Pengembangan Panel Komposit Tahan Impak dengan Ketangguhan Retak Unggul melalui 3D Printing Komposit Serat Kontinu

Riset Unggulan ITB 2026

Ditho Ardiansyah Pulungan, Satrio Wicaksono, Riza Wirawan, Muhammad Raihan Firdaus, Endrian Putra Hendrawan, Muhammad Gibran Fahrezzi, Andi Almirah Azaria, Gading Wulung Wiradjanu, Moh Naufal Yahya

Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara

Latar Belakang Penelitian

Panel komposit tahan impak perlu menyerap energi tumbukan sekaligus membatasi perambatan retak antarlapis. Pencetakan 3D dengan serat kontinu memungkinkan pengaturan susunan serat, sedangkan kompresi panas dapat mengubah konsolidasi dan kondisi antarlapis. Penelitian ini mengkaji pengaruh pascaproses terhadap delaminasi dan respons impak pada kupon. Simulasi elemen hingga dan pembelajaran mendalam digunakan untuk mempelajari respons mekanik dan mempercepat evaluasi variasi struktur komposit.

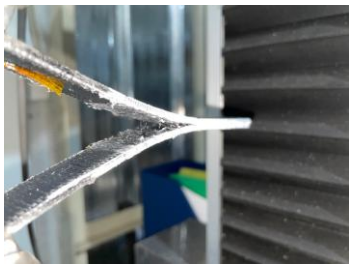
Kata kunci: komposit serat kontinu, pencetakan 3D, delaminasi Mode I, impak Charpy, pembelajaran mendalam

Tujuan Penelitian

Membangun dasar eksperimen dan komputasi untuk merancang panel komposit tahan impak berpenguat serat kontinu hasil pencetakan 3D. Penelitian mencakup karakterisasi sifat tarik, delaminasi Mode I, dan respons impak Charpy, serta pengembangan model elemen hingga untuk impak dan model pembelajaran mendalam untuk memprediksi sifat elastik efektif dan medan tegangan lokal.

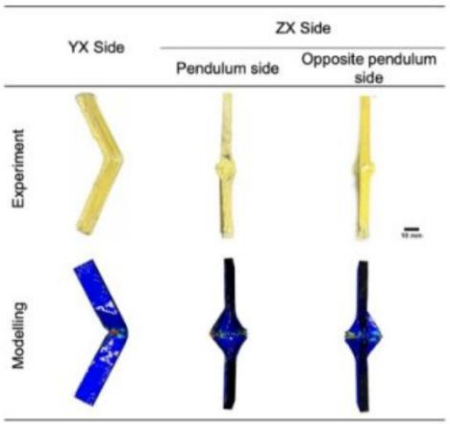
Metode & Pelaksanaan Kegiatan

Karakterisasi mekanik dan delaminasi Mode I. Karakterisasi mencakup uji tarik dan uji double cantilever beam (DCB). Uji DCB dilakukan pada laminat karbon kontinu $[0]_{32}$ dan $[0_{16}/90_4]_s$ yang dicetak dengan Markforged Mark Two. Spesimen kondisi awal dibandingkan dengan spesimen yang dikompresi pada 145 °C dan 2,5 MPa selama 30 menit. Laju pelepasan energi selama perambatan retak dihitung dengan metode *compliance calibration* dari data gaya, perpindahan, dan panjang retak. Fraksi rongga dan densitas laminat $[0]_{32}$ digunakan untuk menilai konsolidasi.



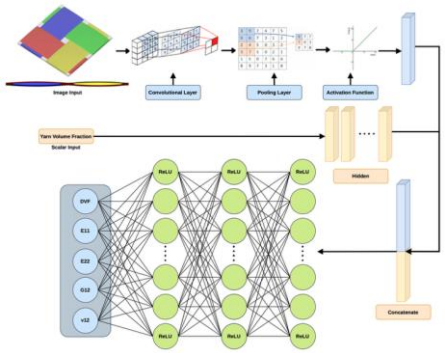
Gambar 1. Pengujian DCB spesimen komposit serat kontinu

Uji impak Charpy dan pemodelan FEM. Pengujian mencakup kupon karbon, Kevlar, dan hibrida karbon–Kevlar, dengan lima spesimen per kondisi. Kupon karbon dan Kevlar diuji sebelum dan sesudah kompresi panas. Kupon hibrida menjalani penyatuan termal. Model Charpy dibangun di Abaqus/Explicit dengan kriteria Hashin untuk kerusakan dalam lapisan dan model zona kohesif untuk delaminasi. Model dikalibrasi terhadap hasil uji dan dievaluasi melalui perbandingan energi impak dan deformasi pascaimpak.



Gambar 2. Uji impak Charpy dan pemodelan FEM

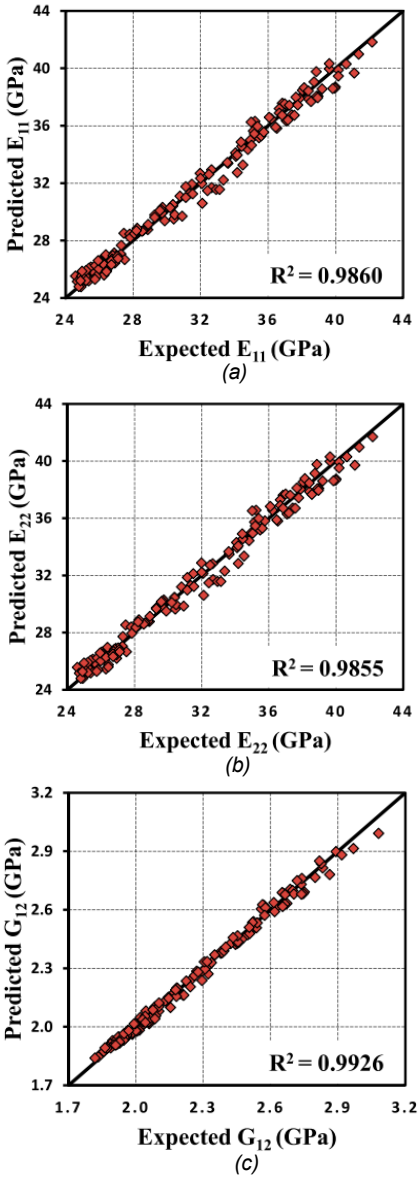
Pemodelan berbasis pembelajaran mendalam. Pada skala meso, model CNN–MLP menggunakan citra penampang dan data dari 999 elemen volume representatif (RVE) komposit tenun karbon/PPS untuk memprediksi sifat elastik efektif. Pada skala mikro, U-Net dua tahap menggunakan data simulasi untuk memprediksi medan tegangan von Mises pada komposit searah di bawah pembebanan transversal elastik.



Gambar 2. Arsitektur model prediktif yang dikembangkan

Hasil Penelitian

- **Delaminasi Mode I**. Kompresi panas menurunkan fraksi rongga rata-rata laminat karbon $[0]_{32}$ dari 11,82% menjadi 2,64%. Pada konfigurasi yang diuji, spesimen terkompresi menunjukkan resistansi perambatan retak yang lebih rendah, seiring perubahan mekanisme serat yang menjembatani retak (*fiber bridging*).
- **Impak Charpy**. Setelah kompresi, energi impak per satuan luas meningkat dari 158,1 menjadi 192,3 kJ/m^2 pada kupon karbon dan dari 277,9 menjadi 338,1 kJ/m^2 pada kupon Kevlar. Kupon hibrida mencapai 232,3 kJ/m^2 setelah penyatuan termal. Selisih absolut model FEM terkalibrasi terhadap rata-rata eksperimen berkisar 4,1–10,3%.
- **Prediksi berbasis AI**. Model CNN–MLP mencapai R^2 0,9810–0,9926 terhadap hasil FEM pada 150 RVE pengujian. Model U-Net memprediksi medan tegangan lokal dalam kurang dari satu detik per sampel.



Gambar 3. Korelasi antara prediksi CNN dan hasil FEM untuk pengujian terhadap 150 set sampel:(a) E_{11}, (b)E_{22}, and (c)G_{12}

Luaran & Keberlanjutan Progam

Artikel tentang prediksi sifat komposit tenun termoplastik dari citra struktur meso telah terbit di jurnal internasional Next Materials (2026), DOI 10.1016/j.nxmate.2026.102967. Artikel tentang prediksi distribusi tegangan skala mikro diterima di jurnal internasional Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L.

Hasil DCB dan Charpy menunjukkan bahwa pemilihan pascaproses perlu mempertimbangkan resistansi delaminasi dan energi impak secara bersamaan. Tahap lanjutan mencakup kalibrasi model FEM delaminasi Mode I, integrasi parameter delaminasi ke model impak, dan pengembangan AI untuk memprediksi respons impak. Model tersebut akan digunakan untuk mengusulkan susunan lapisan dan kondisi pascaproses. Kandidat terpilih kemudian akan dibuat dan diuji terhadap panel acuan.