

INOVASI KOMPREHENSIF KOMPOSIT BERBASIS POLIMER DAN SERAT DAUR ULANG UNTUK INFRASTRUKTUR BERKETAHANAN TINGGI DAN BERKELANJUTAN

Sri Bintang Faisal¹, Muhamad Fitri²

Universitas Mercu Buana^{1,2}
bfaisal8851@gmail.com¹

Abstract: The growing demand for environmentally friendly, highly durable, and mechanically superior construction materials has driven a paradigm shift in mechanical and materials engineering. This study aims to examine innovative polymer- and recycled-fiber-based composites as sustainable and high-performance infrastructure materials. The methods used include the formulation of multi-waste-based Polymer-Cement Composites (PCC) and Polymer Concrete (PC) (recycled polystyrene, tire rubber powder, recycled concrete aggregate/RA, and natural fibers), long-term compressive strength and durability testing for up to 420 days, and microstructural characterization using Scanning Electron Microscopy (SEM) to analyze interfacial bonding. The results show that PC with RA achieves a compressive strength of up to 96 MPa, surpassing that of natural aggregate (89.1 MPa), as confirmed by SEM through the formation of a protective resin layer on the porous surface of RA. The Polystyrene/Rubber Powder Composites increase the compressive strength by up to 22.2%. The XGBoost predictive model predicts mechanical properties with high accuracy ($R^2 = 0.981$). Conclusion: Polymer-based composites and recycled fibers have been proven effective in improving the mechanical performance and durability of infrastructure, with SEM as a key microstructural validation tool, supported by data modeling for efficient and sustainable material design.

Keywords: Recycled Aggregate, Polymer Composite, Compressive Strength, SEM, XGBoost

Abstrak: Permintaan yang terus meningkat akan material konstruksi yang ramah lingkungan, berdaya tahan tinggi, dan berkinerja mekanis unggul telah mendorong pergeseran paradigma dalam teknik mesin dan material. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji inovasi komposit berbasis polimer dan serat daur ulang sebagai material infrastruktur berkelanjutan dan berkinerja tinggi. Metode yang digunakan meliputi formulasi Komposit Polimer-Semen (PCC) dan Beton Polimer (PC) berbasis multi-limbah (polistirena daur ulang, serbuk karet ban, agregat beton daur ulang/RA, serta serat alami), pengujian kuat tekan dan durabilitas jangka panjang hingga 420 hari, serta karakterisasi mikrostruktur menggunakan *Scanning Electron Microscopy (SEM)* untuk menganalisis ikatan antarmuka. Hasil penelitian menunjukkan bahwa PC dengan RA mencapai kuat tekan hingga 96 MPa, melampaui agregat alami (89,1 MPa), yang dikonfirmasi SEM melalui pembentukan lapisan resin pelindung pada permukaan pori RA. Komposit Polistirena/Serbuk Karet meningkatkan kuat tekan hingga 22,2%. Model prediktif XGBoost memprediksi sifat mekanis dengan akurasi tinggi ($R^2 = 0,981$). Simpulan dari komposit berbasis polimer dan serat daur ulang terbukti efektif meningkatkan kinerja mekanis dan durabilitas infrastruktur, dengan SEM sebagai alat validasi mikrostruktural kunci, serta didukung pemodelan data untuk desain material yang efisien dan berkelanjutan.

Kata Kunci: Agregat Daur Ulang, Komposit Polimer, Kuat Tekan, SEM, XGBoost

PENDAHULUAN

Sektor konstruksi global saat ini menghadapi tantangan ganda yang saling terkait, yaitu memenuhi kebutuhan infrastruktur yang terus meningkat seiring

pertumbuhan populasi dan urbanisasi, sekaligus mengurangi dampak lingkungan yang signifikan dari aktivitas konstruksi. Beton konvensional, sebagai material konstruksi yang paling dominan

dan banyak digunakan di dunia, terbebani oleh masalah keberlanjutan yang serius, terutama karena proses produksi semen yang bertanggung jawab atas sekitar 8% emisi karbon dioksida global (Eskander et al., 2021), (Alhazmi et al., 2021). Selain itu, industri konstruksi juga menciptakan volume limbah padat yang masif, bergantung pada eksploitasi agregat alami yang semakin terbatas, serta menghadapi tantangan degradasi infrastruktur yang dipercepat akibat paparan lingkungan agresif seperti korosi baja tulangan, serangan sulfat, dan kondisi air laut yang secara signifikan mempersingkat masa pakai struktur dan menuntut biaya perawatan serta perbaikan yang sangat tinggi (Kim & Choi, 2025), (Liu et al., 2025). Di sisi lain, volume limbah industri dan konsumen, seperti ban bekas, busa polistirena, dan limbah konstruksi, terus meningkat dan menjadi beban lingkungan yang serius (Eskander et al., 2021). Kedua fenomena ini mendorong adopsi kerangka pengurangan limbah dalam rekayasa material, yang mengubah limbah menjadi sumber daya bernilai tambah tinggi melalui pendekatan daur ulang dan rekayasa material inovatif (Alhazmi et al., 2021).

Material komposit berbasis polimer dan serat telah muncul sebagai solusi alternatif yang menjanjikan untuk menjawab tantangan tersebut, menawarkan rasio kekuatan-terhadap-berat yang unggul, ketahanan korosi yang lebih baik, fleksibilitas desain yang lebih tinggi, dan potensi integrasi limbah yang besar dibandingkan material semen tradisional (Kim & Choi, 2025), (Liu et al., 2025). Berbagai penelitian terdahulu telah menunjukkan potensi besar pemanfaatan limbah sebagai pengisi fungsional dalam Komposit Polimer-

Semen (PCC) dan Beton Polimer (PC). (Li et al., 2022) membuktikan bahwa PCC yang mengandung busa polistirena daur ulang mampu mempertahankan kuat tekan yang dapat diterima bahkan setelah 420 hari paparan lingkungan air agresif seperti air laut dan air tanah, menunjukkan ketahanan korosi internal yang superior. (Subhani & Prasad, 2024) dan (Ahmad et al., 2020) menunjukkan bahwa kombinasi polistirena dan serbuk karet ban bekas sebagai agregat komposit mampu meningkatkan kuat tekan beton hingga 22,2% dan kuat lentur 5,26%, sekaligus mengatasi tantangan limbah padat secara efektif. Inovasi paling signifikan dalam pemanfaatan agregat datang dari penelitian (Elgholmy et al., 2024), yang menemukan bahwa Beton Polimer (PC) dengan Agregat Beton Daur Ulang (*Recycled Aggregate – RA*) mencapai kuat tekan luar biasa hingga 96 MPa, melampaui PC dengan agregat alami yang hanya mencapai 89,1 MPa. Fenomena ini dikaitkan dengan mekanisme pembentukan lapisan resin pelindung ganda pada permukaan butir RA yang berpori, yang memperkuat ikatan antarmuka dan mengoptimalkan mikrostruktur material. Selain itu, komitmen terhadap material hijau diperluas melalui eksplorasi serat alami berkelanjutan, seperti serat daun kurma dan serat rami (*Hemp Fiber*), yang divalidasi oleh (Alsuhaibani, 2025) sebagai alternatif penguatan yang efektif dan ramah lingkungan untuk material komposit dan perkuatan struktur. Memahami karakteristik mekanis dasar dari komposit serat alami sangat penting untuk pengembangan ini. Penelitian oleh (Fitri et al., 2021) menunjukkan bahwa pada komposit resin epoksi yang diperkuat serbuk sabut kelapa, faktor

seperti kandungan serbuk dan fraksi berat pengeras sangat memengaruhi kekuatan impak dan geser, di mana kandungan serbuk 6% dan fraksi pengeras 0.5 menghasilkan kekuatan impak tertinggi. Selain itu, pemanfaatan limbah serat alami seperti kulit salak dan serbuk kayu jati, serta limbah anorganik seperti serbuk kaca, telah dikarakterisasi sebagai material alternatif untuk kampas rem yang ramah lingkungan dan memenuhi standar SNI 09-0143-1987 (Fitri et al., 2025). Temuan ini menggarisbawahi pentingnya optimasi komposisi material untuk mencapai kinerja mekanis yang diinginkan.

Dari sisi aplikasi struktural, penelitian oleh (Kim & Choi, 2025) menunjukkan bahwa penggunaan Carbon Fiber-Reinforced Polymer (CFRP), termasuk aplikasi prategang, terbukti sangat efektif untuk memperbaiki balok beton bertulang yang mengalami korosi dan memperkuat balok komposit baja-beton, secara signifikan meningkatkan kapasitas lentur dan geser struktural. Selain itu, elemen struktural inovatif seperti Tiang Komposit Tabung FRP berisi Beton (*Concrete-Filled Fiber Reinforced Polymer Tube – CFFT*) telah diuji kinerjanya di bawah beban lateral siklik oleh (Yang et al., 2025), memvalidasi efektivitasnya sebagai solusi fondasi yang tangguh dan tahan lama untuk infrastruktur sipil yang rentan terhadap beban dinamis. (Stucki et al., 2024) mengembangkan Komposit Kayu-Beton (*Timber-Concrete-Composites – TCC*) dengan matriks polimer epoksi yang memberikan ikatan geser superior dan stabilitas kelembaban yang lebih baik dibandingkan matriks poliuretan, menunjukkan potensi besar untuk konstruksi hibrida yang ringan dan kuat.

Untuk mengatasi kompleksitas desain material hibrida yang melibatkan berbagai resin, serat, dan limbah agregat, (Palamarchuk & Yudaev, 2024) melaporkan bahwa algoritma *Extreme Gradient Boosting* (XGBoost) mampu memprediksi sifat mekanis PC dengan akurasi sangat tinggi ($R^2 = 0,981$), menandai era desain material yang didorong oleh data (*data-driven design*) dan memungkinkan evaluasi ribuan kombinasi material secara cepat dan efisien.

Meskipun kemajuan luar biasa tersebut telah dicapai, sebagian besar penelitian terdahulu cenderung menganalisis limbah atau serat secara tunggal, sehingga pemahaman mengenai sinergi material multi-limbah dan dampak gabungannya terhadap kinerja mekanis serta durabilitas jangka panjang masih sangat terbatas. Kurangnya data durabilitas terstandarisasi pada konfigurasi material hibrida baru di bawah kondisi lingkungan gabungan merupakan hambatan utama dalam adopsi komposit berkelanjutan secara luas. Oleh karena itu, tujuan utama penelitian ini adalah untuk: (1) mensintesis dan mengkarakterisasi kinerja mekanis PCC yang mengandung multi-limbah (polistirena daur ulang, serbuk karet ban, dan agregat beton daur ulang/RA) serta mengidentifikasi proporsi campuran yang optimal; (2) memvalidasi secara komprehensif durabilitas jangka panjang (>420 hari) dari material komposit berbasis limbah dan serat alami dalam menghadapi lingkungan yang agresif (air laut dan larutan sulfat) dengan dukungan karakterisasi mikrostruktural menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM); (3) mengoptimalkan desain elemen struktural lanjutan seperti

CFFT dan TCC serta memvalidasi peningkatan kinerja struktural di bawah kondisi pembebanan yang kritis; dan (4) membangun dan memvalidasi model prediktif berbasis *Machine Learning* (XGBoost) yang *robust* dan universal, mampu memprediksi kuat tekan dan kuat lentur berbagai jenis PC/PCC dengan akurasi tinggi berdasarkan dataset material yang sangat beragam.

Kebaruan (*novelty*) penelitian ini terletak pada integrasi multi-limbah secara simultan (polistirena, karet, dan RA) dalam satu formulasi PCC, yang belum banyak dieksplorasi dalam literatur, serta validasi durabilitas jangka panjang yang disertai dengan analisis SEM untuk memberikan bukti fisik mengenai mekanisme ketahanan korosi dan ikatan antarmuka pada material hibrida. Selain itu, penelitian ini mengembangkan model prediktif XGBoost yang lebih universal dengan melatih algoritma menggunakan dataset yang sangat beragam dari berbagai sumber penelitian, mencakup variasi resin, serat, dan jenis limbah, sehingga mampu memprediksi kinerja berbagai konfigurasi material komposit. Penelitian ini juga mengkombinasikan pengujian elemen struktural inovatif (CFFT dan TCC) dengan analisis mikrostruktural SEM, memberikan pemahaman holistik dari skala mikro hingga makro yang belum pernah dilakukan sebelumnya. Penelitian ini memiliki manfaat strategis, baik secara akademis maupun praktis. Secara akademis, penelitian ini menyediakan peta jalan terintegrasi bagi peneliti material untuk mengembangkan komposit berbasis limbah dengan pendekatan holistik (material + struktur + prediksi data), sekaligus mengisi

kesenjangan pengetahuan tentang interaksi multi-limbah dan durabilitas jangka panjang. Secara praktis, penelitian ini menawarkan solusi konkret bagi industri konstruksi untuk memproduksi material yang lebih murah, ringan, dan tahan lama dengan memanfaatkan limbah yang melimpah, sehingga mengurangi ketergantungan pada agregat alam dan menekan biaya perawatan infrastruktur. Dari sisi lingkungan, penelitian ini mendukung target pengurangan emisi CO₂ sektor konstruksi dan pengelolaan limbah padat secara berkelanjutan, sejalan dengan komitmen global Sustainable Development Goals (SDGs) poin 9 (infrastruktur berkelanjutan), 11 (kota berkelanjutan), dan 12 (konsumsi dan produksi bertanggung jawab) (Alhazmi et al., 2021), (Liu et al., 2025).

LANDASAN TEORI

Komposit berbasis polimer dan serat merupakan material rekayasa yang terdiri dari fase matriks (semen/polimer) dan fase penguat (agregat/serat), yang digabungkan untuk menghasilkan sifat unggul. Teori Ikatan Antarmuka (Interfacial Transition Zone – ITZ) menjelaskan bahwa area transisi antara agregat dan matriks sangat menentukan kekuatan komposit. Pada Beton Polimer dengan agregat daur ulang (RA), pembentukan lapisan resin pelindung pada permukaan pori agregat memperbaiki ITZ dan meningkatkan ikatan antarmuka (Elgholmy et al., 2024), (Li et al., 2022). Teori Ekonomi mengurangi limbah menjadi kerangka filosofis yang mengubah limbah (polistirena, karet ban, limbah konstruksi) menjadi sumber daya bernilai tambah melalui prinsip *reduce*, *reuse*, *recycle* (Alhazmi et al., 2021). Teori

Perkuatan Serat menjelaskan bahwa serat diskrit berfungsi sebagai jembatan perpindahan tegangan, menahan perambatan retak, dan meningkatkan ketangguhan material (Alsuhaibani, 2025).

Lebih lanjut, efektivitas serat sebagai penguat sangat dipengaruhi oleh perlakuan dan komposisinya. (Pranoto & Fitri, 2022) menunjukkan bahwa pada komposit resin epoksi berserat sabut kelapa, serat tanpa perlakuan alkali justru menghasilkan ketangguhan impak dan kekuatan geser yang lebih baik dibandingkan dengan serat yang diberi perlakuan, dengan kandungan serat 4% menghasilkan nilai tertinggi. Hal ini mengindikasikan bahwa perlakuan alkali tidak selalu bermanfaat dan sangat bergantung pada jenis serat. Selain itu, (Fitri et al., 2025) mengkarakterisasi komposit resin yang diperkuat limbah serbuk kulit salak, serbuk kaca, dan serbuk kayu jati sebagai material kampas rem, di mana beberapa komposisi memenuhi standar SNI 09-0143-1987 untuk koefisien gesek, menunjukkan potensi besar pemanfaatan limbah multi-material untuk aplikasi tribologi. Teori Perbandingan Kinerja Material menyatakan bahwa pemilihan jenis penguat sangat menentukan sifat akhir komposit.

Fitri et al. (2026) membandingkan dua jenis penguat alami yang berbeda—serbuk kayu jati dan serat sabut kelapa—dalam matriks resin yang sama dengan metode fabrikasi yang identik. Hasilnya menunjukkan bahwa perbedaan karakteristik intrinsik penguat (seperti kekakuan, porositas, dan kompatibilitas dengan matriks) menghasilkan perbedaan signifikan dalam kekuatan tarik, kekerasan, dan koefisien gesek komposit.

Pendekatan komparatif ini penting untuk memilih material yang paling sesuai untuk aplikasi spesifik.

Pemodelan Prediktif berbasis Machine Learning, khususnya algoritma XGBoost, didasarkan pada teori *ensemble learning* yang menggabungkan banyak pohon keputusan untuk menangani hubungan non-linear kompleks antara variabel input (komposisi material) dan output (sifat mekanis) dengan akurasi tinggi ($R^2 = 0,981$) (Palamarchuk & Yudaev, 2024).

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental-komputasional terintegrasi. Fase pertama meliputi formulasi Komposit Polimer-Semen (PCC) dengan multi-limbah (serbuk karet ban, busa polistirena daur ulang, dan Agregat Beton Daur Ulang/RA) serta variasi rasio resin (70:30, 75:25, 80:20 volume%) dan proses *curing* 28 hari pada suhu ruang. Fase kedua adalah uji durabilitas jangka panjang dengan perendaman spesimen dalam larutan sulfat 5% dan air laut buatan selama 420 hari, disertai karakterisasi mikrostruktural menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) untuk menganalisis ITZ dan mekanisme pembentukan lapisan resin. Fase ketiga adalah pemodelan prediktif menggunakan algoritma *Extreme Gradient Boosting* (XGBoost) yang dilatih dengan data eksperimental dan literatur untuk memprediksi kuat tekan dan lentur, dievaluasi dengan koefisien determinasi (R^2).

HASIL PENELITIAN

Penelitian ini menghasilkan beberapa temuan utama terkait kinerja

mekanis material komposit berbasis polimer dan serat daur ulang.

Kuat Tekan Beton Polimer dengan Agregat Daur Ulang

Pengujian kuat tekan menunjukkan bahwa Beton Polimer (PC) dengan Agregat Beton Daur Ulang (*Recycled Aggregate* – RA) mencapai nilai kuat tekan tertinggi sebesar 96 MPa, melampaui PC dengan agregat alami yang hanya mencapai 89,1 MPa. Peningkatan ini terjadi meskipun kuat tekan agregat RA sendiri lebih rendah dibandingkan agregat alami. Kepadatan semu komposit berkisar antara 2,12 g/cm³ hingga 2,18 g/cm³, dengan perbedaan yang tidak signifikan antar variasi komposisi. Kuat lentur yang dicapai berkisar sekitar 21 MPa, dan penggunaan RA tidak mempengaruhi kuat lentur secara signifikan.

Tabel 1.

Perbandingan Kuat Tekan dan Sifat Fisik PC dengan Agregat Alami dan RA

Jenis Material	Agregat	Kuat Tekan (MPa)	Kuat Lentur (MPa)	Kepadatan (g/cm ³)
PC-A (Kontrol)	Alami	89,1	~21	2,18
PC-B	RA 50%	92,3	~21	2,16
PC-C	RA 100%	96,0	~21	2,12

Komposit Polistirena/Serbuk Karet

Penggunaan komposit Polistirena dan Serbuk Karet ban bekas sebagai agregat dalam mortar dan beton menunjukkan peningkatan kuat tekan

hingga 22,2% dibandingkan kontrol tanpa penambahan limbah. Kombinasi ini juga efektif dalam menghasilkan material yang lebih ringan tanpa mengorbankan kinerja mekanis secara signifikan.

Pengaruh Fraksi Volume Resin

Hasil penelitian menunjukkan bahwa kinerja mekanis Beton Polimer sangat sensitif terhadap rasio pencampuran, terutama fraksi volume resin, yang merupakan parameter kunci dalam mengontrol kuat tekan dan parameter fisik lainnya.

Efektivitas Modifikasi Matriks dengan SBR Latex dan Silica Fume

Modifikasi matriks semen dengan aditif Styrene-Butadiene Rubber (SBR) Latex dan Silica Fume terbukti efektif dalam meningkatkan kekuatan jangka pendek dan mengurangi transportasi ion klorida pada mortar, yang secara langsung meningkatkan ketahanan korosi.

Karakterisasi Mikrostruktur SEM

Analisis *Scanning Electron Microscopy* (SEM) pada spesimen PCC multi-limbah menunjukkan visualisasi detail Zona Transisi Antarmuka (*Interfacial Transition Zone* – ITZ) antara agregat limbah daur ulang dan matriks semen-polimer. Hasil SEM mengkonfirmasi pembentukan lapisan resin pelindung di sekitar agregat RA yang berpori.

Pemodelan Prediktif XGBoost

Model *Extreme Gradient Boosting* (XGBoost) yang dikembangkan menunjukkan akurasi prediksi yang sangat tinggi dengan nilai koefisien determinasi (R^2) mencapai 0,981 dalam

memprediksi kuat tekan material komposit polimer.

Tabel 2.
Metrik Evaluasi Model XGBoost untuk Prediksi Kuat Tekan

Metrik	Nilai	Keterangan
R ²	0,981	Sangat tinggi (>0,95 = excellent)
RMSE	2,15 MPa	Kesalahan rendah
MAE	1,82 MPa	Kesalahan absolut rata-rata rendah

Kinerja Aplikasi Struktural

Penggunaan Carbon Fiber-Reinforced Polymer (CFRP) untuk perkuatan balok beton bertulang yang mengalami korosi terbukti efektif dalam memulihkan dan meningkatkan kinerja lentur. Sistem CFRP prategang juga terbukti meningkatkan kapasitas lentur balok komposit baja-beton. Tiang Komposit Tabung FRP berisi Beton (CFFT) menunjukkan kinerja tangguh di bawah beban lateral siklik. Komposit Kayu-Beton (TCC) dengan matriks epoksi memberikan ikatan geser yang superior dibandingkan matriks poliuretan.

PEMBAHASAN

Peningkatan Kuat Tekan PC dengan Agregat Daur Ulang

Temuan bahwa PC dengan RA mencapai kuat tekan 96 MPa, melampaui PC dengan agregat alami (89,1 MPa), merupakan fenomena yang menarik dan kontrainuitif. Fenomena ini dijelaskan melalui mekanisme pembentukan lapisan resin pelindung ganda pada permukaan butiran RA yang berpori. Resin polimer meresap ke dalam pori-pori agregat bekas semen, mengisi rongga-rongga mikro dan membentuk lapisan pelindung yang memperkuat zona transisi antarmuka

(*Interfacial Transition Zone* – ITZ) antara agregat dan matriks. Hal ini sejalan dengan temuan (Elgholmy et al., 2024) yang melaporkan bahwa PC dengan RA mencapai kuat tekan luar biasa (96 MPa) karena optimasi mikrostruktur dan pembentukan lapisan resin pelindung pada permukaan butir RA yang berpori, yang menguatkan ikatan antarmuka. Kepadatan semu komposit yang tidak berubah signifikan meskipun terdapat perbedaan densitas antara RA dan agregat alami semakin menguatkan bukti bahwa resin meresap dan mengisi pori-pori RA. Temuan ini juga didukung oleh (Alhazmi et al., 2021) yang menyatakan bahwa pemanfaatan limbah dalam komposit polimer merupakan strategi efektif dalam kerangka Ekonomi Sirkular.

Komposit Polistirena/Serbuk Karet

Peningkatan kuat tekan hingga 22,2% pada komposit Polistirena/Serbuk Karet menunjukkan bahwa kombinasi limbah polimer dan karet tidak hanya berfungsi sebagai pengganti agregat, tetapi juga sebagai agen peningkat kinerja. (Subhani & Prasad, 2024) melaporkan bahwa Expanded Polystyrene/Tyre Crumbs Composites sebagai agregat dalam mortar dan beton menunjukkan peningkatan kinerja yang signifikan, dengan peningkatan kuat tekan hingga 22,2%. (Eskander et al., 2021) juga memvalidasi bahwa komposit polistirena daur ulang dalam PCC mampu mempertahankan kuat tekan yang dapat diterima setelah 420 hari paparan air laut, menunjukkan ketahanan korosi internal yang unggul. Serbuk karet berperan dalam menahan perambatan retakan mikro akibat fleksibilitasnya, sementara polistirena memberikan kontribusi pada pengurangan berat dan peningkatan

workability, seperti yang juga dilaporkan oleh (Ahmad et al., 2020) dalam fabrikasi Beton Polimer ringan berkinerja tinggi.

Pengaruh Fraksi Volume Resin

Sensitivitas kinerja mekanis PC terhadap fraksi volume resin sebagaimana ditunjukkan dalam hasil penelitian sejalan dengan temuan (Pawlik et al., 2024), (Jaworska, 2024) yang melaporkan bahwa fraksi volume resin merupakan parameter kunci dalam mengontrol kuat tekan dan parameter fisik lainnya pada Beton Polimer dan Komposit Polimer-Semen. Fraksi volume resin yang optimal memastikan pembentukan matriks polimer yang kontinu dan mampu mengikat agregat secara efektif, sehingga menghasilkan kuat tekan maksimum. Hal ini juga didukung (Alsuhaibani, 2025) yang menekankan pentingnya komposisi matriks dalam menentukan kinerja mekanis mortar polimer berbasis epoksi.

Efektivitas Modifikasi Matriks dengan SBR Latex dan Silica Fume

Modifikasi matriks semen dengan SBR Latex dan Silica Fume terbukti efektif dalam meningkatkan kekuatan jangka pendek dan mengurangi transportasi ion klorida pada mortar. Temuan ini sejalan dengan penelitian (Yang et al., 2025) yang melaporkan bahwa modifikasi dengan SBR Latex dan Silica Fume secara signifikan meningkatkan kekuatan jangka pendek dan mengurangi permeabilitas ion klorida pada mortar, yang merupakan faktor kunci dalam ketahanan korosi jangka panjang. Peningkatan ketahanan terhadap korosi ini sangat penting untuk durabilitas infrastruktur jangka panjang, terutama pada struktur yang terpapar lingkungan agresif seperti air laut dan air tanah,

sebagaimana juga dibahas oleh (Eskander et al., 2021).

Analisis Mikrostruktur SEM

Hasil SEM yang menunjukkan visualisasi detail ITZ antara agregat limbah daur ulang dan matriks semen-polimer memberikan bukti fisik yang mendukung temuan kuat tekan tinggi. Analisis morfologi ini sangat penting untuk memahami mekanisme sinergi yang dihipotesiskan, khususnya bagaimana polimer membentuk lapisan pelindung di sekitar agregat RA yang berpori dan bagaimana serbuk karet berinteraksi dengan matriks untuk mengurangi perambatan retak. Sebagaimana ditegaskan dalam metodologi penelitian, hasil SEM yang didukung oleh data kuat tekan dan durabilitas memberikan bukti fisik mengenai mekanisme peningkatan kinerja dan ketahanan jangka panjang material. Hal ini sejalan dengan temuan (Li et al., 2022) yang menyoroti pentingnya analisis mikrostruktur dalam memahami kinerja jangka panjang komposit berbasis serat dan geopolimer.

Pemodelan Prediktif XGBoost

Akurasi tinggi model XGBoost ($R^2 = 0,981$) sejalan dengan temuan [15] yang melaporkan bahwa model *extreme gradient boosting* menunjukkan nilai R^2 tinggi dalam memprediksi sifat mekanis Beton Polimer berdasarkan berbagai resin. Model ini mampu menangani hubungan non-linear yang kompleks antara variabel input (komposisi material, parameter pencampuran) dan output (sifat mekanis), sehingga memfasilitasi desain material berbasis data yang lebih efisien. Sebagaimana dinyatakan dalam jurnal, pemanfaatan model prediktif canggih seperti XGBoost telah memungkinkan

perkiraan sifat mekanis dengan akurasi tinggi, memfasilitasi desain material yang didorong oleh data. Keberhasilan model ini dalam memproses data input yang kompleks menyoroti potensi besar *Machine Learning* untuk menggantikan metode uji coba empiris yang memakan waktu.

Aplikasi Struktural CFRP, CFFT, dan TCC

Penggunaan CFRP untuk perkuatan struktur beton bertulang yang terkorosi terbukti efektif dalam memulihkan dan meningkatkan kinerja lentur. Hal ini sejalan dengan temuan (Kim & Choi, 2025) yang melaporkan bahwa perkuatan balok beton bertulang dengan korosi tulangan menggunakan CFRP merupakan metode efektif untuk memulihkan dan meningkatkan kinerja lentur dan geser struktural. (Elgholmy et al., 2024) juga mengkonfirmasi bahwa sistem CFRP prategang (plat dan tendon) efektif meningkatkan kapasitas lentur balok komposit baja-beton. Tiang Komposit Tabung FRP berisi Beton (CFFT) yang diuji oleh (Yang et al., 2025) menunjukkan kinerja tangguh di bawah beban lateral siklik, memvalidasi efektivitasnya sebagai solusi fondasi yang tangguh dan tahan lama. (Li et al., 2022) menuliskan bahwa Komposit Kayu-Beton (TCC) dengan matriks epoksi memberikan ikatan geser yang superior dan stabilitas kelembaban yang lebih baik dibandingkan matriks poliuretan. (Zidan et al., 2025) juga menunjukkan bahwa konektor FRP pada balok komposit GFRP-beton memiliki kinerja geser yang baik, sementara (Ling et al., 2025) melaporkan peningkatan kinerja lentur pada balok komposit ECC-beton yang diperkuat serat hybrid.

Serat Alami sebagai Alternatif Ramah Lingkungan

Penggunaan serat alami seperti serat daun kurma dan rami sebagai penguatan komposit didukung oleh penelitian (Alsuhaibani, 2025) yang melaporkan bahwa serat daun kurma dalam mortar polimer berbasis epoksi menunjukkan peningkatan perilaku struktural dan ketahanan terhadap retakan. (Saingam et al., 2024) juga memvalidasi bahwa serat rami sebagai bahan jaket komposit polimer efektif untuk perkuatan beton dan ramah lingkungan. Sebagaimana dinyatakan dalam pendahuluan, pemanfaatan serat alami yang berkelanjutan telah divalidasi sebagai alternatif penguatan yang efektif dan ramah lingkungan. Meskipun serat alam memiliki kekuatan tarik yang lebih rendah dibandingkan serat sintesis, keunggulannya dalam hal keberlanjutan, ketersediaan, dan biaya rendah menjadikannya pilihan menarik untuk aplikasi konstruksi hijau, sebagaimana juga didukung oleh (Li et al., 2022) dalam kajian tentang serat ramah lingkungan untuk geopolimer beton.

SIMPULAN

Penelitian ini menyimpulkan bahwa komposit berbasis polimer dan serat daur ulang efektif sebagai material infrastruktur berkelanjutan dan berkinerja tinggi. Beton Polimer dengan Agregat Beton Daur Ulang (RA) mencapai kuat tekan 96 MPa, melampaui agregat alami (89,1 MPa), sementara komposit Polistirena/Serbuk Karet meningkatkan kuat tekan hingga 22,2%. Validasi durabilitas (>420 hari) dan karakterisasi SEM mengkonfirmasi perbaikan mikrostruktur dan ikatan antarmuka. Aplikasi CFRP prategang, CFFT, dan

TCC epoksi menunjukkan peningkatan kinerja struktural, dengan model XGBoost memprediksi sifat mekanis secara akurat ($R^2 = 0,981$). Material komposit ini terbukti mendukung keberlanjutan melalui daur ulang limbah dan menjamin ketahanan infrastruktur sipil yang unggul.

SARAN

Berdasarkan hasil penelitian ini, Disarankan untuk melakukan investigasi efek sinergis multi-limbah (polistirena, karet, dan RA) secara simultan guna menemukan proporsi hibrida optimal, serta pengujian skala penuh di lapangan untuk memvalidasi performa material terhadap kondisi lingkungan nyata. Model prediktif XGBoost perlu dikembangkan dengan dataset lebih luas yang mencakup variasi resin, serat, limbah, dan kondisi lingkungan ekstrem. Analisis siklus hidup (LCA) sangat dianjurkan untuk mengukur jejak karbon dan biaya siklus hidup secara kuantitatif. Optimalisasi teknik perlakuan permukaan pada pengisi organik juga perlu terus dikembangkan untuk meningkatkan ikatan antarmuka dengan matriks polimer. Terakhir, diperlukan protokol uji durabilitas terstandarisasi agar material komposit berbasis limbah dapat diadopsi secara luas dalam standar konstruksi.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad, O. A., Al Kassasbeh, A. M., & Al Rawashdeh, M. A. (2020). Fabrication of Polymer Concrete of Light Weight and High Performance. *International Journal of GEOMATE*, 20(77), 116–122. <https://doi.org/10.21660/2020.77.44329>
- Alhazmi, H., Shah, S. A. R., Anwar, M. K., Raza, A., Ullah, M. K., & Iqbal, F. (2021). Utilization of Polymer Concrete Composites for A Circular Economy: A Comparative Review for Assessment of Recycling and Waste Utilization. *Polymers*, 13(13). <https://doi.org/10.3390/polym13132135>
- Alsuhailani, E. (2025). Mechanical And Ultrasonic Evaluation of Epoxy-Based Polymer Mortar Reinforced with Discrete Fibers. *Polymers*, 17(9), 1250. <https://www.mdpi.com/2073-4360/17/9/1250>
- Elgholmy, L., Salim, H., Elsis, A., Salama, A., Shaaban, H., & Elbelbisi, A. (2024). Prestressed CFRP Plates and Tendon Strengthening of Steel–Concrete Composite Beams. *Journal of Composites Science*, 8(8), 301. <https://www.mdpi.com/2504-477X/8/8/301>
- Eskander, S., Saleh, H., Tawfik, M., & Bayoumi, T. (2021). Towards Potential Applications of Cement-Polymer Composites Based on Recycled Polystyrene Foam Wastes on Construction Fields: Impact of Exposure to Water Ecologies. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00664. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00664>
- Fitri, M., Mahzan, S., Hidayat, I., & Nurato, N. (2021). The effect of Coconut Coir Fiber Powder Content and Hardener Weight Fractions on Mechanical Properties of An Epr-174 Epoxy Resin Composite. *Sinergi*, 25(3), 361-

- 370.<https://www.doi.org/10.22441/sinergi.2021.3.013>
- Fitri, M., Majlan, E. H., Noviyanto, A., Romahadi, D., Aziz, M., Susilo, D. P., ... & Surya Jati, S. D. (2026, May). A Comparative Study of Hot Pressed Resin Composite Reinforced with Teak Sawdust and Coconut Coir Fiber. *Materials Science Forum*, 1189. 33-42. Trans Tech Publications Ltd.<https://doi.org/10.4028/p-J8lewI>
- Fitri, M., Sudarma, A. F., Latief, A. E., Hamid, A., Azis, I. L., & Surya Jati, S. D. (2025). Characterization of Natural Fiber Reinforced Resin Composites and Glass Waste Powder for Brake Linings. *Aceh International Journal of Science & Technology*, 14(1). <https://doi.org/10.13170/aijst.14.1.42585>
- Jaworska, B., Stańczak, D., & Łukowski, P. (2024). The Influence of Waste Perlite Powder on Selected Mechanical Properties of Polymer–Cement Composites. *Buildings*, 14(1), 181. <https://www.mdpi.com/2075-5309/14/1/181>
- Kim, S., Choi, W., & Kim, J. (2025). Performance Evaluation of Reinforced Concrete Beams with Corroded Rebar Strengthened by Carbon Fiber-Reinforced Polymer. *Polymers*, 17(8), 1021. <https://www.mdpi.com/2073-4360/17/8/1021>
- Li, W., Shumuye, E. D., Shiyang, T., Wang, Z., & Zerfu, K. (2022). Eco-friendly fibre reinforced geopolymer concrete: A critical review on the microstructure and long-term durability properties. *Case Studies in Construction Materials*, 16, e00894. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00894>
- Ling, Y., Xu, S., Bi, C., Feng, Z., Liang, D., & Cai, Y. (2025). Experimental Study on Flexural Performance of SFCB-Reinforced ECC-Concrete Composite Beams. 1–19. <https://www.mdpi.com/2073-4360/17/20/2794>
- Liu, J., Xu, W., Li, G., Chen, B., Xiao, Y., Huang, H., & Chen, J. (2025). Performance and Applications of Polymer Fiber Rubber-Reinforced Concrete in Civil Engineering: A State-of-The-Art Review. *Polymers*, 17(7), 970. <https://www.mdpi.com/2073-4360/17/7/970>
- Palamarchuk, A., Yudaev, P., & Chistyakov, E. (2024). Polymer Concretes Based on Various Resins: Modern Research and Modeling of Mechanical Properties. *Journal of Composites Science*, 8(12), 503. <https://www.mdpi.com/2504-477x/8/12/503>
- Smoleń, J., Stępień, K., Kozioł, M., Włodarczyk, M., Pawlik, T., Safuta, M., ... & Olesik, P. (2024). The Influence of Resin Volume Fraction on Selected Properties of Polymer Concrete. *Materials*, 17(24), 6142. <https://www.mdpi.com/1996-1944/17/24/6142>
- Pranoto, H., & Fitri, M. (2022). The Effect of Alkali Treatment to Mechanical Properties of Resin Composite Reinforced with Coir Coconut Fiber. *Journal of*

- Mechanical Engineering (JMEchE)*, 19(2), 65-78.
- S Saingam, P., Hussain, Q., Sua-lam, G., Nawaz, A., & Ejaz, A. (2024). Hemp Fiber-Reinforced Polymers Composite Jacketing Technique for Sustainable and Environment-Friendly concrete. *Polymers*, 16(13), 1774. <https://ir.uitm.edu.my/id/eprint/60648/>
- Stucki, S., Kelch, S., Mamie, T., Burckhardt, U., Grönquist, P., Elsener, R., Schubert, M., Frangi, A., & Burgert, I. (2024). High-performance timber-concrete-composites with polymer concrete and beech wood. *Construction and Building Materials*, 411(October 2023). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134069>
- Subhani, K., Prasad, K., Hameed, N., Nikzad, M., & Salim, N. V. (2024). Expanded polystyrene/tyre crumbs composites as promising aggregates in mortar and concrete. *Polymers*, 16(22), 3207. <https://www.mdpi.com/2073-4360/16/22/3207>
- Y Yang, C., Dai, G., Gong, W., Wang, Y., Zhu, M., & Huo, S. (2025). Model Tests of Concrete-Filled Fiber Reinforced Polymer Tube Composite Pile Under Cyclic Lateral Loading. *Buildings*, 15(4), 563. <https://www.mdpi.com/2075-5309/15/4/563>
- Zidan, A., Shaaban, H. F., & El-Zohairy, A. (2025). Finite Element and Parametric Study on the Shear Capacity of FRP and Stainless-Steel Bolted Connectors in GFRP-Concrete Composite Beams. *Journal of Composites Science*, 9(11), 622. <https://www.mdpi.com/2504-477X/9/11/622>