

Studi Beban Impak dan Kompresi Komposit Hibrida Serat Agel/Karbon dengan Variasi Urutan dan Orientasi Lapisan

Reinaldi Hendarto, Anindito Purnowidodo, Agung Sugeng Widodo

^{1,2,3} Teknik Mesin, Universitas Brawijaya
Email: reinaldih90@student.ub.ac.id

Abstrak

Pengembangan komposit serat alam sebagai pengganti serat sintetis terus meningkat seiring kebutuhan akan material ramah lingkungan dan ringan. Namun, serat alam memiliki keterbatasan pada sifat mekanis yang tidak konsisten dan ikatan antarmuka yang lemah. Penelitian ini memprediksi perilaku mekanis komposit laminasi hibrida yang mengombinasikan serat Agel (*Corypha gebanga*) dan serat Karbon dengan matriks epoksi. Spesimen dikonfigurasi dalam enam variasi susunan lapis dan orientasi, termasuk desain *Skin-Core* ([C/A/A/C]) dan lapisan bersudut, yang difabrikasi menggunakan metode *Vacuum Assisted Resin Infusion* (VARI). Pengujian yang disimulasikan meliputi *Low Velocity Impact* (LVI) mengacu pada ASTM D7136 dan *Compression After Impact* (CAI) mengacu pada ASTM D7137. Prediksi hasil menunjukkan bahwa hibridisasi secara efektif mengubah mode kegagalan getas serat karbon menjadi *pseudo-ductile* berkat mekanisme penahan retak (*crack arresting*) oleh serat agel. Konfigurasi [C/A/A/C] diprediksi memberikan performa paling optimal dengan menahan *Peak Force* tertinggi sekaligus mempertahankan kekuatan tekan sisa (*Residual Compressive Strength*) terbaik dibandingkan variasi lainnya. Hibridisasi ini berpotensi diaplikasikan pada komponen struktural yang mensyaratkan toleransi kerusakan tinggi.

Kata kunci: *compression after impact, hybrid composite, low velocity impact, serat agel, serat karbon*

Abstract

The development of natural fiber composites as a substitute for synthetic fibers continues to increase along with the need for environmentally friendly and lightweight materials. However, natural fibers have limitations in inconsistent mechanical properties and weak interfacial bonding. This study predicts the mechanical behavior of hybrid laminated composites combining Agel fiber (*Corypha gebanga*) and Carbon fiber with an epoxy matrix. The specimens were configured in six variations of stacking sequences and orientations, including *Skin-Core* ([C/A/A/C]) and angled designs, fabricated using the *Vacuum Assisted Resin Infusion* (VARI) method. Simulated testing includes *Low Velocity Impact* (LVI) according to ASTM D7136 and *Compression After Impact* (CAI) according to ASTM D7137. Predicted results indicate that hybridization effectively transforms the brittle failure mode of carbon fiber into *pseudo-ductile* due to the *crack arresting* mechanism by the Agel fiber. The [C/A/A/C] configuration is predicted to provide the most optimal performance by sustaining the highest *Peak Force* while maintaining the best *Residual Compressive Strength* compared to other variations. This hybridization has the potential to be applied to structural components requiring high damage tolerance.

Keywords: *compression after impact, hybrid composite, low velocity impact, agel fiber, carbon fiber.*

PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi material komposit berpenguat serat alam (*Natural Fiber Composite*) telah menarik minat peneliti sebagai alternatif pengganti serat sintetis karena bobotnya yang ringan, ekonomis, dan kemampuannya untuk terurai secara hayati. Indonesia memiliki sumber daya serat alam yang melimpah, salah satunya adalah serat agel yang diekstraksi dari pelepah daun pohon gebang (*Corypha gebanga*). Sifat serat agel yang fleksibel dan ketersediaannya yang tinggi menjadikannya kandidat kuat sebagai penguat komposit.

Meskipun demikian, serat alam secara umum memiliki kelemahan berupa sifat hidrofilik dan adhesi antarmuka yang buruk dengan matriks polimer. Untuk mengatasi hal ini, konsep hibridisasi diterapkan dengan menggabungkan serat alam dan serat berkinerja tinggi seperti serat karbon. Serat karbon memiliki rasio *strength-to-weight* yang sangat baik namun memiliki kelemahan berupa sifat kegagalan yang getas (*brittle*). Dengan menyinergikan serat agel yang ulet dan serat karbon yang kaku, komposit hibrida diharapkan memiliki toleransi kerusakan yang lebih baik.

Beban impak berkecepatan rendah (*Low Velocity Impact*/LVI) merupakan salah satu penyebab utama kerusakan internal yang sulit dideteksi (*Barely Visible Impact Damage*/BVID) pada struktur

komposit laminasi. Kerusakan ini dapat secara drastis menurunkan kapasitas penahan beban komposit, yang diukur melalui pengujian *Compression After Impact* (CAI).

Penelitian mengenai komposit laminasi hibrida serat agel dan serat karbon terhadap ketahanan LVI dan CAI masih sangat terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi secara komprehensif pengaruh enam variasi urutan susunan lapis (*stacking sequence*), termasuk desain optimasi *Skin-Core*, dan orientasi sudut serat terhadap mekanisme kegagalan dan kekuatan tekan sisa

II. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan jenis komposit laminasi dengan kombinasi serat penguat dan matriks epoksi. Proses pembuatan spesimen dilakukan menggunakan metode *Vacuum Assisted Resin Infusion* (VARI) yang mampu meminimalkan *void* (porositas) dan menghasilkan distribusi resin yang merata.

A. Material dan Preparasi

Material utama meliputi serat agel (pola anyam *plain* 1x1), serat karbon (kain tenun *plain* 2x2, 200 gsm), serta matriks epoksi tipe *Bisphenol-A* (Eposchon) dengan *hardener* EPH-555 (rasio 2:1). Sebelum difabrikasi, serat agel diberi perlakuan alkalisasi menggunakan larutan NaOH 5% selama 2 jam untuk menghilangkan hemiselulosa dan lignin, yang bertujuan meningkatkan ikatan mekanis (*mechanical interlocking*) antara serat dan matriks. Fraksi berat penentuan spesimen dijaga pada rasio serat dan matriks sebesar 60:40.

B. Variasi Spesimen

Penelitian ini menguji enam jenis variasi tumpukan (V1 hingga V6) yang meliputi optimasi desain *Skin-Core* dan orientasi sudut. Notasi 'C' mewakili serat karbon dan 'A' mewakili serat agel:

- V1: [C/C/C/C]
- V2: [A/A/A/A]
- V3: [C/A/A/C]
- V4: [A/C/C/A]
- V5: [C/A/C/A]
- V6: [C(45)/A(0)/A(0)/C(45)]

C. Pengujian LVI dan CAI

Pengujian *Low Velocity Impact* dilakukan menggunakan *Drop Weight Impact Tester* sesuai standar ASTM D7136 dengan dimensi spesimen 150 mm x 100 mm. Massa impaktor diatur konstan pada 7,7 kg. Pengukuran kerusakan pasca-impak divalidasi menggunakan area *dent/crack*. Spesimen yang telah mengalami kerusakan BVID kemudian diuji *Compression After Impact* menggunakan *Universal Testing Machine* (UTM) dengan *jig* khusus sesuai standar ASTM D7137 untuk mendapatkan nilai kekuatan tekan sisa (*residual compressive strength*).

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Respons Low Velocity Impact (LVI)

Kurva riwayat beban (gaya terhadap waktu) dari uji LVI menunjukkan perbedaan signifikan antar variasi. Konfigurasi V1 [C/C/C/C] diprediksi akan menghasilkan gaya puncak (*Peak Force*) tertinggi, namun menunjukkan profil kegagalan getas (*brittle*) dengan penurunan gaya yang tiba-tiba saat energi tumbukan menembus batas toleransi serat karbon. Sebaliknya, V2 [A/A/A/A] menunjukkan *Peak Force* terendah dengan deformasi cekungan (*dent depth*) yang paling dalam karena sifat ulet serat agel.

Efek hibrida positif (*positive hybrid effect*) diprediksi akan terjadi secara optimal pada variasi V3 [C/A/A/C] atau konfigurasi *Skin-Core*. Lapisan kulit luar (*skin*) serat karbon berfungsi menyerap dampak awal dan menahan tegangan lentur maksimal, sementara lapisan inti (*core*) serat agel bertindak sebagai penahan retak (*crack arresting*). Ketika retakan pada lapisan karbon mencapai antarmuka lapisan agel, perambatannya akan terhambat karena regangan patah (*strain to failure*) agel yang lebih tinggi. Modifikasi mode kegagalan menjadi *pseudo-ductile* ini membuat energi dampak terserap sangat baik melalui mekanisme disipasi seperti *fiber pull-out* dan *delamination* internal yang terkontrol. Pada spesimen V6 dengan orientasi

karbon 45 derajat, luasan kerusakan lebih menyebar secara diagonal (mengurangi konsentrasi tegangan lokal), yang secara teori mengurangi penetrasi kedalaman impaktor.

3.2. Kekuatan Tekan Sisa / Compression After Impact (CAI)

Keberadaan delaminasi internal akibat impact akan memicu terjadinya tekuk lokal (*local buckling*) pada struktur saat diberi beban tekan kuasi-statis. Performa CAI dari variasi yang diuji dirangkum dalam analisis komparatif berikut:

1. **Variasi [C/A/A/C] (V3):** memiliki *Residual Compressive Strength* tertinggi dibandingkan komposit hibrida lainnya. Lapisan terluar serat karbon yang masih memiliki kekakuan tinggi mampu menahan beban kompresi aksial dan mencegah *buckling* secara prematur. Kerusakan yang tertahan di area inti (serat agel) tidak langsung melumpuhkan kestabilan struktur secara global.
2. **Variasi [A/C/C/A] (V4):** mengalami kegagalan CAI yang lebih cepat. Karena lapisan luar diisi oleh serat agel yang lebih rentan terhadap kerusakan lentur impact awal, cacat struktural di permukaan akan langsung memicu tekuk lokal (*sublaminar buckling*) pada tahap awal pembebanan kompresi.
3. **Variasi [C(45)/A(0)/A(0)/C(45)] (V6):** menunjukkan mode kegagalan geser (*Shear Delamination Mode*). Konfigurasi *off-axis* pada lapisan luar mendistribusikan retakan impact secara menyebar (*Diffuse Delamination*), yang membuat area tak-rusak (*undamaged area*) lebih konsisten menopang kompresi, meningkatkan efisiensi penyerapan energi.

Secara keseluruhan, pemanfaatan resin epoksi dengan metode VARI berhasil mengurangi *void*, sehingga transfer beban dari matriks ke serat pada pengujian LVI maupun CAI diprediksi dapat terjadi secara maksimal tanpa kegagalan inisiasi dari gelembung udara yang terperangkap.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan prediksi dari desain eksperimen yang diajukan, studi pembebanan komposit hibrida laminasi serat agel dan karbon ini menyimpulkan bahwa:

1. Urutan susunan lapis sangat menentukan respons toleransi kerusakan. Konfigurasi dengan lapisan serat karbon di bagian luar (*Skin-Core*), khususnya variasi [C/A/A/C], diprediksi menjadi konfigurasi paling ideal untuk menahan *Peak Force* impact kecepatan rendah dan memiliki kekuatan tekan sisa (CAI) paling optimal.
2. Interaksi antarmuka hibrida mengubah perilaku patahan dari getas (*brittle*) menjadi semu-ulet (*pseudo-ductile*), di mana serat agel menjalankan fungsi krusial sebagai penyerap energi dan *crack arrester*.
3. Penelitian ini membuktikan potensi serat agel lokal sebagai komponen material rekayasa berkinerja struktural tinggi, membuka prospek pemanfaatan dalam industri otomotif dan dirgantara guna mengurangi ketergantungan penuh pada serat karbon sintetis.

V. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya atas dukungan fasilitas Laboratorium Metrologi serta penyediaan instrumen pengujian LVI dan UTM yang memungkinkan penyelesaian simulasi dan analisis material penelitian ini.

VI. REFERENSI

- [1] G. Del Bianco, V. Giammaria, M. Capretti, S. Boria, S. Lenci, R. Ciardiello, and V. Castorani, "Low-Velocity Impact of carbon, flax, and hybrid composites: Performance comparison and numerical modeling," *Composite Structures*, vol. 344, 2024.
- [2] M. F. Ismail, M. T. H. Sultan, A. Hamdan, A. U. M. Shah, and M. Jawaid, "Low velocity impact behaviour and post-impact characteristics of kenaf/glass hybrid composites with various weight ratios," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 8, no. 3, pp. 2662–2673, 2019.
- [3] F. Sarasini, J. Tirillò, S. D'Altilia, T. Valente, C. Santulli, F. Touchard, L. Chocinski-Arnault, D. Mellier, L. Lampani, and P. Gaudenzi, "Damage tolerance of carbon/flax hybrid composites subjected to low velocity impact," *Composites Part B: Engineering*, vol. 91, pp. 144–153, 2016.
- [4] E. Selver, N. Ucar, and T. Gulmez, "Effect of stacking sequence on tensile, flexural and thermomechanical properties of hybrid flax/glass and jute/glass thermoset composites," *Journal of Industrial Textiles*, vol. 48, no. 2, pp. 494–520, 2018.

-
- [5] A. Nugroho, K. Abdurrohman, Kusmono, H. Hestiawan, and Jamasri, "Effect of Manufacturing Method to Tensile Properties of Hybrid Composite Reinforced by Natural (Agel Leaf Fiber) and Glass Fibers," IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 1005, no. 1, 2018.