

# Perbaikan Sifat Mekanik, *Thermal*, dan DMA Komposit Polyester Diperkuat Serat Waru/ $\text{CaCO}_3$

Suteja

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Mataram

Syarif Hidayatullah

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Mataram

Address: Jl. Majapahit No. 62 Mataram

Korespondensi Penulis : [suteja@unram.ac.id](mailto:suteja@unram.ac.id)

**Abstract.** *Natural fibers continue to attract the interest of researchers to develop them as composite reinforcements in automotive and non-construction building interior applications. Basically, natural fiber-reinforced polymer composites are not suitable for applications exposed to heat. Investigating changes in mechanical properties due to temperature increases, this research is very important to conduct. The addition of filler ( $\text{CaCO}_3$ ) is known to improve the performance of natural fiber-reinforced polymer composites. This study investigates the physical, mechanical, and thermal properties of polyester composites reinforced with waru fibers with  $\text{CaCO}_3$  powder filler. The composites were fabricated using the hand lay-up method with a volume fraction of 30% waru fibers and  $\text{CaCO}_3$  powder with a volume fraction of 0-10%. The density of the polyester composite increased from 1.42 to 1.68 and 1.87  $\text{g/cm}^3$  as the volume fraction  $\text{CaCO}_3$  0-10%. The results of dynamic mechanical analysis (DMA) testing of the polyester composite showed that parameters such as loss modulus, storage modulus, and tan delta also increased with increasing  $\text{CaCO}_3$  content. Thermogravimetric analysis (TGA) testing also showed increased thermal resistance after the addition of 5% (wt) (STL) and 10% (wt) (ZMB) with a residual combustion of 6.54% and 7.89% for each STL and ZMB composite, respectively. Compared to the TKO composite, it had the lowest combustion residue of 3.61%. Tensile strength and elastic modulus showed the same trend, namely an increase, while the elongation of the composite decreased with the addition of  $\text{CaCO}_3$  powder. The overall test results showed that polyester composites reinforced with CWf fibers and  $\text{CaCO}_3$  fillers were suitable for automotive and building interior applications.*

**Keywords:** *Polyester Composites,  $\text{CaCO}_3$  Powder, DMA, TGA, Tensile Strength.*

## LATAR BELAKANG

Komposit polymer dari resin poliester tak jenuh (UPR) banyak digunakan di berbagai bidang seperti teknik kimia, konstruksi, transportasi, dan dirgantara karena harganya yang murah, kemudahan pengolahan, sifat mekanik yang unggul, ketahanan terhadap korosi dan kimia serta ketahanan terhadap cuaca (Dou et al., 2024). Disamping itu komposit polyester – serat waru masih lemah akibat perubahan rantai polymer ketika

terpapar panas dan penyerapan air yang signifikan. Sehingga aplikasinya masih terbatas karena performa yang masih dibawah material konvensional lainnya. Disamping itu, peningkatan produk serat alami seperti serat kulit waru telah menarik banyak penelitian karena keberlanjutan lingkungannya dan dorongan menuju produk yang lebih ramah lingkungan (Gapsari et al., 2021a; Wirawan et al., 2022a). Dengan resin polyester yang perlu ditingkatkan performanya serta ketersediaan serat alam yang melimpah menjadi solusi untuk pengembangan komposit polimer. Komposit polyester yang diperkuat serat kulit waru semakin banyak digunakan sebagai alternatif berkelanjutan untuk bahan tradisional. Namun, kinerjanya sangat bergantung pada adhesi antara matriks polimer dan serat tambahan (Gapsari et al., 2021b). Serat kulit waru telah terbukti dapat meningkatkan sifat fisik, mekanik, dan termal polimer ketika dicampur dalam proporsi yang tepat. Meskipun telah terjadi berbagai kemajuan dalam meningkatkan kinerja komposit serat kulit waru, kerentanan mereka terhadap kelembaban, penyerapan air, dan pengikisan tetap menjadi tantangan yang signifikan (Gapsari, Purnowidodo, Setyarini, Hidayatullah, et al., 2022; Şomoghi et al., 2024). Modifikasi penguatan dengan pengisi berupa serbuk dianggap sebagai metode ideal karena sederhana, efektif dan memerlukan biaya rendah. Metode ini juga memiliki keunggulan dapat mempertahankan sifat asli bahan. Penambahan pengisi berskala nano ke dalam komposit polimer yang diperkuat serat kulit waru merupakan metode untuk meningkatkan sifat mekanik komposit polyester. Penambahan serbuk CaCO<sub>3</sub> mampu meningkatkan kekuatan tarik karena mengurangi indeks kristalinitas senyawa *amorf* dalam serat kulit waru dan pembentukan ikatan hidrogen baru dalam komposit polyester (Istiqlaliyah et al., 2024; Kennedy et al., 2025). Nanofillers secara signifikan meningkatkan sifat mekanik komposit: kekuatan tarik, modulus, kekuatan lentur, dan kekuatan benturan. Fillers memperkuat interaksi antara serat alami dan matriks polimer. Hal ini memudahkan perpindahan tegangan antara lapisan serat dan matriks.

Meskipun studi sebelumnya menunjukkan hasil positif, perlu diamati perilaku komposit baru dengan penguat serat kulit waru dengan modifikasi penambahan bubuk pengisi berupa CaCO<sub>3</sub> (Gapsari, Purnowidodo, Setyarini, Hidayatullah, et al., 2022). Penambahan pengisi yang tidak tepat menyebabkan penurunan elongasi komposit pada saat patah. Peningkatan kekuatan tarik pada komposit timoho murni yang diperkuat (10–30% vol) disebabkan oleh kemampuan poliester untuk melapisi penguat secara sempurna, sehingga membentuk ikatan antarmuka yang baik dan padat antara poliester dan serat

alam. Namun, nilai modulus elastisitas dan elongasi lebih tinggi pada komposit timoho poliester yang diperkuat dengan pengisi 30% serbuk cangkang telur. Komposit timoho dengan 10% serbuk cangkang telur juga menunjukkan kekuatan lentur dan dampak maksimum karena kemampuan partikel pengisi untuk mendukung transfer tegangan antara matriks dan serat, serta ikatan antarmuka yang kuat akibat perlakuan kimia pada serat timoho. Komposit yang mengandung pengisi menunjukkan nilai kekerasan yang dapat diterima karena resistansi partikel pengisi terhadap gaya indentasi yang menyebabkan deformasi. Pengisi meningkatkan ketahanan termal komposit poliester yang diperkuat timoho, terutama komposit timoho – *filler* 30% cangkang telur yang memiliki jumlah pengisi maksimum. Krishnudu et al. (2020) telah mengembangkan komposit hibrida yang diperkuat serat kelapa dan *Luffa cylindrica* dengan *filler* CaCO<sub>3</sub>. Mereka melaporkan bahwa komposit hibrida serat sabut kelapa/*Luffa cylindrica*/serat sabut kelapa dengan kandungan 2 g memiliki karakteristik termal dan mekanik dinamis yang tinggi dibandingkan dengan sampel komposit lainnya. Grafik Cole-Cole menunjukkan ikatan yang sangat baik antara serat, pengisi, dan matriks. Mereka juga menyimpulkan bahwa komposit dengan kandungan pengisi 2 g dapat digunakan dalam aplikasi teknik besar berkat sifat mekanik dinamisnya yang ditingkatkan.

Investigasi saat ini telah memodifikasi resin polyester sebagai komposit dengan menambahkan pengisi CaCO<sub>3</sub> yang diperkuat serat kulit waru. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengembangkan dan mengevaluasi sifat fisis, stabilitas termal, DMA dan sifat mekanik akibat variasi serbuk CaCO<sub>3</sub>. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi dan data rinci mengenai komposit polyester diperkuat serat kulit waru dengan berbagai variasi pengisi CaCO<sub>3</sub>. Sehingga menjadi acuan dalam penelitian, pengembangan serta pengaplikasian komposit ini sebagai interior struktur bangunan ataupun otomotif.

## **METODE PENELITIAN**

### **Material**

Matrik polyester dibeli dari PT Justus Kimia Raya, Surabaya, Indonesia dengan density dan kekuatan tarik masing-masing sebesar 2.63 g/cm<sup>3</sup> dan 78.07 MPa berturut-turut. Sedangkan lembaran serat waru, didapat dengan proses ekstraksi mengikuti metode yang dilaporkan oleh (Suteja et al., 2025a), serat waru memiliki density dan kekuatan tarik sebesar 0.6 g/cm<sup>3</sup> dan 207.3 MPa (Wirawan et al., 2022). Selanjutnya, serbuk CaCO<sub>3</sub>

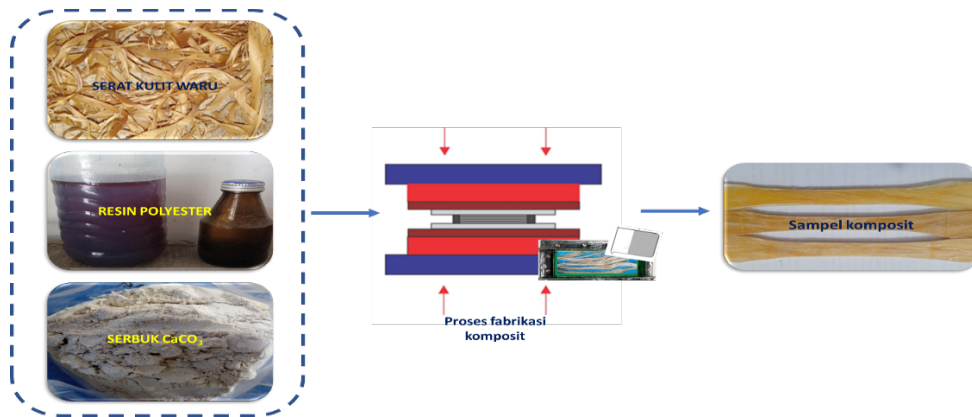
kemurnian  $\geq 97\%$  dibeli dari RW Chem (Cina) dengan ukuran partikel sekitar 60 – 80 nm dan luas permukaan 20 m<sup>2</sup>/g.

### **Perlakuan kimia serat waru**

Lembaran serat waru hasil ekstraksi dicuci sampai lilin dan impurities lainnya yang menempel pada serat larut. Mereka selanjutnya direndam dalam larutan NaOH 9% (wt) selama 2 jam (Gapsari et al., 2021). Konsentrasi ini dipilih karena merupakan kondisi optimal, setelah konsentrasi meningkat terjadi kehilangan senyawa selulosa berlebih yang berperan penting dalam penguatan serat serta menimbulkan cacat pada serat yang melemahkan kekuatan tarik. Proses ini diikuti pembilasan dengan air mengalir sampai didapat pH netral. Serat waru kemudian dikeringkan di bawah sinar matahari langsung dengan *moisture content* ~20% dan selanjutnya disimpan di dalam plastik kedap udara dan siap digunakan.

### **Fabrikasi komposit polyester**

Komposit waru modifikasi serbuk CaCO<sub>3</sub> difabrikasi dengan menggunakan metode cetakan *hand lay up*. Lembaran serat waru dipotong dengan lebar 3-5 mm dan panjang mengikuti standar ASTM D368-03 dan untuk uji DMA dimensi sampel komposit p x l x t masing-masing 50 x 12,5 x 3 mm. Longitudinal serat sejajar ditempatkan pada cetakan baja. Disamping itu, Polyester dan serbuk CaCO<sub>3</sub> (komposisi lihat tabel 1) dicampur dengan mixer kecepatan tinggi selama 5 menit dan dibiarkan selama 1 menit untuk menghilangkan gelembung udara yang dihasilkan. Katalist (*metyl ethyl keton peroxide*) 1% dari berat polyester ditambahkan dan diaduk manual sekitar 1 menit. Adonan kemudian dituangkan ke dalam cetakan yang berisi serat waru. Beban dengan berat 15 kg diletakkan di atas cetakan selama 12 jam temperatur ruangan. akhirnya, sampel komposit kering dikeluarkan dan *finishing* sesuai standar uji.



Gambar 1. (a) serat CWf, (b) serbuk CaCO<sub>3</sub>, (c) polyester + katalist, dan (d) komposit hasil fabrikasi.

Tabel 1 desain dan komposisi komposit yang dikembangkan.

Kode	Serat waru (CWf)	Filler serbuk CaCO <sub>3</sub>	Polyester + katalist
TKO	30	0	70
STL		5	65
ZMB		10	60

## Karakterisasi komposit

### Densitas

Nilai densitas komposit serat waru-polyester dengan *filler* serbuk CaCO<sub>3</sub> diukur dengan menggunakan densimeter. Perhitungan densitas komposit menggunakan persamaan (1). Berat sampel komposit (g) ditimbang terlebih dahulu menggunakan timbangan digital (0.001 g) kemudian sampel komposit direndam ke dalam gelas ukur untuk mendapatkan perubahan volume yang terjadi (m). Sedangkan densitas teoritis komposit dihitung dengan mengacu pada penelitian yang telah dilaporkan oleh (Andoko et al., 2024).

$$\rho = \frac{g}{m} \quad (1)$$

### Pengujian Dynamic Mechanic Analysis (DMA)

Uji *Dynamic Mechanical Analysis* menggunakan instrument NETZSCH DMA 242 dengan mode *three point bending*. Modulus storage, loss modulus, dan faktor kerugian ( $\tan \delta$ ) dari spesimen komposit serat waru-polyester dengan *filler* serbuk CaCO<sub>3</sub> diukur sebagai fungsi suhu (-100°C hingga 100°C) yang dilengkapi dengan perlengkapan pembengkokan kantilever ganda pada frekuensi 10 Hz dan laju konstan pemanasan 10°C/menit.

### **Pengujian *Thermogravimetric analysis* (TGA)**

Analisis *termogravimetri* (TGA) dilakukan menggunakan TGA-1 Metler Toledo untuk mengamati perubahan suhu terhadap stabilitas massa komposit serat waru-polyester dengan *filler* serbuk  $\text{CaCO}_3$ . Uji TGA dijalankan dalam mode ramp pada suhu 50-1000 °C dalam atmosfer nitrogen dengan laju aliran 50 mL/min dan laju pemanasan yang digunakan 20 °C/min<sup>1</sup>.

### **Pengujian Tarik**

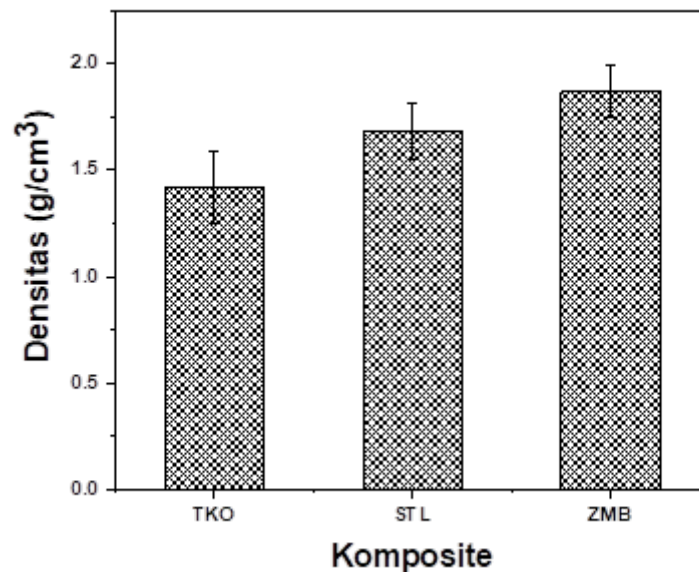
Uji tarik dilakukan sesuai dengan standar ASTM D638-03 menggunakan universal tensile mechine kapasitas 5 ton, model RTG 1310 INSTRON yang disuplai oleh M/S Microtech Pune dengan kecepatan cross head 0.5 mm/ menit, pengujian tarik komposit di lakukan pada temperature 26.7 °c dan kelembaban relative sebesar 56%. Untuk setiap pengujian dan jenis komposit yang berbeda terdapat lima benda uji diuji dan nilai rata-ratanya dilaporkan.

## **HASIL DAN PEMBAHASAN**

### **Analisi Densitas Komposit**

Gambar 2 menunjukkan pengaruh *filler* serbuk  $\text{CaCO}_3$  terhadap densitas komposit polyester diperkuat serat CWf. Komposit polyester mengalami peningkatan yang signifikan dengan bertambahnya *filler* serbuk  $\text{CaCO}_3$ . Komposit TKO (tanpa *filler* serbuk  $\text{CaCO}_3$ ) memiliki densitas paling rendah dibandingkan dengan komposit polyester dengan adanya *filler* serbuk  $\text{CaCO}_3$  (komposit STL dan ZMB). Semakin tinggi kandungan *filler* serbuk  $\text{CaCO}_3$  dari 0.5 dan 10% (wt) dalam komposit polyester – CWf maka densitas mengalami peningkatan dari 1.42, menjadi 1.68 dan 1.87 g/cm<sup>3</sup> berturut-turut. Hasil ini sesuai dengan *filler* cangkang siput yang ditambahkan ke dalam komposit polyester diperkuat serat karbon-serat kapok (Diharjo et al., 2024). Alasan utama penyebab meningkatnya densitas ini dikarenakan oleh densitas dari masing-masing penyusun komposit. Dimana diketahui bahwa densitas serbuk  $\text{CaCO}_3$  (2.71 g/cm<sup>3</sup>)

memiliki kepadatan lebih tinggi dibandingkan dengan densitas bahan penyusun komposit lainnya seperti matrik polyester ( $2.63 \text{ g/cm}^3$ ) dan serat CWf ( $0.6 \text{ g/cm}^3$ ).



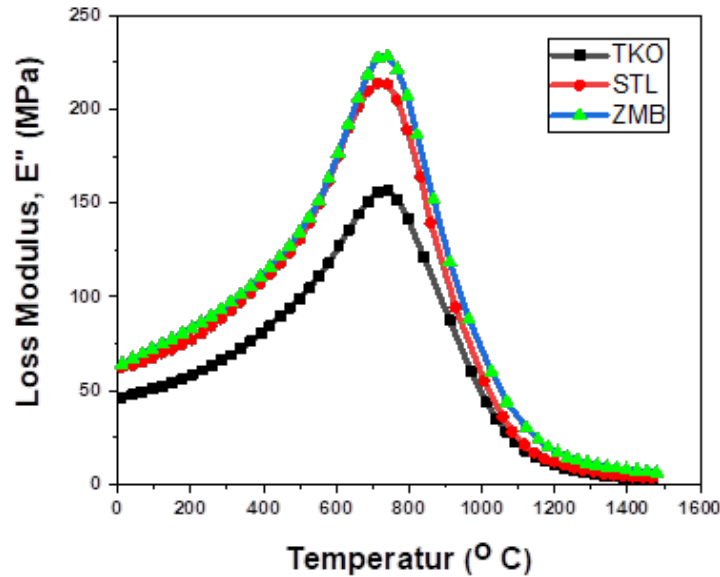
Gambar 2 densitas komposit.

Material komposit dengan densitas rendah tentu akan memberikan implikasi positif ketika diaplikasikan, pada struktural ringan akan meningkatkan efisiensi struktural berbasis rasio kekuatan dan kekakuan spesifik. Sedangkan pada bidang otomotif akan menghemat bahan bakar kendaraan, tentu dengan memperhatikan kekuatan spesifiknya.

### ***Dynamic Mechanic Analysis***

#### **Loss modulus**

Analisis mekanik dinamis (DMA) digunakan untuk menyelidiki perilaku reologi *solid-state* material komposit polyester, identifikasi suhu transisi gelas material serta perkiraan sifat viskoelastik bahan polimer. Gambar 3 menampilkan loss modulus komposit polyester diperkuat CWf dengan perbedaan *filler* serbuk  $\text{CaCO}_3$  terhadap kenaikan temperatur kondisi komposit. Komposit yang dikembangkan penambahan *filler* snail powder dari 0-10 (wt%) meningkatkan nilai *loss* modulus komposit polyester-CWf. Loss modulus mewakili kapasitas disipasi energi dengan semakin meningkatnya *filler* serbuk  $\text{CaCO}_3$ . Dengan penambahan *filler* berupa serbuk  $\text{CaCO}_3$ , puncak loss modulus menjadi lebih tinggi karena berkurangnya batasan pergerakan molekul polimer yang disebabkan oleh adanya serat yang kurang kaku.

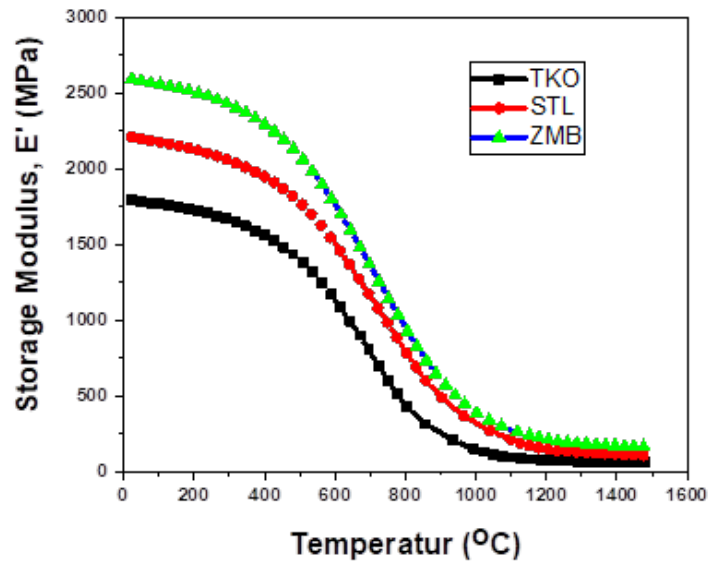


Gambar 3 kurva Loss modulus dari komposit polyester.

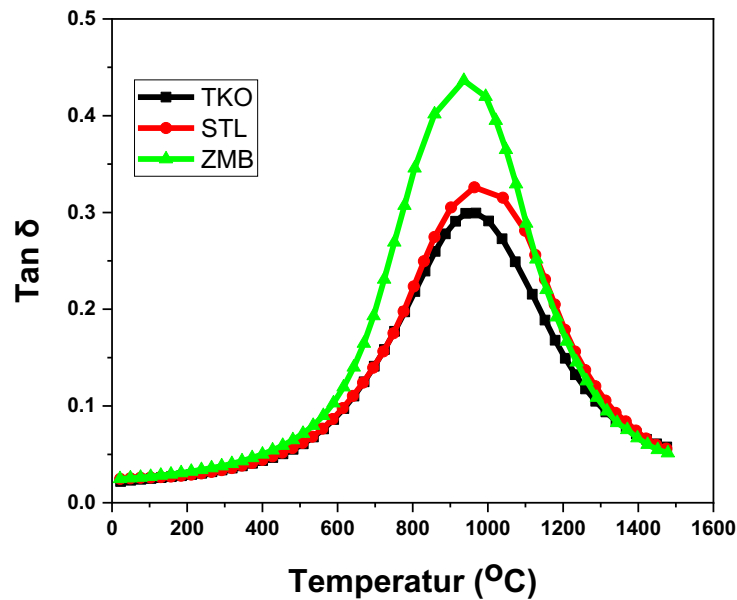
Selanjutnya untuk komposit polyester yang dikembangkan seperti yang ditunjukkan pada gambar 3. Puncak kurva *loss* modulus menunjukkan pembuangan panas tertinggi yang dimiliki oleh komposit ZMB kemudian diikuti oleh komposit STL dan TKO. Puncak *loss* modulus masing-masing komposit TKO, STL dan ZMB sebesar 156.59, 213.91 dan 228.44 MPa. Fenomena ini terjadi pada temperatur dimana *loss* modulus paling tinggi dan mencerminkan temperatur transisi gelas ( $T_g$ ) dari system (Diharjo et al., 2024). Nilai *loss* modulus komposit memiliki trend yang linier dengan penambahan fraksi volume serbuk  $\text{CaCO}_3$ . Fenomena ini juga dapat menjelaskan bahwa terjadinya gesekan internal yang meningkat sehingga disipasi energi pada komposit juga meningkat (Afzaluddin et al., 2019; Sughanthy et al., 2020).

Kurva *storage* modulus komposit polyester menyajikan informasi mengenai kekakuan, ikatan bahan penyusun komposit serta kekakuan komposit. Gambar 4 menggambarkan perilaku dari *storage* modulus komposit polyester diperkuat CWf dengan *filler*  $\text{CaCO}_3$  berbeda 0, 5, 10% (wt). Penambahan *filler* snail powder berbepan penting dalam peningkatan sifat mekanik komposit polyester-serat CPd. *Storage* modulus masing-masing komposit TKO, STL dan ZMB menurun dari 1800 ke 63.54, 2212.82 ke 257.25 dan 2593.34 ke 165.32 MPa berturut-turut. terdapat tiga area akibat meningkatnya temperatur pada *storage* modulus komposit. Area pertama merupakan area material bersifat padat dan kaku karena rantai polimernya yang kaku. Area kedua menunjukkan bahwa *storage* modulus menurun seiring dengan naiknya temperatur melebihi temperatur

glass transisi ( $T_g$ ) yang disebabkan oleh peningkatan mobilitas rantai polimer. Kemudian daerah ketiga merupakan daerah ketiga merupakan daerah *rubbery*, temperatur yang lebih tinggi mempercepat mobilitas material dan tidak ada perubahan signifikan dari daerah transisi dalam storgae modulus komposit yang diamati (Suteja et al., 2025).



Gambar 4 kurva storage modulus dari komposit polyester.



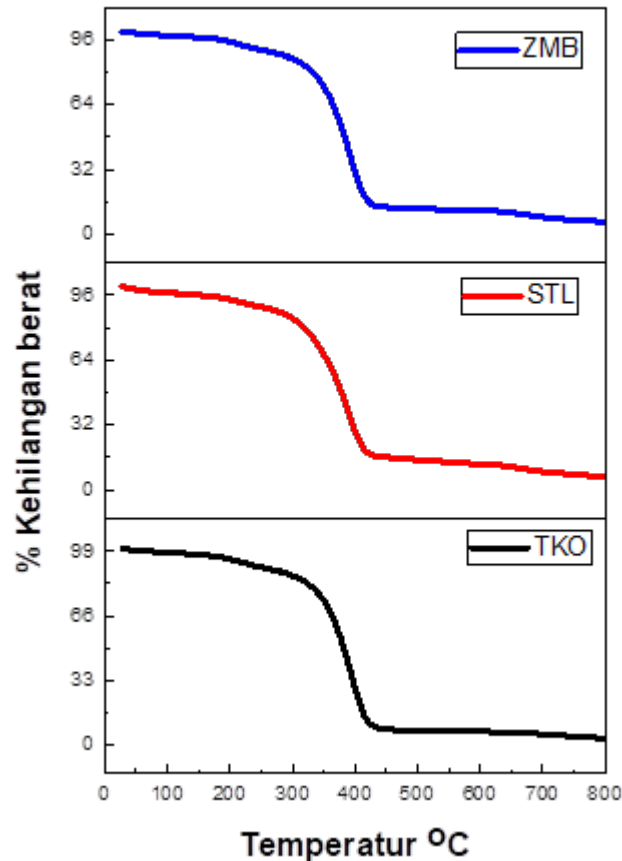
Gambar 5 kurva tan delta dari komposit polyester.

Gambar 5 menampilkan menggambarkan tan  $\delta$  dari komposit polyester diperkuat serat CWf dengan *filler* serbuk  $\text{CaCO}_3$ . Hadirnya serbuk  $\text{CaCO}_3$  di dalam komposit sangat mempengaruhi Nilai tan  $\delta$ . Nilai tan  $\delta$  mengalami peningkatan dari 0.28, 0.33 dan 0.42

masing-masing untuk sampel TKO, STL dan ZMB berturut-turut. Hal ini merupakan akibat dengan bertambahnya kandungan serbuk CaCO<sub>3</sub> di dalam komposit dari 0, 5 dan 10% (wt). Dari hasil ini diketahui bahwa, keberadaan serbuk CaCO<sub>3</sub> lebih berperan dalam meningkatkan kekakuan dari komposit polyester diperkuat CWf sesuai dengan meningkatnya nilai  $\tan \delta$ . Peningkatan faktor damping seiring dengan peningkatan rasio penguat seperti serat kaca dan karbon disebabkan oleh matriks dan degradasi antarmuka dalam sistem material (Idicula et al., 2005).

### ***Thermogravimetric Analysis (TGA)***

Pengujian TGA sampel dilakukan dalam kisaran suhu pada 30 – 800 °C yang dilanjutkan dengan pemaparan analisis terlihat pada gambar 6. Penggabungan *filler* serbuk CaCO<sub>3</sub> ke dalam matriks polyester meningkatkan stabilitas termal komposit, sebagaimana ditampilkan pada gambar 6. Komposit polyester diperkuat CWf - serbuk CaCO<sub>3</sub> terjadi penurunan berat pertama yaitu pada temperatur sekitar 75 dan 200 °C yang berkaitan dengan penguapan molekul air atau kadar air komposit polyester serat CWf. Yang bahkan senyawa lignin pada CWf sudah mulai terdegradasi (Randis et al., 2024). Senyawa lignin terdekomposisi dan terdegradasi pada temperatur 160 °C sampai 900 °C.



Gambar 6 kurva TGA dari komposit polyester.

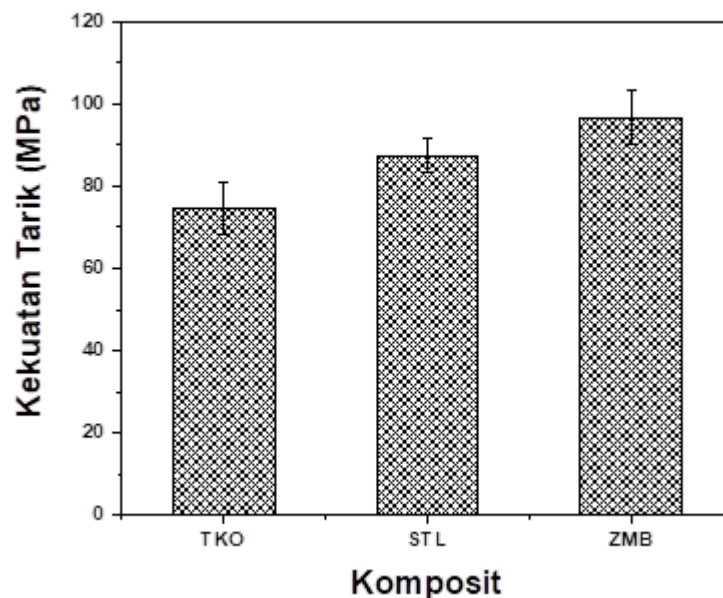
Selanjutnya, Tahap degradasi terbesar diamati komposit polyester diperkuat CWf dan serbuk  $\text{CaCO}_3$  pada temperatur  $280\text{ }^\circ\text{C} - 300\text{ }^\circ\text{C}$ . Pada kondisi temperatur tersebut merupakan fenomena terjadinya pemutusan rantai stirena yang merupakan produk utama polyester pada kisaran suhu  $360$  hingga  $400\text{ }^\circ\text{C}$  (Norizan et al., 2017). Demikian juga senyawa penyusun serat CWf seperti hemiselulosa dan selulosa yang terdegradasi pada masing-masing temperatur yaitu  $220\text{ }^\circ\text{C}$  sampai  $320\text{ }^\circ\text{C}$  dan di atas  $320\text{ }^\circ\text{C}$  berturut-turut. Dengan penambahan *filler* serbuk  $\text{CaCO}_3$  ini mampu membentuk inklusi interaksi serat CWf dengan matrik polyester ataupun interaksi ketiga penyusun komposit. Hal inilah yang selanjutnya mampu mengurangi dekomposisi komposit (*weight loss*) karena mobilitas menjadi terbatas (Gapsari, Purnowidodo, Setyarini, Suteja, et al., 2022).

### Kekuatan Tarik komposit

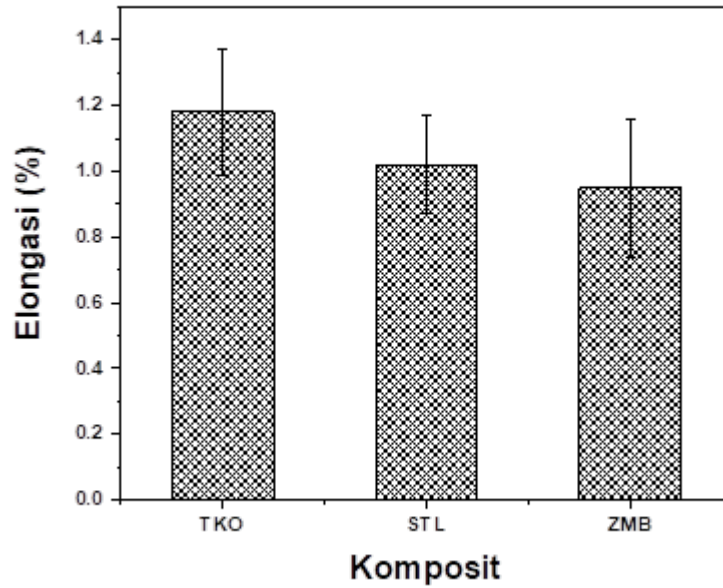
Gambar 7 menampilkan rata-rata hasil uji kekuatan tarik komposit polyester dimodifikasi serbuk  $\text{CaCO}_3$  diperkuat serat CWf. Untuk kekuatan tarik komposit TKO

kekuatan tarik komposit sebesar  $74.63 \pm 6.25$  MPa, kemudian setelah ditambahkan *filler* 5% dan 7% kekuatan tarik komposit (STL dan ZMB) masing-masing meningkat menjadi  $87.49 \pm 4.2$  MPa dan  $96.67 \pm 6.58$  MPa berturut-turut. Perilaku ini dikarenakan oleh serbuk  $\text{CaCO}_3$  dalam matriks polyester mampu menciptakan ikatan permukaan yang sesuai antara serat CWF dengan polyester. Selanjutnya, fenomena ini menyebabkan kapasitas transfer beban tarik antara serat CWF dengan *filler* serbuk  $\text{CaCO}_3$  - resin polyester (Nuryanta et al., 2023).

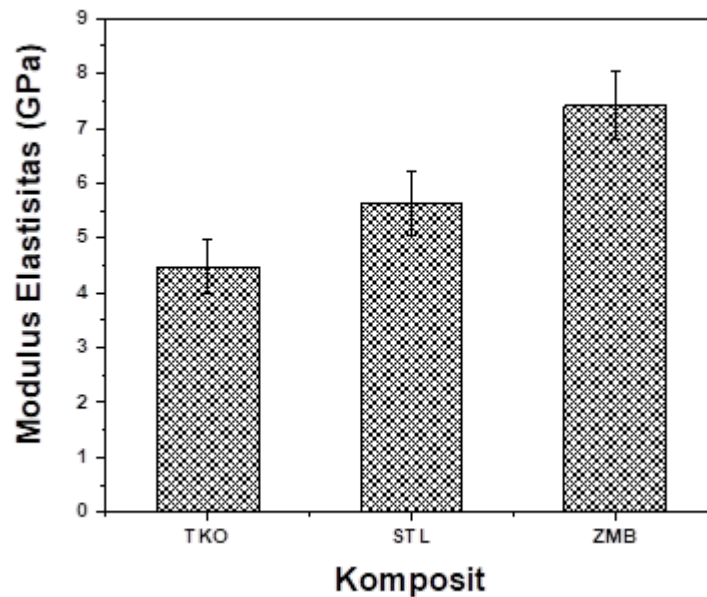
Regangan putus komposit polyester dengan *filler* serbuk  $\text{CaCO}_3$  diperkuat serat CWF ditampilkan pada gambar 8. Regangan putus untuk komposit polyester secara umum menunjukkan trend yang menurun dengan bertambahnya *filler* serbuk  $\text{CaCO}_3$ . Untuk komposit yang dikembangkan elongasi komposit ZMB menjadi terendah yaitu sebesar  $0.95 \pm 0.21$  % dibandingkan dengan komposit dua komposit lainnya (TKO ( $1.18\% \pm 0.19$ ) dan STL ( $1.18\% \pm 0.19$ )). Selain kekuatan antarmuka serat-matriks, matriks polyester dan *morphology* serat CWF juga sangat menentukan regangan putus (Herlina Sari et al., 2025). Seperti yang diamati pada komposit umumnya, regangan putus cenderung menurun seiring dengan meningkatnya fraksi volume serbuk  $\text{CaCO}_3$  di dalam komposit. Keberadaan *filler* serbuk  $\text{CaCO}_3$  mampu mengurangi mobilitas dan meningkatkan kekakuan matrik polyester (Muthupandeeswari et al., 2022).



Gambar 7 kekuatan tarik komposit polyester.



Gambar 8 elongasi komposit polyester.



Gambar 9 modulus elastisitas komposit polyester.

Tabel 2 parameter kekuatan tarik komposit polyester

Sampel	Kekuatan tarik (MPa)	Elongasi (%)	Modulus elastisitas (GPa)
<b>TKO</b>	74.63 ± 6.25	1.18 ± 0.19	4.48 ± 0.5
<b>STL</b>	87.49 ± 4.2	1.02 ± 0.15	5.62 ± 0.58
<b>ZMB</b>	96.67 ± 6.58	0.95 ± 0.21	7.41 ± 0.62

Modulus elastisitas komposit polyester diperkuat serat CWf dengan perbedaan serbuk CaCO<sub>3</sub> ditampilkan pada gambar 9. Nilai modulus elastisitas komposit mengalami peningkatan dengan meningkatnya kandungan serbuk CaCO<sub>3</sub>. Komposit TKO memiliki modulus elastisitas sebesar 4.48 GPa ± 0,5 dan menjadi paling terendah. Sedangkan setelah ditambahkan serbuk CaCO<sub>3</sub> 5 dan 10% (wt) modulus elastisitas masing-masing komposit disajikan pada gambar 9 dan tabel 2. Hal ini merupakan efek masuknya serbuk CaCO<sub>3</sub> tentu mempengaruhi modulus elastisitas pada komposit melalui peningkatan aspek rasio sehingga meningkatkan kekakuan matrik polyester sendiri (Shoaib et al., 2022). Dengan luas permukaan reaktif per unit yang lebih besar serta mengembangkan interaksi kuat dengan matriks – penguat.

Morfologi komposit terdapat retakan permukaan serat dengan matrik. Retakan serat yang tidak merata mungkin disebabkan oleh goresan pada permukaan serat dan lubang pada sisi serat. Pada antarmuka serat-matriks poliester terdapat celah. Celah ini terbentuk akibat tegangan saat komposit mengalami kegagalan tarik, bukan menunjukkan ikatan yang buruk selama proses fabrikasi. Pada permukaan matriks yang halus menunjukkan patahan getas. Hal ini terjadi pada komposit dengan *filler* CaCO<sub>3</sub> tinggi. *Filler* CaCO<sub>3</sub> mendorong deformasi matriks dan meningkatkan ketangguhan matriks poliester. Ketika terdapat aglomerasi pengisi dominan, pemotongan retak, dan serat waru, sehingga menyebabkan mudahnya pelepasan ikatan antara serat waru dan matriks poliester. Hasil ini masih sejalan dengan penelitian-penelitian sebelumnya (Gapsari, Purnowidodo, Setyarini, Hidayatullah, et al., 2022).

## **KESIMPULAN DAN SARAN**

Komposit polyester diperkuat serat CWf dengan komposisi serbuk CaCO<sub>3</sub> telah berhasil dikembangkan dan dianalisis kemudian kami tarik beberapa kesimpulan sebagai berikut. Densitas komposit polyester diperkuat CWf meningkat seiring dengan bertambahnya kandungan serbuk CaCO<sub>3</sub>, hal dikarenakan oleh densitas serbuk CaCO<sub>3</sub> sebesar 2.71 g/cm<sup>3</sup> dan lebih besar dibandingkan dengan densitas polyester dan serat CWf. Perilaku *dynamic mechanic analysis* komposit polyester diperkuat serat CWf memiliki trend yang sama dengan nilai densitas komposit. Untuk nilai *loss* modulus TKO, STL dan ZMB masing-masing meningkat dari 156.59, menjadi 213.91 dan 228.44 MPa. Sedangkan untuk storage modulus masing-masing komposit TKO, STL dan ZMB menurun dari 1800 ke 63.54, 2212.82 ke 257.25 dan 2593.34 ke 165.32 MPa berturut-

turut. Nilai  $\tan \delta$  menunjukkan trend yang semakin meningkat dengan bertambahnya *filler* serbuk  $\text{CaCO}_3$ . Stabilitas termal komposit polyester menurun sesuai dengan suhu awal dan suhu maksimum, sedangkan persentase residu meningkat pada penambahan *filler* serbuk  $\text{CaCO}_3$  yang lebih tinggi. Perilaku kekuatan tarik komposit tertinggi dimiliki oleh komposit ZMB yang mencapai  $96.67 \pm 6.58$  MPa. Hal ini merupakan kondisi optimal untuk membentuk inklusi interface serat CWf dengan polyester – serbuk  $\text{CaCO}_3$ , demikian juga dengan modulus elastisitas komposit polyester tertinggi dimiliki oleh komposit ZMB yang mencapai  $7.41 \pm 0.62$  GPa.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Afzaluddin, A., Jawaid, M., Salit, M. S., & Ishak, M. R. (2019). Physical and mechanical properties of sugar palm/glass fiber reinforced thermoplastic polyurethane hybrid composites. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(1), 950–959. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.04.024>
- Andoko, A., Diharjo, K., Soedarsono, J. W., Gapsari, F., Rangappa, S. M., & Siengchin, S. (2024). Influence of various chemical treatments on mechanical, thermal and morphological characteristics of *Cordia dichotoma* fiber. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 10. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100972>
- Diharjo, K., Gapsari, F., Andoko, A., Wijaya, M. N., Mavinkere Rangappa, S., & Siengchin, S. (2024). Flammability and thermal resistance of *Ceiba petandra* fiber-reinforced composite with snail powder filler. *Polymer Composites*, 45(6), 4947–4960. <https://doi.org/10.1002/pc.28100>
- Dou, Y., Ju, A., Zhong, Z., Huo, Y., & Yao, W. (2024). Flame-Retardant and Transparent Unsaturated Polyester Based on P/N Liquid Flame Retardants and Modified Halloysite Nanotubes. *Materials*, 17(3). <https://doi.org/10.3390/ma17030761>
- Gapsari, F., Purnowidodo, A., Hidayatullah, S., & Suteja, S. (2021a). Characterization of Timoho Fiber as a reinforcement in green composite. *Journal of Materials Research and Technology*, 13, 1305–1315. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.05.049>
- Gapsari, F., Purnowidodo, A., Hidayatullah, S., & Suteja, S. (2021b). Characterization of Timoho Fiber as a reinforcement in green composite. *Journal of Materials Research and Technology*, 13, 1305–1315. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.05.049>
- Gapsari, F., Purnowidodo, A., Hidayatullah, S., & Suteja, S. (2021c). Characterization of Timoho Fiber as a reinforcement in green composite. *Journal of Materials Research and Technology*, 13, 1305–1315. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.05.049>
- Gapsari, F., Purnowidodo, A., Setyarini, P. H., Hidayatullah, S., Suteja, Izzuddin, H., Subagyo, R., Mavinkere Rangappa, S., & Siengchin, S. (2022). Properties of organic

- and inorganic filler hybridization on Timoho Fiber-reinforced polyester polymer composites. *Polymer Composites*, 43(2), 1147–1156. <https://doi.org/10.1002/pc.26443>
- Gapsari, F., Purnowidodo, A., Setyarini, P. H., Suteja, S., Abidin, Z., Rangappa, S. M., & Siengchin, S. (2022). Flammability and mechanical properties of Timoho fiber-reinforced polyester composite combined with iron powder filler. *Journal of Materials Research and Technology*, 21, 212–219. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.09.025>
- Herlina Sari, N., Hidayatullah, S., & Maharsa Pradityatama, dan. (2025). *KARAKTERISTIK DELAMINASI DAN MEKANIK KOMPOSIT EPOXY LAMINAT ANYAMAN SERAT KULIT KAPOK-ALUMINIUM* (Vol. 25, Issue 2).
- Idicula, M., Malhotra, S. K., Joseph, K., & Thomas, S. (2005). Dynamic mechanical analysis of randomly oriented intimately mixed short banana/sisal hybrid fibre reinforced polyester composites. *Composites Science and Technology*, 65(7–8), 1077–1087. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2004.10.023>
- Istiqbaliah, H., Lokantara, I. P., & Tohari, A. (2024). Pengaruh Penambahan Serat Pelepeh Pisang Terhadap Kekuatan Tarik Komposit Serat Tebu Bermatrik Polyester. *Jurnal Mesin Nusantara*, 7(2), 232–242. <https://doi.org/10.29407/jmn.v7i2.24259>
- Kennedy, S. M., A, V., RB, J. R., K, A., & M, N. (2025). Impact of fillers in enhancing the properties of CFRP composites – A comprehensive exploration. *Next Research*, 2(1), 100117. <https://doi.org/10.1016/j.nexres.2024.100117>
- Magister dan Doktor, P., Purnowidodo, A., Darmadi, D. B., & Herlina Sari, N. (2019). *Suteja Mahasiswa S2 PERILAKU TARIK KOMPOSIT LAMINAT SERAT KULIT WARU-ALUMINIUM* (Vol. 3).
- Muthupandeeswari, A., Kalyani, P., & Vickraman, P. (2022). Evaluation of vital features of PVA–CaCO<sub>3</sub> nanocomposite films for biodegradable packaging applications. *Polymer Bulletin*, 79(1), 65–85. <https://doi.org/10.1007/s00289-020-03492-x>
- Norizan, M. N., Abdan, K., Salit, M. S., & Mohamed, R. (2017). Physical, Mechanical and Thermal Properties of Sugar Palm Yarn Fibre Loading on Reinforced Unsaturated Polyester Composite. *Journal of Physical Science*, 28(3), 115–136. <https://doi.org/10.21315/jps2017.28.3.8>
- Nuryanta, M. I., Aryaswara, L. G., Korsmik, R., Klimova-Korsmik, O., Nugraha, A. D., Darmanto, S., Kusni, M., & Muflikhun, M. A. (2023). The Interconnection of Carbon Active Addition on Mechanical Properties of Hybrid Agel/Glass Fiber-Reinforced Green Composite. *Polymers*, 15(11). <https://doi.org/10.3390/polym15112411>

- Randis, R., Darmadi, D. B., Gapsari, F., & Sonief, A. A. A. (2024). Isolation and characterization of microcrystalline cellulose from oil palm fronds biomass using consecutive chemical treatments. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 9. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100616>
- Shoaib, M., Jamshaid, H., Alshareef, M., Alharthi, F. A., Ali, M., & Waqas, M. (2022). Exploring the Potential of Alternate Inorganic Fibers for Automotive Composites. *Polymers*, 14(22). <https://doi.org/10.3390/polym14224946>
- Şomoghi, R., Semenescu, A., Pasăre, V., Chivu, O. R., Niţoi, D. F., Marcu, D. F., & Florea, B. (2024). The Impact of ZnO Nanofillers on the Mechanical and Anti-Corrosion Performances of Epoxy Composites. *Polymers*, 16(14), 2054. <https://doi.org/10.3390/polym16142054>
- Sughanthy, S. A. P., Ansari, M. N. M., & Atiqah, A. (2020). Dynamic mechanical analysis of polyethylene terephthalate/hydroxyapatite biocomposites for tissue engineering applications. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(2), 2350–2356. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.12.066>
- Suteja, Hidayatullah, S., Gapsari, F., Purnowidodo, A., Susanti, L., Rangappa, S. M., & Siengchin, S. (2025a). Enhancing the performance of natural fiber composites: Integrating Walikukun fiber and aluminum filler in epoxy matrices. *Reactive and Functional Polymers*, 214, 106302. <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2025.106302>
- Suteja, Hidayatullah, S., Gapsari, F., Purnowidodo, A., Susanti, L., Rangappa, S. M., & Siengchin, S. (2025b). Enhancing the performance of natural fiber composites: Integrating Walikukun fiber and aluminum filler in epoxy matrices. *Reactive and Functional Polymers*, 214. <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2025.106302>
- Wirawan, W. A., Choiron, M. A., Siswanto, E., & Widodo, T. D. (2022a). Morphology, Structure, and Mechanical Properties of New Natural Cellulose Fiber Reinforcement from Waru (*Hibiscus Tiliaceus*) Bark. *Journal of Natural Fibers*, 19(15), 12385–12397. <https://doi.org/10.1080/15440478.2022.2060402>
- Wirawan, W. A., Choiron, M. A., Siswanto, E., & Widodo, T. D. (2022b). Morphology, Structure, and Mechanical Properties of New Natural Cellulose Fiber Reinforcement from Waru (*Hibiscus Tiliaceus*) Bark. *Journal of Natural Fibers*, 19(15), 12385–12397. <https://doi.org/10.1080/15440478.2022.2060402>