang tembus (tampak belakang dengan diameter terang lebih besar dibandingkan dengan tampak depan).



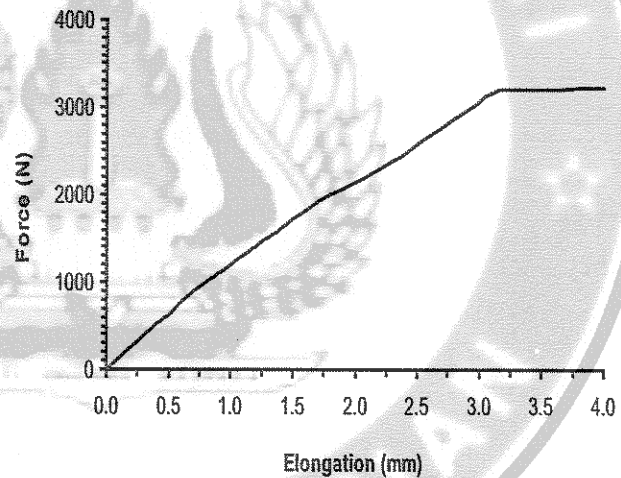
Gambar 2. Alat uji yang digunakan untuk pengujian tarik (*tensile*)



Gambar 4. Spesimen yang digunakan dalam pengujian *tensile* pada panel ganda setelah mengalami dampak proyektil balistik senjata FN pada jarak 5 m.



Gambar 3. Alat uji yang digunakan untuk pengujian tekuk (*bending*)



Gambar 5. Hasil uji *tensile* terhadap panel ganda komposit *fiberglass*/poliester dengan kemampuan *elongation* maksimal 4 mm terhadap beban 3.000 Newton.

Tabel 1. Hasil uji tekuk (*bending*)

Kode Sampel	Span mm	Lebar mm	Tebal mm	Gaya Lb	Gaya N	Bending MPa
1	75	39.45	5.0	230	1021.06	116.47
2	75	38.30	5.1	150	665.91	75.20
3	75	38.30	5.1	220	976.67	110.30
4	75	38.80	5.2	220	976.67	104.73
5	75	37.45	5.1	240	1065.46	123.05

KESIMPULAN

Hasil analisis uji balistik menunjukkan bahwa panel tunggal komposit *fiberglass* ternyata masih kurang dapat menahan atau menyerap energi proyektil. Adapun panel ganda/*multiplate* (hasil penggabungan dua buah panel tunggal) ternyata dapat menahan laju proyektil peluru. Terdapat mekanisme impak dalam panel ganda untuk menahan laju proyektil peluru. Dengan ketebalan dan jumlah lapis yang relatif sama, hasil pengujian ternyata menunjukkan bahwa kinerja panel cukup bagus menahan laju proyektil peluru. Analisis uji tekuk (*bending*) dan tarik (*tensile*) menunjukkan adanya pelemahan serat yang telah dicor dengan resin dibandingkan dengan serat yang berdiri sendiri.

DAFTAR PUSTAKA

1. Bose, P. & Reddy, J. N. (1998). "Analysis of Composite Plates Using Various Plate Theories. Part 1: Formulation and Analytical Solutions." *J. Structural Engineering and Mechanics* 6 (6): 583–612.
2. Bose, P. & Reddy, J. N. (1998). "Analysis of Composite Plates Using Various Plate Theories. Part 2: Finite Element Model and Numerical Results." *J. Structural Engineering and Mechanics* 6 (7): 727–746.
3. Hildebrand, F. B., Reissner, E., Thomas, G. B. (1949). "Note on the Foundations of the Theory of Small Displacements of Orthotropic Shells." NACA TN-1833.
4. Kant, T. (1982). "Numerical Analysis of Thick Plates. *Comput Methods.*" *Appl. Mech. Eng.* 31: 1–18.
5. Kant, T. & Manjunatha, B. S. (1988). "An Unsymmetric FRC Laminate C_ Finite Element Model with Twelve Degrees of Freedom per Node." *Eng. Comput.* 5 (3): 300–308.
6. Kant, T. & Swaminathan, K. (2001). "Analytical Solutions for Free Vibration of Laminated Composite and Sandwich Plates Based on A Higher Order Refined Theory." *Compos. Struct.* 53 (1): 73–85.
7. Jones, R. M. (1975). *Mechanics of Composites Materials, International Student Edition.* New York: McGraw-Hill.
8. Pagano, N. J. (1974). "The Role of Effective Moduli in the Elastic Analysis of Composite Materials," in L. J. Broutman & R. H. Krock (eds.), *Composite Material*, Vol. 2. Academic Press, pp. 1–22.
9. Christensen, R. M. (1979). *Mechanics of Composite Material.* Wiley Interscience.
10. Garg, S. K., Svalbonas, V., & Gurtman, G. A. (1973). *Analysis of Structural Composite Materials.* New York: Marcel Dekker Incorporated.
11. Schapery, R. A. (1974). "Viscoelastic Behavior and Analysis of Composite Materials," in L. J. Broutman & R. H. Krock (eds.), *Composite Material*, Vol. 2. Academic Press, pp. 86–165.
12. Owen, M. J. (1974). "Fatigue of Carbon-Fiber-Reinforced Plastics," in L. J. Broutman & R. H. Krock (eds.), *Composite Material*, Vol. 5. Academic Press.
13. Rowlands, R. E. (1985). "Strength (Failure) Theories and Their Experimental Correlation," in G. C. Sih and A. M. Skudra (eds.), *Handbook of Composites*, Vol. 3. Elsevier Science Publishers, pp. 71–125.
14. Tsai, S. W. (1984). "A Survey of Macroscopic Failure Criteria for Composite Materials," *Journal of Reinforced Plastic and Composites* 3: 40–62.
15. Tsai, S. W. & Wu, E. M. (1971). A General Theory of Strength for Anisotropic Materials," *Journal of Reinforced Plastic and Composites* 5: 58–80.

