ANALISIS KEKUATAN TARIK DAN IMPAK KOMPOSIT SERAT KARBON-CANGKANG TELUR UNTUK PANEL ANTI PELURU

Kusetyono Lamiran Sodiwiryo
Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya
Email: 24050754223@mhs.unesa.ac.id

Mochamad Arif Irfa'i
Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya
Email: arifirfai@unesa.ac.id

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh susunan lapisan penguat terhadap kekuatan tarik dan kekuatan impak komposit bermatriks epoksi yang diperkuat serat karbon dan serbuk cangkang telur untuk kandidat lapisan tambahan panel anti peluru. Penelitian menggunakan metode kuantitatif eksperimental. Spesimen dibuat dengan metode vacuum infusion dan ketebalan nominal 4 mm, dengan empat variasi susunan tiga lapisan penguat. Variasi I terdiri atas serat karbon–serbuk cangkang telur–serat karbon; Variasi II terdiri atas serbuk cangkang telur–serat karbon–serbuk cangkang telur; Variasi III menggunakan tiga lapisan serbuk cangkang telur; sedangkan Variasi IV menggunakan tiga lapisan serat karbon. Komposisi matriks resin dan hardener sebesar 70%, sementara total penguat sebesar 30%. Pengujian tarik dilakukan untuk memperoleh tegangan tarik, spesimen mengikuti standar ASTM D3039 sedangkan pengujian impak menggunakan metode Charpy untuk mengetahui energi serap dan kekuatan impak, spesimen mengikuti standar ASTM D5942-96 Hasil menunjukkan bahwa Variasi IV menghasilkan tegangan tarik rata-rata tertinggi sebesar 124,47 MPa, diikuti Variasi I sebesar 112,72 MPa, Variasi II sebesar 51,39 MPa, dan Variasi III sebesar 16,64 MPa. Pada pengujian impak, Variasi III menghasilkan energi serap rata-rata tertinggi sebesar 6,71 J dengan kekuatan impak 0,15951 J/mm² dan Variasi I menghasilkan energi serap rata-rata tertinggi sebesar 2,82 J dengan kekuatan impak 0,07250 J/mm². Hasil ini menunjukkan bahwa serat karbon lebih efektif meningkatkan kekuatan tarik, sedangkan susunan serbuk cangkang telur menunjukkan penyerapan energi impak tertinggi pada kondisi pengujian.

Kata kunci: komposit, serat karbon, serbuk cangkang telur, vacuum infusion, kekuatan tarik, kekuatan impak

ABSTRACT

This study aims to analyze the effect of reinforcement layer arrangement on the tensile strength and impact strength of an epoxy-matrix composite reinforced with carbon fiber and eggshell powder as a candidate for an additional layer in bullet-resistant panels. The study employed a quantitative experimental method. The specimens were fabricated using the vacuum infusion *method with a nominal thickness of 4 mm and four variations of three-layer reinforcement arrangements. Variation I consisted of carbon fiber–eggshell powder–carbon fiber; Variation II consisted of eggshell powder–carbon fiber–eggshell powder; Variation III used three layers of eggshell powder; and Variation IV used three layers of carbon fiber. The resin and hardener matrix accounted for 70% of the composition, while the total reinforcement content was 30%. Tensile testing was conducted to determine tensile stress using specimens prepared in accordance with ASTM D3039, while impact testing was performed using the Charpy method to determine absorbed energy and impact strength, with specimens prepared in accordance with ASTM D5942-96. The results showed that Variation IV achieved the highest average tensile stress of 124.47 MPa, followed by Variation I at 112.72 MPa, Variation II at 51.39 MPa, and Variation III at 16.64 MPa. In the impact test, Variation III achieved the highest average absorbed energy of 6.71 J and an impact strength of 0.15951 J/mm², whereas Variation I exhibited an average absorbed energy of 2.82 J and an impact strength of 0.07250 J/mm². These findings indicate that carbon fiber is more effective in improving tensile strength, while the eggshell-powder reinforcement arrangement exhibited the highest impact energy absorption under the tested conditions.*

Keywords*: composite, carbon fiber, eggshell powder, vacuum infusion, tensile strength, impact strength*

PENDAHULUAN

Kebutuhan material pelindung yang ringan dan memiliki sifat mekanik memadai mendorong pengembangan komposit untuk sistem proteksi. Komposit memiliki kombinasi matriks dan penguat yang dapat dirancang sesuai kebutuhan, termasuk untuk struktur berlapis yang membantu mendistribusikan beban dan menyerap energi (Callister & Rethwisch, 2018; Hull & Clyne, 2019). Pada aplikasi panel anti peluru, komposit dalam penelitian ini diposisikan sebagai lapisan tambahan, bukan sebagai pengganti tunggal lapisan pelindung utama.

Serat karbon mempunyai rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi sehingga berpotensi meningkatkan kemampuan komposit menahan beban tarik. Namun, sifat komposit juga dipengaruhi oleh kualitas antarmuka, distribusi resin, dan mekanisme kerusakan. Dalam pembebanan dinamis, energi dapat terdisipasi melalui retak matriks, debonding antarmuka, delaminasi, dan pull-out penguat (Mallick, 2007; Naik & Shrirao, 2004).

Serbuk cangkang telur merupakan bahan pengisi berbasis limbah yang kaya kalsium karbonat. Pemanfaatannya berpotensi menambah nilai guna limbah, tetapi kontribusinya terhadap sifat mekanik perlu dinilai berdasarkan komposisi dan susunan lapisan. Penguat berbentuk partikel tidak selalu memberikan kemampuan menahan beban tarik setara serat kontinu, sedangkan mekanisme retak dan pelepasan partikel dapat berkontribusi pada penyerapan energi benturan.

Salah satu faktor penting dalam komposit lamina adalah urutan lapisan penguat. Perubahan posisi dan jenis penguat dapat memengaruhi transfer beban serta jalur perambatan kerusakan. Proses vacuum infusion dipilih untuk membantu resin meresap ke susunan penguat di dalam cetakan. Penelitian ini bertujuan mengetahui pengaruh empat variasi susunan serat karbon dan serbuk cangkang telur terhadap kekuatan tarik dan

impak, sebagai data awal pengembangan komposit untuk lapisan tambahan panel anti peluru.

METODE

Penelitian ini merupakan penelitian kuantitatif eksperimental. Fabrikasi dilakukan di Laboratorium Pengecoran, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya. Pengujian impak dilakukan di Laboratorium Mekanika Material, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Politeknik Negeri Malang. Matriks menggunakan resin epoksi Chempoxy Epoxy Clear Resin A dan hardener Firamine B. Fraksi komposisi yang digunakan adalah 70% resin dan hardener serta 30% penguat yang dibagi menjadi tiga lapisan, masing-masing 10%. Ketebalan nominal spesimen adalah 4 mm.

Empat konfigurasi penguat ditetapkan sebagaimana ditampilkan pada Tabel 1. Setiap variasi terdiri atas tiga spesimen untuk pengujian mekanik. Proses pembuatan meliputi persiapan dan penimbangan bahan, penyusunan lapisan penguat di dalam cetakan, pemasangan perangkat vacuum infusion, pengaliran resin melalui tekanan vakum, pengerasan, dan pemotongan spesimen sesuai kebutuhan pengujian.

Tabel 1. Variasi susunan lapisan penguat komposit

Variasi	Susunan tiga lapisan penguat	Komposisi total
I	Serat karbon – cangkang telur – serat karbon	70% matriks + 30% penguat
II	Cangkang telur – serat karbon – cangkang telur	70% matriks + 30% penguat
III	Cangkang telur – cangkang telur – cangkang telur	70% matriks + 30% penguat
IV	Serat karbon – serat karbon – serat karbon	70% matriks + 30% penguat

Pengujian tarik dilakukan menggunakan Universal Testing Machine. Tegangan tarik dihitung sebagai beban maksimum dibagi luas penampang awal, sedangkan regangan diperoleh dari pertambahan panjang dibagi panjang ukur awal. Pengujian impak dilakukan dengan metode Charpy mengacu pada ASTM D5942-96. Energi serap dihitung dari parameter pendulum dan sudut ayunan sebelum serta sesudah tumbukan, sedangkan kekuatan impak diperoleh dari energi serap dibagi luas penampang yang digunakan dalam perhitungan penelitian. Data dibandingkan berdasarkan nilai rata-rata setiap variasi. Pengamatan SEM pada permukaan patahan digunakan sebagai pendukung interpretasi mekanisme kegagalan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil uji tarik menunjukkan bahwa susunan lapisan penguat berhubungan dengan perbedaan tegangan tarik rata-rata. Variasi IV yang menggunakan tiga lapisan serat karbon memiliki nilai tertinggi, sedangkan Variasi III yang seluruh penguatnya berupa serbuk cangkang telur memiliki nilai terendah. Ringkasan hasil rata-rata ditampilkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Tegangan tarik rata-rata tiap variasi

Variasi	Susunan penguat	Tegangan tarik rata-rata (MPa)	Regangan rata-rata (%)
I	Karbon–cangkang–karbon	112,72	0,2545
II	Cangkang–karbon–cangkang	51,39	0,1878
III	Cangkang–cangkang–cangkang	16,64	0,1575
IV	Karbon–karbon–karbon	124,47	0,2646

Variasi IV menghasilkan tegangan tarik rata-rata 124,47 MPa, lebih tinggi dibanding Variasi I sebesar 112,72 MPa. Keduanya mengandung serat karbon, tetapi susunan dengan tiga lapisan serat karbon memberikan nilai tertinggi pada kondisi pengujian ini. Variasi II menghasilkan 51,39 MPa, sedangkan Variasi III hanya 16,64 MPa. Dengan demikian, nilai Variasi IV sekitar 7,48 kali nilai Variasi III. Hasil ini memperlihatkan bahwa serat karbon lebih efektif membawa beban tarik dibandingkan serbuk cangkang telur yang berperan sebagai pengisi partikulat.

Secara mekanis, serat karbon dapat menyalurkan beban sepanjang serat selama transfer tegangan antara matriks dan penguat berlangsung dengan baik. Sebaliknya, pada komposit dengan dominasi partikel cangkang telur, kemampuan menahan beban tarik bergantung pada ikatan partikel–matriks dan homogenitas sebaran partikel. Void, aglomerasi, atau ikatan antarmuka yang kurang baik dapat menjadi lokasi konsentrasi tegangan dan mempercepat awal retak. Penjelasan ini merupakan interpretasi mekanistik yang konsisten dengan perbedaan nilai tarik, bukan bukti bahwa setiap cacat tersebut terdapat pada semua spesimen.

Pengamatan SEM pada spesimen tarik Variasi IV dalam laporan memperlihatkan morfologi patahan yang melibatkan void, matrix cracking, interfacial debonding, dan fiber pull-out. Mekanisme tersebut menunjukkan bahwa meskipun tiga lapisan serat karbon menghasilkan kekuatan tarik tertinggi, kegagalan tetap dapat terjadi melalui retak matriks, pelepasan ikatan antarmuka, dan tercabutnya serat. Oleh karena itu, nilai tarik tidak hanya ditentukan oleh jumlah serat, tetapi juga kualitas pembasahan serat oleh resin dan ikatan antarmuka.

Pada pengujian impak, Variasi III menghasilkan energi serap rata-rata tertinggi sebesar 6,71 J dan kekuatan impak 0,15951 J/mm². Variasi IV mencapai 6,05 J dan 0,14723 J/mm², Variasi II mencapai 5,13 J dan 0,12073 J/mm², sedangkan Variasi I memiliki nilai terendah, yaitu 2,82 J dan 0,07250 J/mm². Ringkasan tersebut ditampilkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Energi serap dan kekuatan impak rata-rata

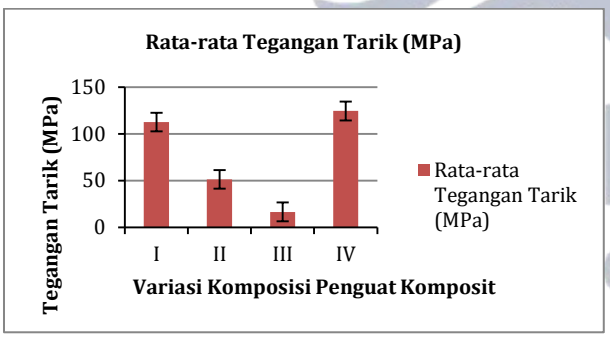
Variasi	Energi serap rata-rata (J)	Kekuatan impak rata-rata (J/mm²)
I	2,82	0,07250
II	5,13	0,12073
III	6,71	0,15951
IV	6,05	0,14723

Berbeda dengan hasil uji tarik, Variasi III memberikan kemampuan menahan beban tarik dan kemampuan menyerap energi benturan tidak selalu meningkat secara bersamaan. Pada kondisi pengujian ini, struktur yang didominasi serbuk cangkang telur mampu menyerap energi lebih besar sebelum patah dibandingkan variasi lainnya. Energi dapat digunakan untuk membentuk dan memperluas retakan, memisahkan antarmuka, serta menghasilkan permukaan patahan yang lebih kompleks. Namun, hasil ini tidak berarti Variasi III memiliki kekuatan tarik atau ketahanan balistik terbaik.

Variasi IV yang seluruhnya menggunakan serat karbon berada di posisi kedua pada pengujian impak. Nilainya lebih tinggi daripada Variasi I dan II, tetapi masih di bawah Variasi III. Hal ini memperlihatkan bahwa pengaruh serat karbon terhadap impak dipengaruhi oleh susunan lapisan dan mekanisme kerusakan aktual. Hasil uji impak laboratorium tidak dapat langsung disamakan dengan kemampuan menghentikan peluru, karena kinerja balistik juga dipengaruhi kecepatan proyektil, geometri proyektil, susunan panel, deformasi belakang, dan kondisi penumpu.

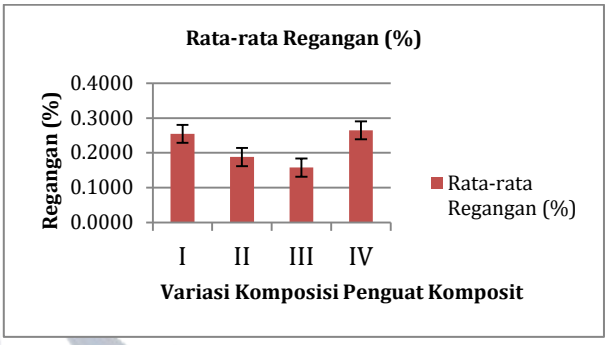
Secara keseluruhan, data memperlihatkan kompromi sifat mekanik: Variasi IV unggul dalam tegangan tarik, sedangkan Variasi III unggul dalam energi serap dan kekuatan impak. Variasi I menunjukkan kekuatan tarik yang relatif tinggi, tetapi energi serap paling rendah di antara keempat konfigurasi. Pemilihan konfigurasi untuk pengembangan lanjutan harus mempertimbangkan tujuan desain dan memerlukan pengujian tambahan, termasuk uji balistik langsung serta evaluasi konsistensi hasil dan cacat manufaktur.

Pengaruh Susunan Lapisan terhadap Transfer Beban



Gambar 1. Rata-rata Tegangan Tarik

Pada gambar 1 terlihat perbandingan Variasi I dan Variasi IV membantu memperlihatkan peran jumlah lapisan serat karbon. Variasi I menggunakan serat karbon pada lapisan luar dan serbuk cangkang telur di bagian tengah, sedangkan Variasi IV menggunakan serat karbon pada seluruh lapisan. Rata-rata tegangan tarik Variasi I sebesar 112,72 MPa mendekati Variasi IV sebesar 124,47 MPa. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa konfigurasi hybrid masih mampu menghasilkan kekuatan tarik relatif tinggi, meskipun nilai impak tertinggi. Hasil ini menunjukkan bahwa nilai tertinggi dalam penelitian ini diperoleh pada susunan serat karbon penuh. Secara konseptual, lapisan serat karbon dapat menerima dan meneruskan beban sepanjang arah serat, sementara matriks epoksi mengikat penguat dan membantu mendistribusikan tegangan di antara lapisan.



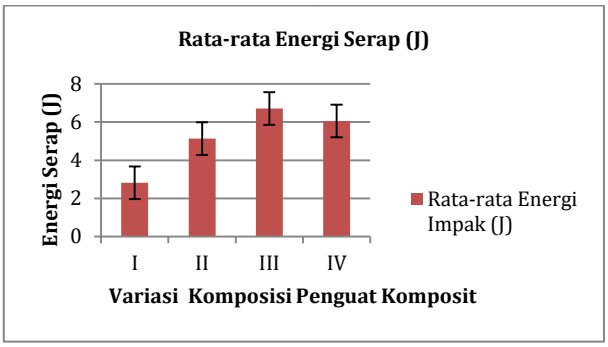
Gambar 2. Rata-rata Regangan

Sedangkan untuk rata-rata regangan dapat dilihat pada gambar 2 menunjukkan hasil Variasi I sebesar 0,2545% mendekati Variasi IV sebesar 0,2646%. Hal ini menunjukkan bahwa komposit dengan proporsi penggunaan serat karbon yang lebih tinggi memiliki sifat mekanik yang lebih baik dibandingkan dengan komposit yang hanya menggunakan serbuk cangkang telur sebagai penguat.

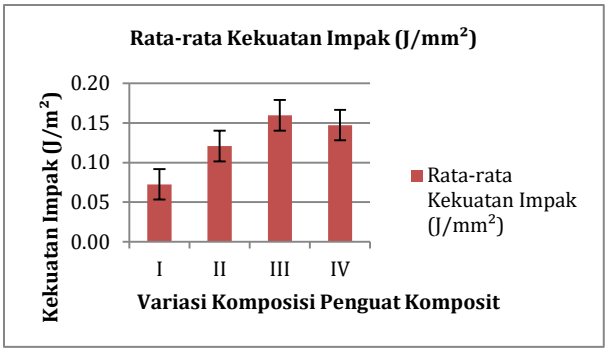
Perbandingan Variasi Hybrid

Variasi II memiliki susunan serbuk cangkang telur pada lapisan luar dan serat karbon pada lapisan tengah. Nilai tegangan tarik rata-ratanya sebesar 51,39 MPa, lebih rendah daripada Variasi I yang menempatkan serat karbon pada kedua lapisan luar. Hasil ini mengindikasikan bahwa posisi serat karbon dalam laminat mungkin berpengaruh terhadap respons tarik. Akan tetapi, penelitian ini membandingkan konfigurasi yang berbeda secara keseluruhan, sehingga efek posisi lapisan tidak dapat dipisahkan sepenuhnya dari perbedaan jenis penguat pada lapisan luar dan tengah. Untuk memastikan pengaruh posisi secara khusus, penelitian lanjutan perlu menggunakan konfigurasi yang dikontrol lebih ketat dan jumlah replikasi yang memadai.

Interpretasi Hasil Impak



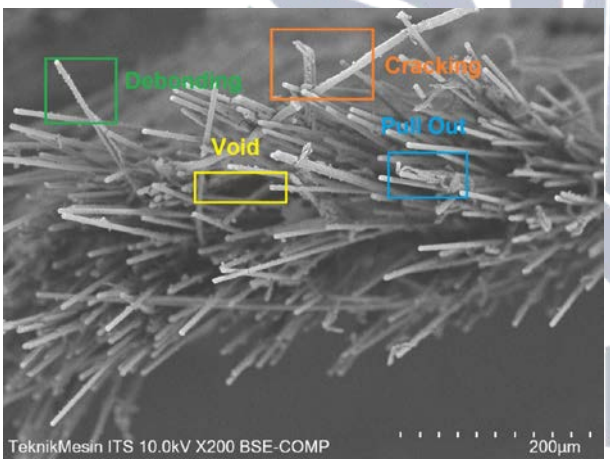
Gambar 3. Rata-rata Energi Serap



Gambar 4. Rata-rata Kekuatan Impak

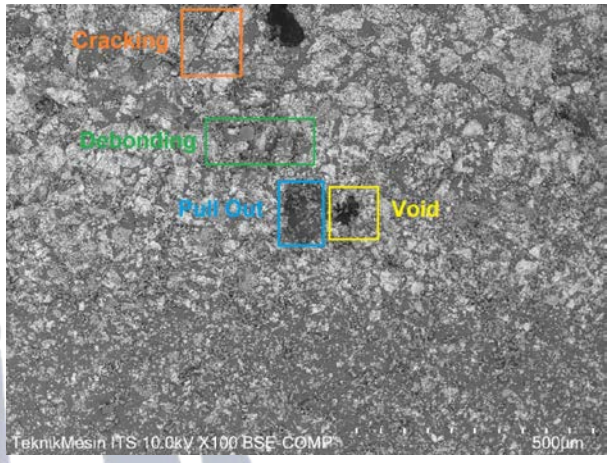
Nilai energi serap dan kekuatan impak pada penelitian ini ditunjukkan pada gambar 3 dan gambar 4 dengan urutan yang sama untuk keempat variasi karena kekuatan impak dihitung berdasarkan energi serap yang dibagi luas penampang yang digunakan. Variasi III menghasilkan energi serap 6,71 J dan kekuatan impak 0,15951 J/mm². Nilai ini diikuti Variasi IV sebesar 6,05 J dan 0,14723 J/mm², Variasi II sebesar 5,13 J dan 0,12073 J/mm², serta Variasi I sebesar 2,82 J dan 0,07250 J/mm². Dengan demikian, Variasi III menjadi konfigurasi dengan respons penyerapan energi tertinggi dalam pengujian Charpy yang dilakukan, bukan berarti konfigurasi tersebut paling kuat pada seluruh jenis pembebanan.

Korelasi dengan Morfologi Patahan



Gambar 5. Sampel Terbaik Uji Tarik Variasi IV

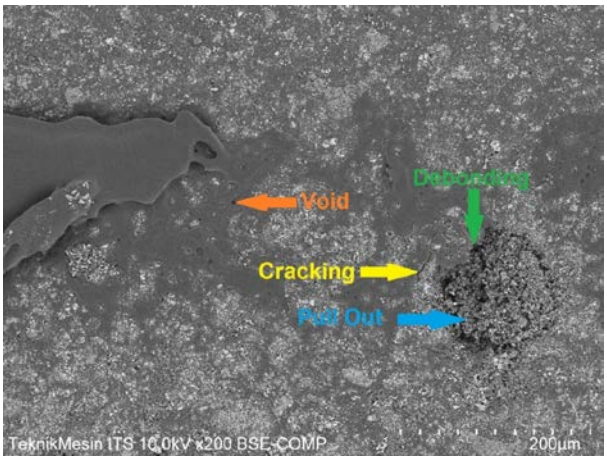
Pengamatan *Scanning Electron Microscope* dapat digunakan untuk membantu menjelaskan mekanisme kegagalan setelah pengujian mekanik. Pada gambar 5 sampel terbaik uji tarik yaitu Variasi IV dengan tiga lapisan serat karbon menghasilkan tegangan tarik rata-rata tertinggi sebesar 124,47 MPa. Citra SEM pada sampel ini diambil pada pembesaran 200× dengan mode BSE-COMP dan skala 200 µm memperlihatkan indikasi fiber pull-out memperlihatkan bahwa sebagian serat terlepas dari matriks, sedangkan interfacial debonding menunjukkan terpisahnya antarmuka serat dan resin. Matrix cracking menggambarkan retak yang berkembang di dalam matriks, sementara void dapat bertindak sebagai lokasi konsentrasi tegangan. Keberadaan mekanisme tersebut dapat mengurangi efektivitas transfer beban, meskipun serat karbon memiliki sifat mekanik tinggi. Oleh sebab itu, hasil tarik Variasi IV yang tertinggi tetap perlu dipahami bersama kualitas ikatan antarmuka dan kondisi permukaan patahan.



Gambar 6. Sampel Terbaik Uji Impak Variasi III

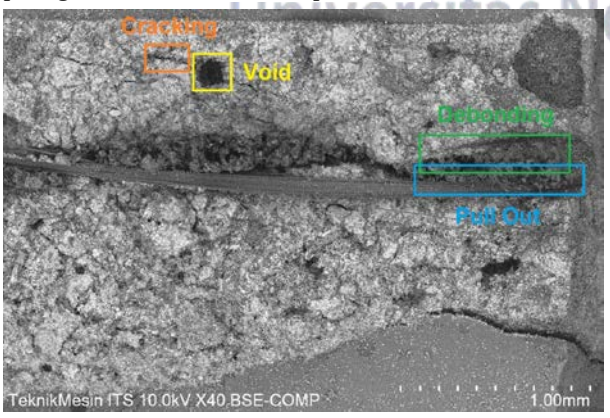
Sedangkan Variasi III yang didominasi serbuk cangkang telur menunjukkan kemampuan menyerap energi impak yang lebih tinggi, itu dapat dilihat pada gambar 6 dan diamati pada pembesaran 100× menggunakan mode BSE-COMP dengan skala 200 µm. Perbedaan tersebut menunjukkan hasil impak terbaik, dengan energi serap rata-rata sebesar 6,71 J dan kekuatan impak sebesar 0,15951 J/mm², bahwa susunan dan jenis fase penguat memberikan pengaruh terhadap mekanisme kerusakan serta respons komposit terhadap jenis pembebanan yang berbeda. Literatur mengenai komposit karbon–epoksi menunjukkan bahwa fraksi dan orientasi serat dapat memengaruhi propagasi retak, delaminasi, *matrix cracking*, dan mekanisme kegagalan lainnya selama pembebanan impak (Sohn et al., 2000).

Pada spesimen dengan hasil uji tarik terendah, yaitu Variasi III yang menggunakan tiga lapisan serbuk cangkang telur, tegangan tarik rata-rata tercatat sebesar 16,64 MPa. Citra SEM pada Gambar 7 diambil pada pembesaran 200× dengan mode BSE-COMP dan skala 200 µm. Permukaan patahan memperlihatkan indikasi void, matrix cracking, interfacial debonding, serta particle pull-out. Rongga (void) dapat menjadi lokasi konsentrasi tegangan, sedangkan retak matriks menunjukkan kerusakan pada fase resin selama pembebanan tarik. Interfacial debonding mengindikasikan pemisahan ikatan antara partikel cangkang telur dan matriks, sehingga transfer beban dari matriks ke partikel menjadi kurang efektif. Indikasi particle pull-out atau cavity menunjukkan adanya partikel yang terlepas dari matriks. Karena Variasi III tidak menggunakan serat karbon, mekanisme pelepasan penguat pada sampel ini lebih tepat disebut particle pull-out, bukan fiber pull-out. Kombinasi indikasi kerusakan tersebut konsisten dengan rendahnya kemampuan Variasi III dalam menahan beban tarik.



Gambar 7. Sampel Terburuk Uji Tarik Variasi III

Pada pengujian impak, Variasi I merupakan konfigurasi dengan hasil terendah, dengan energi serap rata-rata 2,82 J dan kekuatan impak rata-rata 0,07250 J/mm². Citra SEM pada Gambar 8 diamati pada pembesaran 40× menggunakan mode BSE-COMP dengan skala 1,00 mm. Pada permukaan patahan tampak indikasi matrix cracking, void, interfacial debonding, dan fiber pull-out. Retakan memanjang dan tidak beraturan pada matriks menunjukkan terbentuknya kerusakan akibat tegangan lokal selama tumbukan. Void yang tampak sebagai rongga gelap berpotensi menjadi titik konsentrasi tegangan dan mempermudah inisiasi maupun perambatan retak. Interfacial debonding menunjukkan pemisahan pada batas antara resin dengan fase penguat, baik serat karbon maupun partikel cangkang telur, yang dapat mengurangi efektivitas transfer beban. Sementara itu, fiber pull-out menunjukkan serat karbon yang terlepas atau tertarik keluar dari matriks akibat ikatan antarmuka yang tidak mampu menahannya selama pembebanan. Proses pelepasan dan gesekan pada antarmuka dapat menyerap sebagian energi, tetapi keberadaan retak dan rongga juga dapat mempercepat kegagalan. Dengan demikian, citra SEM memperlihatkan bahwa respons impak Variasi I berkaitan dengan kombinasi kerusakan matriks dan kegagalan antarmuka; hal ini sejalan dengan nilai energi serap dan kekuatan impaknya yang paling rendah di antara keempat variasi.



Gambar 8. Sampel Terburuk Uji Impak Variasi I

Batasan Penelitian dan Implikasi Pengembangan

Penelitian ini terbatas pada empat konfigurasi penguat, ketebalan nominal 4 mm, matriks epoksi yang digunakan, serta hasil pengujian tarik dan Charpy. Hasil pengujian tersebut belum cukup untuk menyatakan bahwa material mampu menahan penetrasi peluru. Uji tarik menilai respons terhadap pembebanan aksial, sedangkan uji impak Charpy menilai energi yang diserap spesimen pada kondisi tumbukan pendulum. Kondisi balistik melibatkan kecepatan dan geometri proyektil, massa dan struktur panel, kondisi penumpu, serta kemungkinan deformasi sisi belakang. Karena itu, istilah kandidat lapisan tambahan digunakan secara hati-hati dan tidak dimaksudkan sebagai klaim bahwa material telah memenuhi standar perlindungan balistik.

Rekomendasi Pengujian Lanjutan

Pengembangan berikutnya disarankan untuk melakukan pengujian balistik langsung pada sistem panel berlapis dengan lapisan utama yang sesuai, disertai pencatatan kecepatan proyektil, kedalaman penetrasi, dan deformasi sisi belakang. Pengujian bending dapat memberikan informasi mengenai respons lentur, sedangkan pengujian kekerasan, delaminasi, dan fatigue dapat menambah pemahaman mengenai ketahanan material terhadap kondisi layanan yang berbeda. Pengamatan SEM pada setiap variasi, baik setelah uji tarik maupun impak, juga sebaiknya dilakukan dengan pembesaran dan lokasi pengamatan yang terdokumentasi konsisten. Selain itu, perlu dilakukan pemeriksaan distribusi filler, porositas, ketebalan aktual, dan fraksi massa atau volume agar hubungan antara susunan penguat dan sifat mekanik dapat ditafsirkan lebih kuat.

Simpulan

Variasi susunan lapisan penguat memengaruhi sifat mekanik komposit epoksi berpenguat serat karbon dan serbuk cangkang telur. Susunan tiga lapisan serat karbon (Variasi IV) menghasilkan tegangan tarik rata-rata tertinggi sebesar 124,47 MPa, sedangkan susunan tiga lapisan serbuk cangkang telur (Variasi III) menghasilkan tegangan tarik terendah sebesar 16,64 MPa. Pada pengujian impak, Variasi III menunjukkan energi serap rata-rata tertinggi sebesar 6,71 J dan kekuatan impak sebesar 0,15951 J/mm². Dengan demikian, serat karbon lebih efektif untuk meningkatkan kekuatan tarik, sementara konfigurasi serbuk cangkang telur menunjukkan penyerapan energi impak tertinggi pada kondisi pengujian ini. Komposit tersebut masih perlu diuji secara balistik langsung sebelum dapat dinilai kelayakannya sebagai lapisan tambahan panel anti peluru.

Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan terima kasih kepada dosen pembimbing, pihak Laboratorium Fakultas Teknik Universitas Negeri Surabaya, Laboratorium Perlakuan dan Pengujian Bahan Teknik Politeknik Negeri Malang serta Laboratorium *Scanning Electron Microscopy* ITS Surabaya atas arahan dan dukungan selama proses fabrikasi dan pengujian.

DAFTAR PUSTAKA

Aritonang. (2022). Material Komposit Polimer Tahan Balistik Untuk Aplikasi Helm Militer Dalam Mendukung Material Pertahanan Indonesia. *Elemen : Jurnal Teknik Mesin*, *9*(2), 105–109. https://doi.org/10.34128/je.v9i2.219

Astana Widi, K., Pohan, G., Sujana, W., & Rizaldy, A. (2020). Analisa Uji Balistik Produk Body Armor Material Komposit Poliester Berpenguat Serat Karbon, Rami dan Kapas. *Senastika*, *1*(Senastika), 36–40.

ASTM International. (2014). *ASTM D3039/D3039M – Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials.* West Conshohocken, PA: ASTM International.

ASTM International. (2019). *ASTM D5942-96 – Standard Test Method for Determination of Charpy Impact Strength of Plastics.*West Conshohocken, PA: ASTM International.

Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2018). Materials Science and Engineering: An Introduction (10th ed.). Wiley.

Cantwell, W. J., & Morton, J. (1991). The impact resistance of composite materials. *Composites*, 22(5), 347–362. https://doi.org/10.1016/0010-4361(91)90549-V

Hull, D., & Clyne, T. W. (2019). An Introduction to Composite Materials (3rd ed.). Cambridge University Press.

Junus, S., Izzudin, Y. S., Muttaqin, A. Z., Yudistiro, D., Asrofi, M., Sumardi, Widityo, P. G., & Pradiza, R. R. (2025). *Tensile and morphological properties of carbon-coir fiber reinforced epoxy hybrid composites.* Jurnal Polimesi

Karacor, B., & Özcanlı, M. (2022). The effect of use of different types of matrix material on mechanical characteristics in jute/carbon fiber reinforced hybrid composites. NOHU Journal of Engineering Sciences, 11(2), 439–448. https://doi.org/10.28948/ngmuh.1080540

Kurniawan, A., Widi, K. A., Uhib, M. A., Saskara, P. S., Dwipayana, M. A., Wijaya, G. N. R., Rizaldi, A., & Arisudana, P. W. S. P. (2020). Studi penyerapan energi beban kejut laminasi komposit epoxy-karet. Jurnal Flywheel, 11(2), 1–5. https://doi.org/10.36040/flywheel.v11i2.2843

Mallick, P. K. (2007). Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing, and Design (3rd ed.). CRC Press.

Mouritz, A. P. (2012). *Introduction to aerospace materials*. Woodhead Publishing.

Naik, N. K., & Shrirao, P. (2004). Composite structures under ballistic impact. Composite Structures, 66(1–4), 579–590. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2004.04.037

Lisia, T., Hertanto, O., Aritonang, S., & Murniati, R. (2024). Efektivitas komposit dalam memperkuat rompi anti peluru. 7(1), 160–167.

Riza, O., Nikmatin, S., Hardhienata, H., & Syamani, F. A. (2022). Analisa Sifat Mekanik pada Bahan Anti Peluru dari Adisi Berpenguat Serat Panjang Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS). *Newton-Maxwell Journal of Physics*, *3*(1), 24–32. https://doi.org/10.33369/nmj.v3i1.17567

Sivakumar, A. A., Sankarapandian, S., Avudaiappan, S., & Saavedra Flores, E. I. (2022). Mechanical Behaviour and Impact of Various Fibres Embedded with Eggshell Powder Epoxy Resin Biocomposite. *Materials*, *15*(24), 9044. https://doi.org/10.3390/ma15249044

Sohn, M. S., Hu, X., Kim, J. K., & Walker, L. (2000). *Impact damage characterisation of carbon fibre/epoxy composites with multi-layer reinforcement*. Composites Part B: Engineering, 31(8), 681–691. https://doi.org/10.1016/S1359-8368(00)00028-7

Utomo, S. W. E. (2020). Analisis Pengaruh Tekanan Vacuum Pada Proses Pembuatan Komposit Carbon Fiber Menggunakan Metode Vacuum Infusion. *Machine : Jurnal Teknik Mesin*, *6*(2), 6–11. https://doi.org/10.33019/jm.v6i2.1438

Yudha, V., Ferriawan Yudhanto, & Joko Waluyo. (2023). Analisa Sifat Fisis Dan Mekanis Komposit Hibrid Serat Jute/Karbon Yang Dibuat Dengan Metode Vacuum Infusion Sebagai Alternatif Bahan Helm. *Scientific Journal of Mechanical Engineering Kinematika*, *8*(1), 25–35. https://doi.org/10.20527/sjmekinematika.v8i1.248

UNESA Universitas Negeri Surabaya