

# ANALISIS PENGARUH VARIASI FRAKSI VOLUME SERBUK KULIT KACANG TANAH TERHADAP KEKUATAN TARIK KOMPOSIT MATRIKS POLIESTER

Shofwan Jawahirul Umam<sup>1</sup>, Alva Solla Nabia<sup>1</sup>, Dilla Rofiqiya<sup>1</sup>, Rahmad Verdianto<sup>1</sup>, Utiya Hikmah<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Jurusan Fisika, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Negeri Islam Maulana Malik Ibrahim Malang, Jalan Gajayana No. 50, Kota Malang, 65145, Indonesia

\*email: utiyahikmah@fis.uin-malang.ac.id

## ABSTRAK

Kebutuhan akan material berbobot ringan dan ekonomis mendorong pemanfaatan limbah lignoselulosa kulit kacang tanah (*groundnut shell powder - GSP*) sebagai filler penguat dalam komposit matriks poliester. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh variasi fraksi volume serbuk kulit kacang tanah (0%, 1%, 3%, dan 5%) terhadap kekuatan tarik komposit. Spesimen dibuat menggunakan teknik pencetakan manual dan diuji dengan *Universal Testing Machine (UTM)* sesuai standar *ASTM*. Hasil menunjukkan bahwa komposit poliester murni (0%) memiliki kekuatan tarik tertinggi (5.378 MPa). Namun, penambahan filler pada fraksi rendah (1% dan 3%) secara drastis menurunkan kekuatan tarik (menjadi 0.954 MPa dan 1.091 MPa) karena distribusi yang tidak merata dan pembentukan *stress concentrator*. Peningkatan fraksi volume hingga 5% menghasilkan peningkatan kekuatan tarik paling signifikan menjadi 2.644 MPa dan menunjukkan regangan maksimum tertinggi (6.428%). Temuan penting ini menyimpulkan bahwa fraksi volume 5% merupakan komposisi optimal yang mampu memfasilitasi transfer tegangan dan memberikan keseimbangan terbaik antara kekuatan dan keuletan pada komposit berbasis limbah.

**Kata Kunci:** Poliester; Kekuatan Tarik; Komposit; Serbuk Kulit Kacang; Fraksi Volume

## ABSTRACT

*[Title: Analysis Of The Effect Of Variations In Volume Fraction Of Peanut Shell Powder On The Tensile Strength Of Polyester Matrix Composites]* The demand for lightweight and economical materials drives the utilization of lignocellulosic waste, specifically *groundnut shell powder (GSP)*, as a reinforcing filler in polyester matrix composites. This study aimed to analyze the effect of varying *GSP* volume fractions (0%, 1%, 3%, and 5%) on the composite's tensile strength. Specimens were fabricated using a manual molding technique and tested with a *Universal Testing Machine (UTM)* according to *ASTM* standards. Results showed that the pure polyester composite (0%) exhibited the highest tensile strength (5.378 MPa). However, the inclusion of filler at low fractions (1% and 3%) drastically reduced the tensile strength (to 0.954 MPa and 1.091 MPa) due to poor distribution and the formation of *stress concentrators*. Increasing the volume fraction to 5% resulted in the most significant increase in tensile strength to 2.644 MPa and showed the highest maximum strain (6.428%). This key finding concludes that the 5% volume fraction is the optimal composition, capable of facilitating stress transfer and providing the best balance of strength and ductility in the waste-based composite.

**Keywords:** Polyester; Tensile Strength; Composite; Peanut Shell Powder; Volume Fraction

## PENDAHULUAN

Kebutuhan terhadap material teknik yang memiliki kombinasi kekuatan mekanik tinggi, bobot ringan, stabilitas struktural, dan efisiensi biaya semakin meningkat seiring pesatnya perkembangan teknologi manufaktur, transportasi, dan infrastruktur. Pada banyak aplikasi modern, material logam konvensional mulai menunjukkan keterbatasan

signifikan seperti densitas tinggi, sifat korosif, dan biaya perawatan yang besar, sehingga tidak selalu kompatibel dengan tuntutan efisiensi energi dan keberlanjutan industri. Dalam konteks tersebut, komposit polimer menjadi alternatif yang semakin relevan karena mampu menawarkan rasio kekuatan-berat yang tinggi, kemudahan fabrikasi, serta

kemampuan rekayasa sifat mekanik melalui variasi struktur internalnya (Kamarudin, 2022).

Selama sepuluh tahun terakhir, penelitian komposit polimer mengalami pergeseran paradigma dari ketergantungan pada *filler* sintetis menuju pemanfaatan *filler* alami berbasis biomassa. Pergeseran ini dipicu oleh meningkatnya kesadaran lingkungan, dorongan ekonomi sirkular, dan tuntutan industri untuk memanfaatkan limbah pertanian sebagai sumber daya terbarukan. *Filler* alami dinilai unggul karena densitas rendah, biodegradabilitas tinggi, biaya rendah, serta ketersediaannya yang melimpah di negara-negara agraris seperti Indonesia (Wong, 2024). Selain itu, karakteristik kimia seperti kandungan selulosa dan hemiselulosa memberikan peluang pembentukan ikatan antarmuka yang lebih baik dengan matriks polimer termoset melalui mekanisme interlocking dan peningkatan energi adhesi.

Salah satu biomassa yang memperoleh perhatian dalam penelitian komposit polimer adalah kulit kacang tanah (*groundnut shell*). Limbah ini merupakan hasil samping industri pangan yang jumlahnya sangat melimpah, namun pemanfaatannya masih terbatas. Secara kimiawi, kulit kacang tanah bersifat lignoselulosa dengan kandungan selulosa sekitar 25–30%, hemiselulosa 18–25%, dan lignin 30–40%. Struktur tersebut membentuk kerangka polimer alami yang berpotensi memperkuat matriks polimer melalui mekanisme transfer tegangan ketika diproses menjadi serbuk (*groundnut shell powder/GSP*). Beberapa studi karakterisasi melaporkan bahwa GSP memiliki morfologi permukaan yang cukup kasar untuk meningkatkan interaksi mekanis dan adhesi terhadap matriks polyester setelah dipersiapkan pada ukuran partikel tertentu (Usman, 2021). Hasil serupa juga dilaporkan oleh Singh dan Gupta (2019) yang menunjukkan bahwa distribusi partikel filler alami sangat mempengaruhi efektivitas transfer tegangan dalam komposit, di mana aglomerasi partikel dapat menyebabkan terbentuknya titik konsentrasi tegangan (*stress concentrator*).

Selain itu, penelitian oleh Soni et al. (2023) pada komposit hibrid berbasis serat sisal dan serbuk kulit kacang tanah menunjukkan bahwa peningkatan fraksi filler hingga batas tertentu mampu meningkatkan kekuatan tarik dan ketahanan aus, namun di atas batas optimum justru menurunkan performa mekanik akibat meningkatnya porositas dan ketidakhomogenan struktur. Hal ini diperkuat oleh

kajian Rahman et al. (2020) yang menyatakan bahwa kualitas ikatan antarmuka antara filler alami dan matriks polimer menjadi faktor kunci dalam menentukan keberhasilan penguatan material komposit.

Dalam rekayasa komposit, fraksi volume *filler* merupakan salah satu parameter yang sangat menentukan keberhasilan penguatan. Secara teoritis, ketika partikel tersebar merata pada fraksi rendah, struktur komposit akan menunjukkan peningkatan kekuatan tarik karena transfer tegangan dari matriks menuju partikel lebih efektif. Namun, ketika fraksi volume terlalu tinggi, terjadi peningkatan risiko aglomerasi, pembentukan void, heterogenitas struktur, dan penurunan efisiensi transfer tegangan. Akumulasi hal tersebut menyebabkan peningkatan stress concentration dan berkontribusi negatif terhadap kekuatan tarik komposit. Fenomena non-linear ini telah dilaporkan pada berbagai penelitian komposit berbasis GSP maupun *filler* alami lainnya (Soni, 2023).

Matriks poliester sebagai material termoset menawarkan sejumlah keunggulan seperti kekakuan tinggi, sifat adhesif kuat, kestabilan kimia, dan biaya yang relatif rendah. Namun, poliester dikenal memiliki sifat getas dan sensitivitas terhadap cacat internal, sehingga penambahan *filler* alami harus dilakukan secara hati-hati. Efektivitas penambahan partikel GSP pada poliester sangat bergantung pada ukuran partikel, kebersihan permukaan, tingkat dispersibilitas, serta kompatibilitas kimia antar fase. Oleh karena itu, metode preparasi *filler* (pencucian, pengeringan, penggilingan), teknik pencampuran mineral-organik, hingga pengaturan waktu dan temperatur curing menjadi faktor penting dalam menjamin keberhasilan pembentukan komposit dengan sifat mekanik optimal (Wong, 2024).

Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa penambahan GSP dalam jumlah kecil (<10 wt%) mampu meningkatkan kekuatan tarik dan modulus komposit, terutama ketika dispersi partikel baik dan ikatan antarmuka stabil. Namun, sebagian besar penelitian menggunakan fraksi massa atau fraksi volume yang relatif besar, sehingga belum banyak mengkaji perilaku komposit pada fraksi volume yang sangat rendah (0–5%), padahal rentang kecil ini penting untuk mengidentifikasi titik optimum peningkatan kekuatan tanpa mengganggu homogenitas struktur. Studi pada filler alami lain juga mengindikasikan bahwa fraksi volume rendah sering menghasilkan peningkatan paling signifikan pada sifat tarik karena mengurangi aglomerasi dan porositas (Awwalu, 2018).

Meskipun berbagai penelitian tersebut telah memberikan kontribusi penting, sebagian besar studi masih berfokus pada penggunaan fraksi filler dalam rentang menengah hingga tinggi, serta menggunakan pendekatan fraksi massa dibandingkan fraksi volume. Variasi fraksi volume pada rentang sangat rendah (0–5%) memiliki peran krusial dalam mengidentifikasi titik awal mekanisme penguatan dan transisi dari perilaku pelemahan menuju penguatan material. Studi mendalam pada rentang ini masih relatif terbatas, terutama untuk sistem komposit berbasis serbuk kulit kacang tanah dengan matriks poliester. Oleh karena itu, penelitian ini menjadi penting untuk dilakukan guna mengisi kesenjangan tersebut dengan menganalisis secara sistematis pengaruh variasi fraksi volume rendah terhadap kekuatan tarik komposit. Hasil penelitian ini diharapkan tidak hanya memberikan pemahaman fundamental mengenai mekanisme interaksi matriks–filler pada skala mikro, tetapi juga menjadi dasar pengembangan material komposit berbasis limbah pertanian yang lebih efisien, ekonomis, dan berkelanjutan.

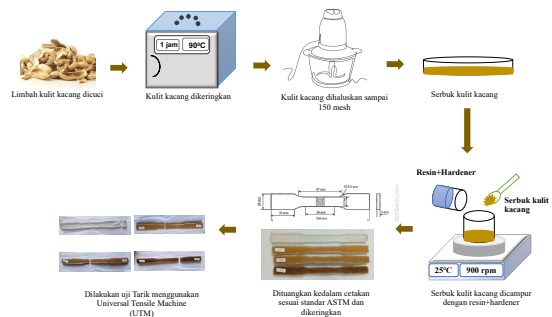
Berdasarkan uraian di atas, maka pada penelitian ini digunakan kulit kacang tanah sebagai filler. Tujuan dilakukannya penelitian ini adalah untuk membuat komposit dengan matriks polyester dan kulit kacang tanah sebagai filler. Selain itu, penelitian ini diharapkan mampu memberikan dasar ilmiah bagi pengembangan material komposit berbasis limbah pertanian yang lebih ekonomis, berdaya saing industri, dan mendukung keberlanjutan lingkungan dalam jangka panjang (Usman, 2021). Selanjutnya sampel dilakukan uji karakterisasi sifat mekanis berupa uji Tarik menggunakan *Universal Tensile Machine (UTM)*.

**METODE**

Metode penelitian ini bersifat eksperimental, bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi fraksi volume serbuk kulit kacang tanah terhadap kekuatan tarik komposit matriks poliester. Penelitian ini menggunakan kulit kacang tanah sebagai bahan penguat (*filler*), resin poliester sebagai matriks, dan katalis (*hardener*) untuk memicu proses pengerasan. Prosedur diawali dengan Persiapan Serbuk Kulit Kacang Tanah. Kulit kacang dicuci secara berkala menggunakan air suling untuk menghilangkan kotoran. Setelah dicuci, bahan dikeringkan menggunakan oven pada suhu terkontrol 90°C selama 60 menit. Kulit kacang kering kemudian diubah menjadi partikel berukuran 150 mesh

menggunakan alat chopper selama durasi penggilingan 1 jam. Tahap berikutnya adalah pembuatan spesimen Komposit. Digunakan teknik pencetakan manual dengan variasi fraksi volume serbuk yang telah ditentukan: 0%, 1%, 3%, dan 5% seperti pada Tabel 1. Serbuk kulit kacang dan resin poliester ditakar sesuai proporsi fraksi volume, dicampur secara merata dengan katalis, dan diaduk selama 10 menit. Campuran kemudian ditempatkan dalam cetakan seperti yang ditampilkan pada Gambar.1 yang telah diaplikasikan lapisan malam untuk mempermudah pelepasan sampel, lalu dikompresi secara merata dan dibiarkan mengeras (*curing*). Papan komposit yang telah mengeras dipotong (bagian pinggirannya) sesuai dimensi standar pengujian.

Karakterisasi dilakukan menggunakan Uji Kekuatan Tarik dengan mesin *Universal Testing Machine (UTM)*. Pengaturan uji meliputi kecepatan uji sebesar 100.000mm/min, Luas Penampang Spesimen (*Area*) 207mm<sup>2</sup>, dan Panjang Ukur (*Gauge Length*) 220 mm. Data hasil pengujian ini, yaitu Gaya Puncak (*Force @ Peak*) dan Tegangan Tarik (*Tensile Stress*), selanjutnya dianalisis untuk menentukan pengaruh fraksi volume serbuk kulit kacang tanah (*Vf*) dan mengidentifikasi fraksi volume yang menghasilkan kekuatan tarik optimal. Tahapan pada penelitian ini ditunjukkan pada gambar 1.



**Gambar 1.** Alur proses tahapan pembuatan komposit

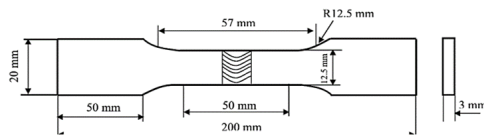
**Tabel 1.** Variasi Sampel

Sampel	Volume Serbuk Kulit Kacang	Volume Resin	Volume Katalis
a	0%	98%	2%
b	1%	97%	2%
c	3%	95%	2%
d	5%	93%	2%

Dilakukan uji Tarik pada sampel menggunakan alat *Universal Testing Machine (UTM)*. Karakterisasi uji tarik ini bertujuan untuk mengetahui kekuatan

tarik pada material. Benda uji akan dijepit dan beban perlahan akan bertambah hingga benda uji patah.

Penelitian ini untuk menguji kekuatan tarik pada sampel komposit dengan menggunakan standart ASTM (*American Standart Testing Material*) D638-14 pada Gambar 2.



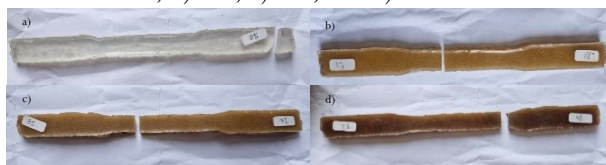
**Gambar 2.** Sketsa benda uji tarik sesuai dengan ASTM E8 (Widodo & Ilman, 2022)

**HASIL DAN PEMBAHASAN**

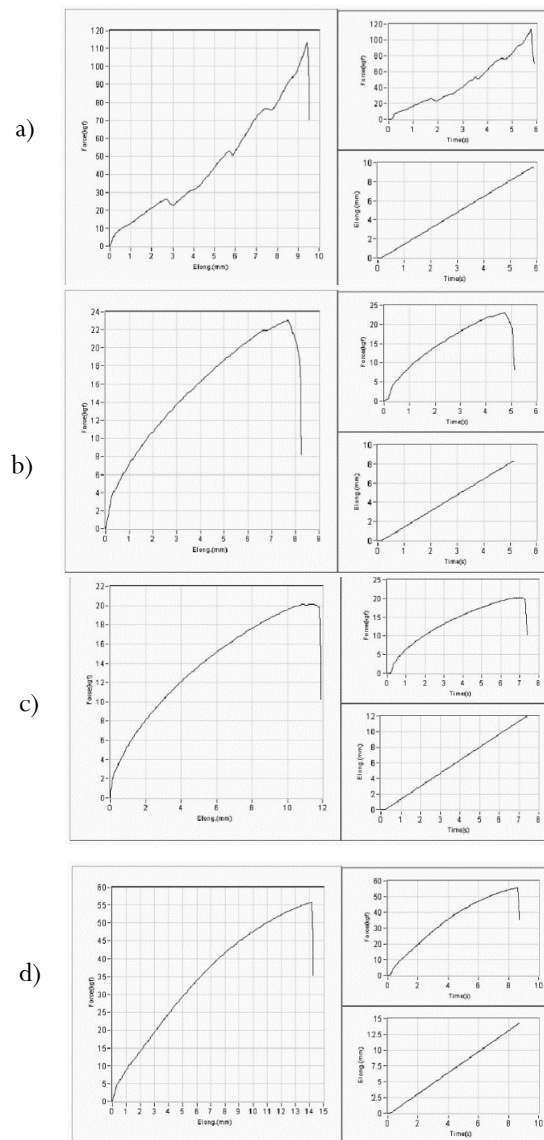
Sampel komposit berpenguat kulit kacang tanah dengan matriks polymer yang telah berhasil dibuat dapat dilihat pada Gambar 3. Selanjutnya sampel dilakukan uji tarik dengan pemberian pembebanan (*force*) dalam upaya memperoleh data sifat mekanik dari sampel komposit. Pengujian tarik pada sampel uji komposit dilakukan pada uji sampel tanpa bahan *filler* (fraksi volume *filler* partikel 0%) dan uji sampel komposit variasi fraksi volum *filler* 1%, 3% dan 5%. Data yang diperoleh dari hasil uji Tarik menggunakan UTM antara lain adalah beban (*force*) maksimum yang dapat ditanggung oleh masing-masing sampel, stress, strain dan waktu (*time*) sampai sampel putus.



**Gambar 3.** Spresimen uji komposit dengan *filler* a) 0%, b) 1%, c) %3, dan d) 5%



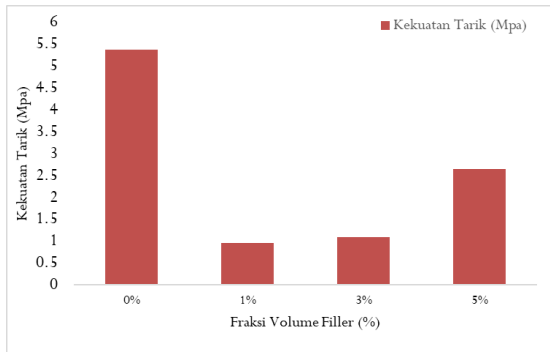
**Gambar 4.** Bentuk patahan pada sampel uji Tarik dengan fraksi volume *filler* a) 0%, b) 1%, c) 3%, dan d) 5%



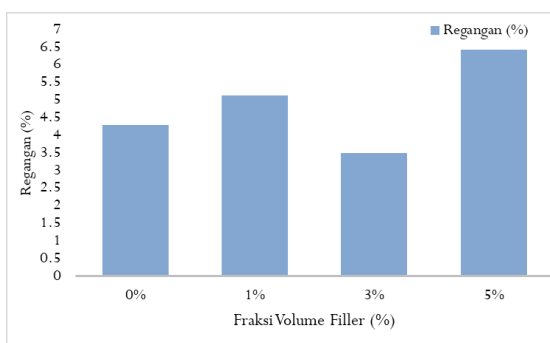
**Gambar 5.** Grafik Tensile Test sampel a) 0%, b) 1%, c) 3%, dan d) 5%

**Tabel 2.** Hasil Uji Tarik

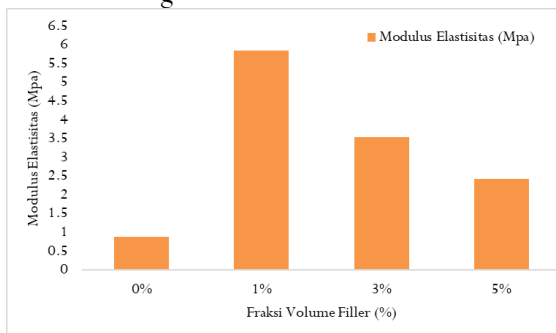
Sampel	Max Force (kgf)	Stress (Mpa)	Strain (%)
a	113.51	5.378	4.289
b	20.13	0.954	5.134
c	23.03	1.091	3.494
d	55.8	2.644	6.428



**Gambar 6.** Grafik Hubungan Nilai regangan terhadap Variasi Fraksi Volume *Filler* Serbuk Kulit Kacang Tanah



**Gambar 7.** Grafik hubungan nilai regangan terhadap variasi fraksi volume *filler* serbuk Kulit kacang tanah



**Gambar 8.** Grafik hubungan nilai modulus elastisitas terhadap variasi fraksi volume *filler* serbuk Kulit kacang tanah

Sampel a, yang diasumsikan sebagai sampel tanpa penambahan *filler* (serbuk), memiliki nilai tegangan tarik maksimum tertinggi sebesar 5.378 MPa dengan gaya puncak 113.51 kgf. Nilai ini menjadikannya sampel terkuat dan menjadi pembandingan dasar karena struktur poliester homogen tanpa gangguan partikel pengisi. Meskipun kuat, regangan maksimum yang dicapai adalah 4.289%. Secara visual, Kurva Gaya-Perpanjangan sampel ini

tidak menunjukkan kenaikan linier yang stabil, melainkan memperlihatkan kenaikan non-linier dengan fluktuasi (atau langkah-langkah kenaikan) di area deformasi plastis sebelum akhirnya mencapai puncak dan mengalami patahan tiba-tiba. Karakteristik ini-kekuatan tinggi dengan regangan sedang hingga rendah-konsisten dengan sifat mekanik resin poliester tak jenuh, di mana polimer termoset memiliki modulus yang cukup tinggi namun cenderung getas (regangan patah rendah).

Pada fraksi volume 1%, terjadi penurunan tegangan maksimum sangat signifikan menjadi 0.954 MPa, dengan gaya puncak hanya 20.13 kgf. Meskipun kekuatannya turun drastis, regangan maksimum tercatat 5.134%, tertinggi di antara seluruh sampel. Artinya, pada fraksi rendah, filler tidak mampu memberikan kontribusi penguatan, bahkan bertindak sebagai titik konsentrasi tegangan (*stress concentrator*). Ikatan antarmuka yang lemah antara partikel serbuk kulit kacang tanah dan matriks memungkinkan terjadinya slip internal sehingga material lebih mudah mengalami deformasi tetapi tidak mampu menahan beban besar. Fenomena ini sejalan dengan teori komposit yang menjelaskan bahwa kadar filler yang sangat rendah berpotensi menurunkan kekuatan karena distribusi tidak merata, adhesi buruk, dan peningkatan potensi terbentuknya void.

Peningkatan fraksi filler menjadi 3% menghasilkan kekuatan tarik 1.091 MPa dengan gaya puncak 23.03 kgf. Nilai ini sedikit meningkat dibanding sampel 1%, namun masih di bawah poliester murni. Regangan maksimum 3.494%, menandakan komposit mulai menunjukkan kekakuan struktural lebih baik. Hal ini mengindikasikan bahwa pada fraksi menengah, sebagian partikel filler mulai tersusun lebih merata dan mulai berperan dalam transfer tegangan. Meski begitu, aglomerasi partikel dan void yang terbentuk menyebabkan peningkatan kekuatan tarik belum signifikan. Pola ini konsisten dengan hasil penelitian yang menyebutkan bahwa komposit berbasis biomassa umumnya mulai menunjukkan penguatan gradual pada fraksi menengah, meskipun tidak optimal akibat ikatan antarmuka yang belum sempurna.

Fraksi volume 5% menunjukkan peningkatan nilai kekuatan tarik paling signifikan, mencapai 2.644 MPa dengan gaya maksimum 55.80 kgf. Nilai ini jauh melampaui poliester murni maupun semua fraksi lainnya. Regangan maksimum 6.428%, menunjukkan kombinasi ideal antara kekakuan dan kemampuan deformasi. Pada fraksi ini, filler terdistr

ibusi lebih homogen sehingga permukaan antarmuka matriks filler menjadi lebih efektif dalam mentransfer tegangan. Partikel kulit kacang tanah berfungsi sebagai elemen penguat yang memperlambat perambatan retak dan meningkatkan kapasitas beban. Peningkatan kekuatan terjadi ketika fraksi filler mencapai titik keseimbangan antara luas bidang kontak dan kualitas ikatan antarmuka, di mana transfer tegangan berlangsung lebih efisien. Hasil ini menunjukkan bahwa fraksi 5% merupakan komposisi optimum.

Kekuatan tarik komposit sangat sensitif terhadap fraksi filler. Poliester murni (0% vol.) mencapai 5.378 MPa sebagai acuan. Fraksi 1% vol. menurunkan drastis menjadi 0.954 MPa (18% dari matriks), karena partikel jarang menciptakan *stress concentrator* dan diskontinuitas akibat ikatan antarmuka lemah (Mittal, 2021). Pada 3% vol., naik moderat ke 1.091 MPa, dengan interaksi partikel mulai mengurangi isolasi cacat, meski aglomerasi dan antarmuka masih dominan. Titik balik di 5% vol. (2.644 MPa) capai fraksi kritis, membentuk *stress transfer pathways*, menghambat *crack propagation via particulate reinforcement* (Rajak, 2019; Rahman, 2020).

Regangan maksimum menunjukkan sifat keuletan (*ductility*) dari material komposit, yaitu kemampuan material untuk berdeformasi secara permanen sebelum terjadi patah. Sampel d (5% serbuk) menunjukkan keuletan tertinggi dengan persentase Regangan Maksimum sebesar 6.428%, yang berarti sampel ini mampu meregang paling jauh sebelum mencapai kegagalan (Ayrilmis et al, 2019). Sebaliknya, Sampel c, yang mengandung 3% serbuk, tercatat memiliki persentase Regangan Maksimum terendah sebesar 3.494%, mengindikasikan bahwa material ini cenderung paling getas (*brittle*). Sementara itu, Sampel b yang mengandung 1% serbuk dan Sampel a menunjukkan keuletan menengah, dengan nilai Regangan Maksimum berturut-turut sebesar 5.134% dan 4.289%, menempatkan keduanya di antara sampel yang paling ulet dan paling getas (Mochane, 2021). Modulus poliester murni 0.88 MPa rendah, kemungkinan akibat kesalahan pengukuran regangan awal. Relatif naik tajam ke 5.841 MPa (1% vol.) via penguatan partikel; turun ke 3.547 MPa (3% vol.) dan 2.429 MPa (5% vol.) karena antarmuka lemah, *compliant zones*, dan porositas yang mengurangi kekakuan makro (Asim, 2018).

Secara keseluruhan, fraksi volume serbuk kulit kacang tanah memengaruhi jelas sifat tarik komposit poliester: kekuatan tarik turun pada 1–3% (akibat distribusi tidak merata, konsentrasi tegangan, dan void), lalu naik drastis pada 5% via interaksi antarmuka optimal dan transfer tegangan efektif melalui partikel. Ini selaras dengan komposit biomassa yang optimal pada fraksi kritis pembentuk jaringan transfer tegangan, menjadikan 5% paling unggul secara mekanik.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa komposit poliester berpenguat serbuk kulit kacang tanah (GSP) pada fraksi volume optimum 5% memiliki potensi aplikasi yang luas sebagai material alternatif berbasis limbah pertanian. Dengan kombinasi kekuatan tarik yang meningkat dan regangan yang relatif tinggi, material ini cocok digunakan pada aplikasi non-struktural hingga semi-struktural yang membutuhkan material ringan, ekonomis, dan cukup tangguh, seperti panel interior otomotif, papan partisi bangunan, komponen furnitur, serta material pelapis (*coating board*). Selain itu, pemanfaatan limbah kulit kacang tanah sebagai filler memberikan nilai tambah dari aspek keberlanjutan, karena mampu mengurangi limbah biomassa sekaligus menekan biaya produksi material komposit dibandingkan filler sintesis. Secara industri, penggunaan komposit ini juga berpotensi mendukung pengembangan material ramah lingkungan (*green composite*) yang sejalan dengan konsep ekonomi sirkular, khususnya di negara agraris dengan ketersediaan limbah pertanian yang melimpah. Oleh karena itu, temuan ini tidak hanya relevan secara akademis, tetapi juga memiliki prospek implementasi nyata dalam sektor manufaktur dan konstruksi ringan.

## KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil penelitian, serbuk kulit kacang tanah (*groundnut shell powder/GSP*) terbukti berpotensi sebagai *filler* penguat komposit poliester dengan sensitivitas tinggi terhadap fraksi volume. Hubungan non-linier yang muncul menunjukkan bahwa poliester murni memiliki kekuatan tarik tertinggi (5.378 MPa), sedangkan penambahan GSP pada fraksi rendah (1% dan 3%) justru menurunkan kekuatan secara drastis akibat distribusi partikel yang kurang merata dan terbentuknya konsentrator tegangan. Fraksi kritis optimal berhasil diidentifikasi pada 5% volume, ditunjukkan oleh peningkatan kekuatan tarik menjadi 2.644 MPa dan regangan

maksimum tertinggi 6.428%, yang mengindikasikan aktivasi mekanisme penyerapan energi seperti *crack deflection* dan *interface debonding*. Dengan demikian, komposisi 5% volume dinyatakan sebagai fraksi paling efektif dalam memberikan keseimbangan terbaik antara kekuatan dan ketangguhan, serta memperkuat potensi pemanfaatan limbah pertanian sebagai material komposit polimer yang berkelanjutan dan berdaya saing.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Agarwal, B. D., Broutman, L. J., & Chandrashekhara, K. (2018). *Analysis and Performance of Fiber Composites*. Wiley.
- Asim, M., Jawaid, M., Abdan, K., & Ishak, M. R. (2018). *The effect of silane treated fibre loading on mechanical properties of pineapple leaf/kenaf fibre filler phenolic composites*. *Journal of Polymers and the Environment*, 26(4), 1520–1527.
- Awwalu Usman, M., Danladi, S., & Idris, M. (2018). *Effect of Groundnut Shell Powder on the Mechanical Properties of Recycled Polyethylene and Its Biodegradability*. Scientific Research Publishing.
- Ayrimis, N., Kaymakci, A., & Ozdemir, F. (2019). *Physical, mechanical, and thermal properties of polypropylene composites filled with walnut shell flour*. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 70, 303–308.
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2018). *Materials Science and Engineering: An Introduction*. Wiley.
- Hull, D., & Clyne, T. W. (2019). *An Introduction to Composite Materials*. Cambridge University Press.
- Kamarudin, S. H., Ramli, A., & Yusoff, M. (2022). *A Review on Natural Fiber Reinforced Polymer Composites: Processing, Properties and Applications*. *Polymers (MDPI)*.
- Mittal, V. (2021). *Interface engineering of natural fibre composites for maximum performance*. Woodhead Publishing.
- Mochane, M. J., Mokhena, T. C., Mokhothu, T. H., Mtibe, A., & Sadiku, E. R. (2021). *Recent progress on natural fiber hybrid composites for advanced applications: A review*. *eXPRESS Polymer Letters*, 15(2), 93–115.
- Rahman, M. R., Hasan, M., & Huque, M. M. (2020). *Influence of fiber treatment on the mechanical and morphological properties of sawdust reinforced polypropylene composites*. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 33(4), 503–520.
- Rajak, D. K., Pagar, D. D., Menezes, P. L., & Linul, E. (2019). *Fiber-reinforced polymer composites: Manufacturing, properties, and applications*. *Polymers*, 11(10), 1667.
- Singh, T., & Gupta, N. (2019). *Effect of Particulate Biomass Filler on Mechanical Properties of Polymer Composites*. *Materials Today: Proceedings*, 18, 1142–1150.
- Soni, C., Patel, H., & Sharma, R. (2023). *Sisal Fiber and Groundnut Shell Particulate Reinforced Hybrid Epoxy Composites: Mechanical and Tribological Properties*. *Materials Today: Proceedings (ScienceDirect)*.
- Usman, M. A. (2021). *Characterization of Groundnut Shell Powder as Reinforcement: XRD, FTIR, and Morphological Analysis*. *Journal of Reinforced Plastics and Composites (SAGE Journals)*.
- Widodo, A., & Ilman, M. N. (2022). *Pengaruh Frekuensi Getaran terhadap Sifat Fisis dan Mekanik pada Sambungan LAS MIG Aluminium Paduan AA 6061-T6*. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 13(1), 171-178.
- Wong, D., Abdullah, M., & Chee, C. (2024). *Recent Developments in Natural Fiber-Reinforced Polymer Composites: Trends and Prospects*. *Composite Reviews (MDPI)*.