



KARAKTERISTIK FISIK, MEKANIK, DAN *THERMAL* BIOKOMPOSIT PVA DIPERKUAT NANOSULOSA SERAT WARU - SERBUK CaCO_3

PHYSICAL, MECHANICAL AND THERMAL PROPERTIES OF PVA BIOCOMPOSITE REINFORCED WARU FIBER NANOCELLULOSE – CaCO_3 POWDER

Suteja¹⁾, Syarif Hidayatullah²⁾

^{1,2}Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Mataram, Mataram, Indonesia
email: suteja@unram.ac.id¹⁾*, syarift008@gmail.com²⁾

Received:
1 September
2025

Accepted:
13 Oktober
2025

Published:
5 Desember
2025



Abstrak

Biokomposit dari *Polyvinyl alcohol* (PVA) merupakan material yang potensial untuk mengganti plastik konvensional, akan tetapi performa kekuatan mekanik dan ketahanan *thermal* masih rendah. Untuk mengatasi keterbatasan ini, penguat *nanocellulose* dari pohon waru (NCW) dan kalsium karbonat (CaCO_3) ditambahkan sebagai pengisi bioplastik PVA. Biokomposit dengan variasi pengisi dicampurkan menggunakan *magnetic stirrer* hingga membentuk gel, kemudian dituangkan di atas kaca dan dikeringkan di dalam oven selama 12 jam pada suhu 60 °C. Hasil pengukuran densitas biokomposit menunjukkan peningkatan menjadi 2,15 g/cm³ dan ketebalan sebesar 1,32 mm setelah ditambahkan CaCO_3 . Sedangkan PVA-NCW densitas dan ketebalan masing-masing sebesar 1,27 g/cm³ dan 0,26 mm berturut-turut. Hal ini mengindikasikan sebagai faktor utama dalam meningkatkan kekuatan tarik biokomposit. Pengisi NCW dan CaCO_3 memiliki peran dalam meningkatkan kekuatan tarik biokomposit melalui ikatan permukaan yang lebih baik. Selain ikatan antar muka PVA dan pengisi, ikatan secara kimia juga telah dikonfirmasi dari hasil pengujian FTIR. Pengamatan dengan SEM menunjukkan adanya gumpalan dari NCW dan CaCO_3 . Sejalan dengan pengujian tarik, ketahanan *thermal* tertinggi juga dimiliki oleh sampel PVA- CaCO_3 . Hal ini sejalan dengan jumlah residu yang dihasilkan sampel PVA- CaCO_3 sebesar 6,38%. Biokomposit yang diteliti dikembangkan menawarkan potensi yang sangat besar sebagai pengganti plastik konvensional.

Kata Kunci: Biokomposit PVA, nanoselulosa waru, serbuk CaCO_3 , kekuatan tarik, ketahanan *thermal*.

Abstract

Polyvinyl alcohol (PVA) biocomposites are a potential material to replace conventional plastics, but mechanical strength and thermal resistance are still low. To overcome these limitations, reinforcement from waru fiber *nanocellulose* (NCW) and calcium carbonate (CaCO_3) fillers are added to PVA bioplastics. Biocomposites formulatur were mixed using a magnetic stirrer until gel formed, then poured onto glass and dried in oven for 12 hours at 60 °C. The density results showed an increase to 2.15 g/cm³ and a thickness of 1.32 mm

after adding CaCO_3 . Meanwhile, PVA-NCW had a density and thickness of 1.27 g/cm³ and 0.26 mm respectively. This indicates as a major factor in increasing the tensile strength of biocomposites. The fillers play a role in increasing the tensile strength of biocomposites through better surface bonding. In addition, the interfacial bonding between PVA and the fillers has been confirmed by FTIR results. SEM observation shows the presence of clumps of NCW and CaCO_3 . In line with the tensile testing, the highest thermal resistance was also found in the PVA- CaCO_3 sample. This is in line with the amount of residue produced by the PVA- CaCO_3 sample 6.38%. The developed biocomposite offers great potential as a conventional plastics substitute.

Keywords: PVA Bio composites, waru nanocellulose, CaCO_3 powder, tensile strength, thermal resistance.

DOI: 10.20527/sjmekinematika.v10i2.810

How to cite: Suteja, & Hidayatullah, S., "Karakteristik Fisik, Mekanik, dan Thermal Biokomposit PVA Diperkuat Nanoselulosa Serat Waru-Serbuk CaCO_3 ". *Scientific Journal of Mechanical Engineering Kinematika*, 10(2), 336-347, 2025.

PENDAHULUAN

Material plastik dapat dibuat dari pati, *Polyvinyl alcohol* (PVA) dan bahan konvensional yaitu minyak bumi. Plastik dari minyak bumi memiliki karakteristik seperti kekuatan tarik, ketahanan *thermal* dan anti bakteri yang lebih diandalkan daripada material biokomposit[1]. Akan tetapi karena sifat plastik konvensional yang tidak dapat terurai dan mencemari lingkungan. Sebagai sifat penting yang perlu dimiliki oleh material dalam kehidupan sehari-hari sangat penting untuk mengembangkan material yang ramah lingkungan. Plastik umumnya terdiri dari beberapa jenis seperti termoplastik, termoset dan lainnya yang sangat cocok untuk diganti dengan biokomposit sebagai bioplastik[2]. Biokomposit sangat penting untuk dipertimbangkan karena ramah lingkungan dan tidak berbahaya selama teknik pemakaiannya[3]. Bahan ini sangat cocok untuk menggantikan penggunaan bahan konvensional dan sintetis karena sifatnya yang ringan; bahan ini juga secara efisien menghemat lebih banyak energi, yang sangat penting untuk konservasi energi dalam aplikasi praktis[4].

Polyvinyl alcohol (PVA) merupakan salah satu polimer alami yang telah dikembangkan untuk berbagai aplikasi karena sifatnya yang mudah terurai dalam air maupun tanah, proses permesinan yang mudah, ramah terhadap lingkungan, sebagai bahan bio yang cocok untuk dipadukan dengan bahan lain[3]. Sebagai bahan alami PVA memiliki beberapa kekurangan dalam pengaplikasian sebagai bahan kemasan makanan dikarenakan sifat mekanik dan ketahanan terhadap panas yang masih rendah[5].

Banyak penelitian telah melaporkan bahwa penambahan serbuk nano seperti kalsium karbonat (CaCO_3)[6], zink oksida (ZnO)[7], titanium dioksida (TiO_2)[8], alumina (Al_2O_3) dan lainnya [8,9] ke dalam PVA mampu memperbaiki sifat mekanik dan *termal*nya. Secara umum penggabungan dengan serbuk-serbuk tersebut mampu meningkatkan secara signifikan viskositas dan densitas PVA serta berperan sebagai penguat, pengeras dan mengurangi mobilitas rantai PVA. Muthupandeeswari[6] melaporkan bahwa penambahan serbuk CaCO_3 sebesar 0, 5, 10, 15 wt% ke dalam PVA mampu meningkatkan sifat mekanik masing-masing sebesar 4,77 MPa, 5,92 MPa, 6,56 MPa dan 8,93 MPa. Selanjutnya, penggunaan zink oksida (ZnO) dan *graphene* oksida (GO) sebagai penguat PVA juga telah di laporkan oleh Padinhattayil[7]. Mereka melaporkan bahwa kekuatan tarik meningkat dari 3,84 MPa pada PVA murni menjadi 10,48 MPa pada PVA-0.05% GO-ZnO, dan Modulus Young meningkat dari 104,41 menjadi 106,77 MPa. Hal demikian juga dengan penggunaan penguat titanium dioksida (TiO_2) 5 – 50 wt% ke dalam PVA oleh Bozdogan[10], kekuatan tarik biokomposit PVA meningkat dari 55,09 MPa dan 261,78 MPa. Akan tetapi, karena

kurangnya perlakuan kimia pada serbuk-serbuk pengisi tersebut memungkinkan bersifat *amorf* dan cenderung membentuk ikatan yang kurang baik dengan PVA serta bersifat menyerap air, yang pada akhirnya memperlemah sifat-sifat biokomposit PVA.

Di lain hal, nanoselulosa juga mampu membentuk ikatan yang kuat dengan matrik PVA sehingga mampu meningkatkan sifat mekanisnya. Selulosa dari serat alam juga memainkan peran penting dalam berbagai aplikasi. Nilai indeks kristalan yang tinggi yang dimiliki oleh bahan selulosa maka tentu akan meningkatkan ketahanan terhadap penyerapan air dan kekuatan tarik biokomposit[11]. Nanoselulosa dari serat *agave gigantea* 5% berat telah digunakan sebagai penguat PVA dan didapatkan kekuatan tarik sebesar 39 MPa[12] dibandingkan dengan kekuatan tarik PVA murni sebesar 25,56 MPa[13].

Nanoselulosa dari serat kulit waru sangat potensi untuk dikembangkan menjadi pengisi PVA. Hal ini dikarenakan oleh indeks kekeristalan serat kulit waru yang mencapai 63,02% dan tersebar dengan jumlah yang melimpah[14]. Disamping itu, Serbuk CaCO_3 merupakan salah satu opsi pengisi berbiaya rendah dengan sifat mekanik sangat baik, dapat diekstraksi dari berbagai sumber limbah. Dengan ukuran yang lebih kecil serbuk CaCO_3 memiliki aspek rasio rendah dan luas permukaan yang besar, sehingga mampu membentuk interaksi antarmuka yang kuat dengan matrik PVA[15].

Melihat potensi nanoselulosa dan serbuk berukuran nano serta kemampuan larut dalam PVA untuk membentuk ikatan permukaan yang lebih luas, sehingga menghasilkan kekuatan mekanik yang lebih menjanjikan, ketahanan *thermal* yang lebih tinggi serta anti korosi dan mikroba yang lebih baik juga[16]. Oleh karena itu, perbandingan jenis pengisi baru sebagai penguat PVA sangat penting untuk diinvestigasi. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mendapatkan karakteristik terbaik PVA dengan pengisi serbuk CaCO_3 dan nanoselulosa serat waru (NCW). Adapun karakteristik yang dipaparkan dalam penelitian ini adalah sifat fisik (densitas dan ketebalan), ikatan kimia dan gugus fungsi (pengujian FTIR), morphology (SEM), dan sifat ketahanan *thermal* biokomposit (TGA)

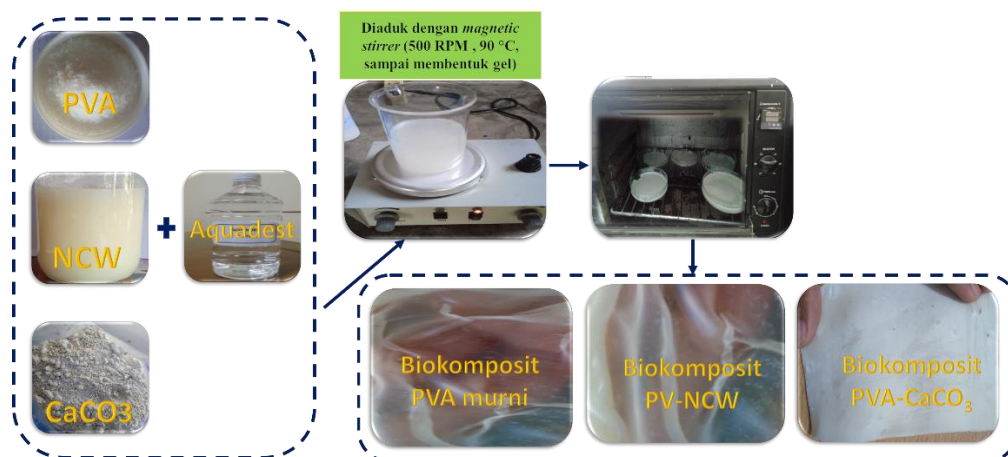
METODE PENELITIAN

Material

Serat nanoselulosa kulit waru diisolasi mengikuti metode yang telah dilaporkan oleh Gapsari[17] dengan densitas, kandungan selulosa dan indeks kekeristalan masing-masing sebesar 0,64 g/cm³ 64,01% dan 78,47% berturut-turut. *Polyvinyl alcohol* (PVA) 100 gr Merck 114266 / *Polyvinyl Alcohol* PA dengan *hydrolysis* 99% dan berat molekul sekitar 89.000-98.000 g mol⁻¹, serbuk CaCO_3 kemurnian $\geq 97\%$, ukuran partikel sekitar 60 – 80 nm dan luas permukaan 20 m²/g. Bahan-bahan kimia yang digunakan yaitu sodium hidroksida (NaOH), sodium klorit (NaClO_2), *acetic acid* (CH_3COOH , 99,5%).

Persiapan dan Fabrikasi biokomposit PVA – NCW dan serbuk CaCO_3 .

Serbuk PVA dimasukkan ke dalam air destilat 100 mL kemudian diaduk selama 30 sampai 60 menit. Setelah larutan transparan terbentuk, 5% nanoselulosa serat waru dari 10 g PVA ditambahkan ke dalam suspensi[18]. Suspensi dilanjutkan dengan dipanaskan dan diaduk di atas *magnetic stirrer* pada suhu mencapai 90 °C, kecepatan 500 rpm hingga suspensi mengalami gelatinisasi dengan pH diatur dengan menggunakan larutan NaOH 0,1 M. Gel yang dihasilkan selanjutnya dituang ke dalam cawan petri dan didiamkan selama 2 jam pada suhu kamar. Biokomposit kemudian dikeringkan selama 15 jam dalam oven pengering pada temperatur 45 °C. Tahapan proses fabrikasi biokomposit ditampilkan pada Gambar 1. Biokomposit yang dihasilkan kemudian di uji dan dianalisis secara deskriptif.



Gambar 1. tahapan proses fabrikasi biokomposit.

Densitas dan Ketebalan Biokomposit

Nilai densitas dan ketebalan biokomposit diukur dengan menggunakan densimeter. Sebelum sampel biokomposit diukur, sampel dikeringkan terlebih dahulu di dalam oven selama 1 jam pada temperatur 105 °c untuk menghilangkan kandungan kelembaban. Perhitungan densitas biokomposit menggunakan persamaan (1)[19]. Yang mana, berat sampel biokomposit (g) ditimbang terlebih dahulu menggunakan timbangan digital (0,001 g) kemudian sampel biokomposit direndam ke dalam gelas ukur untuk mendapatkan perubahan volume yang terjadi (m).

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

Sedangkan ketelan biokomposit diukur dengan mikrometer dengan ketelitian 0,001 mm. Pengukuran ini dilakukan pada sampel sebelum pengujian tarik biokomposit.

Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

Perbedaan struktur kimia yang dimiliki oleh biokomposit yang dikembangkan diinvestigasi dengan menggunakan *spectra* FTIR. *Spectra* FTIR sampel direkam dengan *Perkin Elmer Frontier Spectrum instrument* menggunakan matrik serbuk kBr. *Spectra* FTIR dikumpulkan dengan *range* pembacaan dari 4000 – 450 cm⁻¹, dengan resolusi dan *scan rate* masing-masing dijalankan sebesar 4 cm⁻¹ dan 32 *scan rate* per menit.

Kekuatan Tarik Test

Pengukuran kekuatan tarik biokomposit diukur dengan menggunakan mesin uji tarik *universal tensile machine* RTG (INSTRON) Sedangkan dengan *load cell* yang diberikan sebesar 5 kN dan kecepatan *crosshead* 5 mm/menit pada suhu ruangan, sesuai dengan standar D882 (ASTM, 2002) karakteristik tarik sampel biokomposit dievaluasi. Klem tarik terpasang erat pada kedua ujung strip sampel (70 x 10 x 3 mm).

Scanning Electron Microscopy

Morfologi biokomposit diamati dengan menggunakan *scanning electron microscopy* (SEM). Pengamatan SEM ini dijalankan dengan menggunakan *Phenom Pharos Desktop SEM machine*, dengan arus dan tegangan masing-masing sebesar 8 mA dan 5 kV berturut-turut. Gambar biokomposit ditangkap pada perbesaran sekitar 500 dan 2000 dalam ruang hampa tinggi pada jarak kerja 0,5 mm. Sebelum pengamatan dengan SEM, Morfologi biokomposit dilapisi terlebih dahulu dengan emas ketebalan 3 µm.

Thermogravimetric Analysis (TGA)

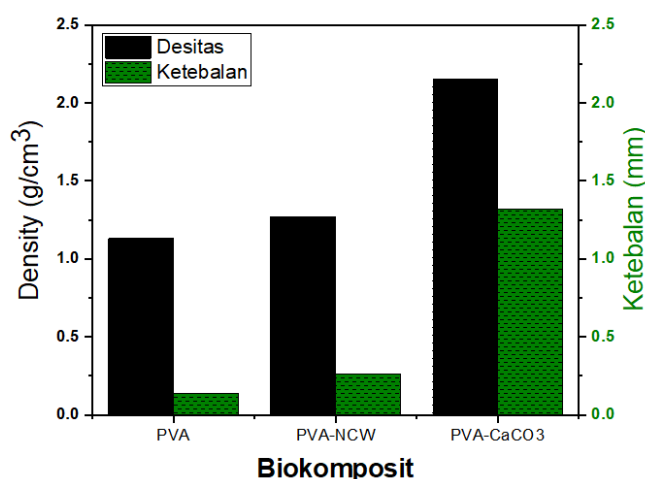
Pengukuran termogravimetri untuk menginvestigasi ketahanan *thermal* biokomposit dilakukan dengan menggunakan Alat Analisis *Thermal* TGA-1 Metler Toledo. Program suhu uji dinamis dijalankan pada laju pemanasan 10 °C/menit dari kisaran temperatur 27 °C hingga 600 °C. Atmosfer nitrogen (20 ml/menit) digunakan selama pengujian TGA untuk menghindari kerusakan termo-oksidatif.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Densitas dan Ketebalan Biokomposit

Densitas dan ketebalan biokomposit disajikan pada gambar 2. Dari Gambar 2 didapati bahwa kedua parameter tersebut mengalami peningkatan dengan seiring dengan bertambahnya pengisi NCW dan CaCO_3 . Densitas PVA didapatkan sebesar 1,13 g/cm³ kemudian sedikit mengalami peningkatan setelah NCW ditambahkan, sampel PVA-NCW memiliki densitas sebesar 1,27 g/cm³. Hal ini disebabkan oleh densitas pengisi NCW yang masih berupa suspensi dengan densitas yang lebih tinggi dibandingkan PVA. Peningkatan densitas secara signifikan terjadi pada sampel PVA- CaCO_3 yaitu sebesar 2,15 g/cm³. Hal ini terjadi karena densitas CaCO_3 yang merupakan komponen pengisi memiliki densitas sebesar 2,71 g/cm³ atau lebih besar daripada densitas PVA (dengan densitas 1,27 g/cm³). Sehingga di dalam biokomposit, bahan dengan fraksi volume yang lebih tinggi akan menentukan densitas biokomposit dan pada akhirnya meningkatkan densitasnya[19]. Densitas biokomposit PVA-NCW masih lebih rendah dibandingkan dengan densitas PVA – *nanofiber* dari *aloe vera* yang sebesar 1,35 g/cm³, dan hampir sama dengan densitas PVA – nanoselulosa *agave gigantea* sebesar 1,22 g/cm³[20] dan PVA–Nanoselulosa sekam padi sebesar 1,27 g/cm³[21].

Selanjutnya, ketebalan biokomposit yang dihasilkan juga memiliki trend yang sama dengan nilai densitas (Gambar 2). Ketebalan terendah dimiliki oleh sampel PVA sebesar 0,14 mm kemudian terus meningkat dengan ditambahkan pengisi NCW dan CaCO_3 yaitu masing-masing sebesar 0,6 mm dan 1,32 mm. Ketebalan sampel PVA-NCW lebih rendah dikarenakan oleh kelarutan NCW dengan PVA, sementara itu, pengisi CaCO_3 tidak larut dengan PVA akan tetapi hanya membentuk ikatan PVA dengan CaCO_3 . Ketebalan biokomposit ini jauh di atas biokomposit PVA–Nanoselulosa sekam padi sebesar 0.18 mm [21].

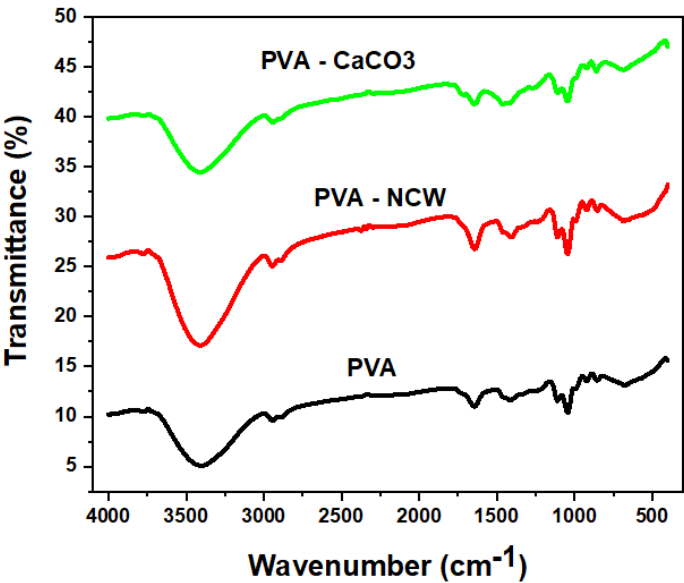


Gambar 2. Densitas dan ketebalan biokomposit.

Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

Hasil uji spektrum inframerah dari biokomposit untuk tiga sampel berbeda disajikan dalam Gambar 3. Biokomposit PVA dengan pengisi CaCO_3 memiliki puncak serapan yang

signifikan berbeda yaitu terjadi pada puncak serapan bilangan gelombang pada 1044 dan 800 cm^{-1} yang merupakan puncak kontraksi vibrasi antisimetrik dan simetris dari ikatan Ca (dari CaCO_3) – O (dari PVA) – Ca. Hal ini menunjukkan terjadinya ikatan yang kuat antar penyusun biokomposit.



Gambar 3. Kurva FTIR biokomposit.

Puncak lebar dalam sekitar 3400,49 cm^{-1} , 3403,71 cm^{-1} dan 3406,01 cm^{-1} menunjukkan puncak serapan getaran peregangan dari gugus hidroksil group O–H pada NCW dengan PVA dan PVA dengan CaCO_3 . Puncak pada 2942,85 cm^{-1} sampel PVA, 2943,41 cm^{-1} sampel PVA–NCW, dan 2942,42 cm^{-1} sampel PVA– CaCO_3 berhubungan dengan vibrasi regangan gugus regangan C–H gugus metil dan metilen dari rantai utama PVA. Pita serapan pada bilangan gelombang sekitar 1643,96 cm^{-1} 1642,87 cm^{-1} dan 1644,66 cm^{-1} untuk biokomposit PVA, PVA–NCW, PVA– CaCO_3 berturut-turut dapat diidentifikasi sebagai interaksi senyawa OH (air) yang kuat dari PVA dengan *suspense* NCW dan bagian amorf dari CaCO_3 [22]. Pita serapan pada bilangan gelombang 1407,05 cm^{-1} , 1407,05 cm^{-1} , 1461,33 cm^{-1} ketiga sampel merepresentasikan dari peregangan cincin C=C aromatik dan deformasi C–H pada gugus metil, metilen dan metoksi lignin[23] serta senyawa C dan O dari CaCO_3 .

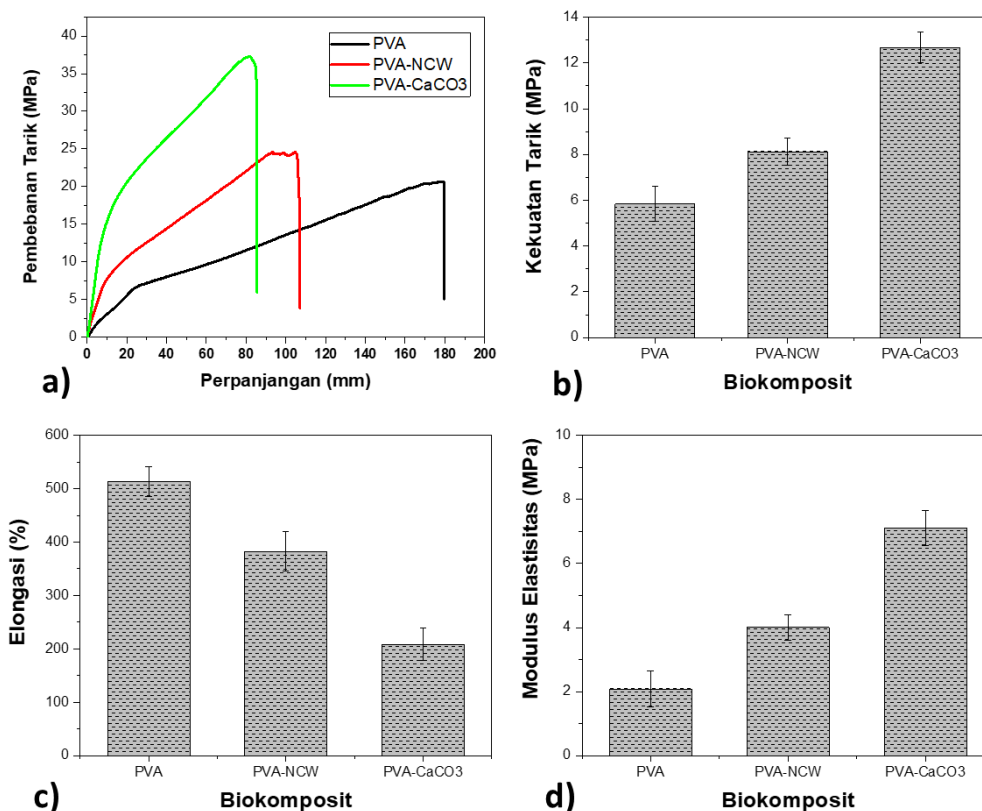
Tabel 1. Gugus fungsi dan assignments dari masing-masing sampel biokomposit

Wavenumber (cm^{-1})			Assignments
PVA	PVA – NCW	PVA – CaCO_3	
3400,49	3403,71	3406,01	Regangan O–H dari ikatan hidrogen antarmolekul dan intramolekul.
2942,85	2943,41	2942,42	Peregangan rantai utama PVA yang asimetris dan getaran ikatan CH pada rantai utama PVA.
1643,96	1642,87	1644,66	Interaksi PVA, NCW dan CaCO_3 dengan air
1410,16	1407,05	1461,33	Regangan cincin C=C aromatik dan deformasi C–H.
1043,89	1043,95	1044,42	Getaran peregangan C – O – C
854,88	855,18	860,28	Ion C dari PVA dan NCW serta ion karbonat yang terdapat dalam kalsium karbonat.
677,96	682,96	683,11	Bagian kristalin dari kalsium karbonat atau intensitas karbon.

Vibrasi rangka cincin piranosa selulosa dan ion Ca–CO ditunjukkan pada bilangan gelombang sekitar $1043,89\text{ cm}^{-1}$, $1043,95\text{ cm}^{-1}$ dan $1044,42\text{ cm}^{-1}$ sesuai dengan vibrasi C–O–C. Selanjutnya, pita serapan pada bilangan gelombang $854,88\text{ cm}^{-1}$, $855,18\text{ cm}^{-1}$ dan $860,28\text{ cm}^{-1}$ sesuai dengan vibrasi regangan C–H dari masing-masing komponen penyusun biokomposit[24]. Biokomposit PVA – CaCO_3 diindikasikan sebagai getaran peregangan simetris dan asimetris dari rantai alkil – CH_2 dalam PVA– CaCO_3 . Untuk lebih detail bilangan gelombang dan *assignment*nya disajikan pada Tabel 1.

Karakteristik Tarik Biokomposit

Kekuatan tarik biokomposit ditampilkan pada Gambar 4. Kurva tegangan tarik – pertambahan panjang biokomposit memberikan gambaran lengkap terkait dengan sifat kekuatan tarik dari material tersebut (Gambar 4(a)). Secara umum kekuatan tarik biokomposit mengalami peningkatan seiring dengan adanya inklusi nanoselulosa waru (NCW) dan serbuk CaCO_3 di dalam PVA. Pembebanan tarik mengalami peningkatan dari sekitar 20 MPa (biokomposit PVA) kemudian meningkat menjadi 25 MPa dan 37,5 MPa setelah ditambahkan NCW dan CaCO_3 berturut-turut. Hal ini dikarenakan oleh ikatan *interface* antara NCW – PVA dan luas permukaan CaCO_3 – PVA yang meningkat sehingga mampu menahan gaya tarik yang lebih besar[1].



Gambar 4. Karakteristik tarik biokomposit; (a) kurva pembebanan-perpajangan, (b) kekuatan tarik, (c) elongasi dan, (d) modulus elastisitas.

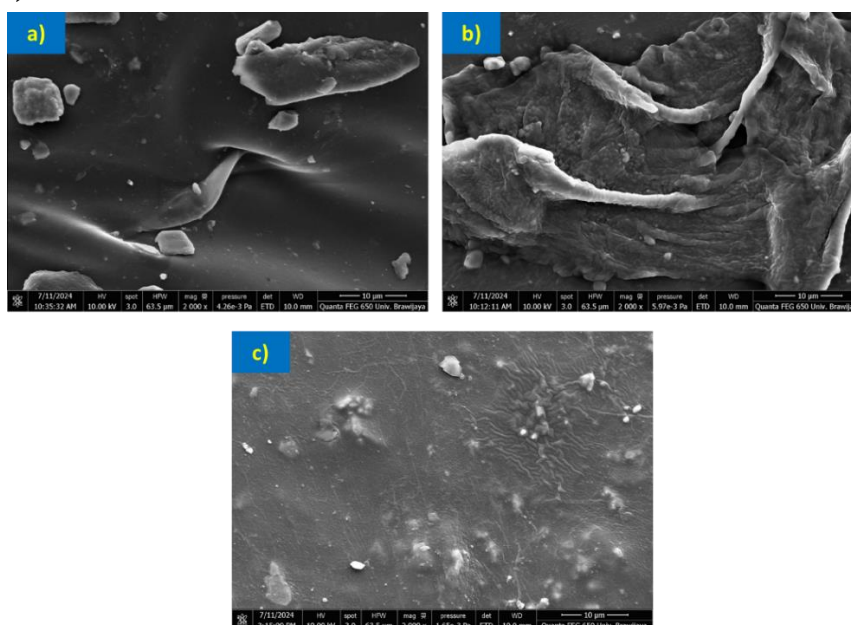
Gambar 4(b) menunjukkan kekuatan tarik biokomposit PVA yang dihasilkan mengalami peningkatan dari 5,84 MPa menjadi 8,12 MPa dan 12,68 MPa pengisi NCW dan serbuk CaCO_3 ditambahkan. Peningkatan kekuatan tarik biokomposit ini disebabkan oleh beberapa hal, seperti: keberadaan nanoselulosa dengan indeks kekristalan tinggi serta mudah terdispersi secara homogen di dalam PVA sehingga rantai selulosa akan berperan melawan gaya tarik yang diterima. Serta keberadaan pengisi CaCO_3 yang bertindak dalam menyamaratakan tegangan dan mendistribusikan beban secara seragam ke seluruh matriks

PVA[25]. Hal ini terjadi melalui adanya interaksi antarmolekul yang kuat antara pengisi NCW, CaCO_3 dan polimer PVA. Kekuatan tarik biokomposit yang dikembangkan masih lebih tinggi dibandingkan dengan biokomposit PVA nanoselulosa sekam padi sebesar 3,24 MPa[21] tetapi masih di bawah kekuatan tarik PVA – *nanofiber* jahe sebesar 37,5 MPa[26].

Perpanjangan ketika putus (Gambar 4(c)) dan modulus elastisitas (Gambar 4(d)) sampel biokomposit masing-masing mengalami penurunan dari 513,37% ke 208,16% dan 2,08 MPa ke 7,11 MPa berturut-turut. Penurunan perpanjangan ketika putus dan meningkatnya modulus elastisitas ini seiring dengan ditambahkannya pengisi NCW dan serbuk CaCO_3 ke dalam matriks PVA. Fenomena ini merupakan imbas dari daya larut yang lebih baik dan daya rekat antar muka yang kuat antara pengisi dengan PVA dengan NCW dan serbuk CaCO_3 sehingga menghambat peregangannya biokomposit PVA.

Scanning Electron Microscopy

Permukaan biokomposit yang telah dikembangkan ditampilkan pada Gambar 5. Morfologi permukaan biokomposit pada Gambar 5(a) menunjukkan permukaan yang lebih halus dan sedikit bergelombang. Selanjutnya, permukaan biokomposit PVA-NCW (Gambar 5(b)) masih terlihat adanya pemisahan fase antara penggabungan domain serat nanoselulosa waru dengan matriks PVA yang menyebabkan adanya granula-granula butiran polimer tak beraturan pada permukaan biokomposit. Hal ini mengkonfirmasi *adhesi* antarmuka PVA – NCW yang kurang optimal diantara dua komponen tersebut. Keterbatasan transisi fase antara komponen pelarut dan non-pelarut menyebabkan permukaan kurang padat, sehingga kemampuan untuk menahan beban tarik menjadi kurang optimal[27]. Akan tetapi, kekuatan tarik komposit PVA – NCW masih lebih tinggi dibandingkan dengan sampel PVA sebagai akibat dari nilai indeks kekeristalan NCW (78,47%) yang lebih tinggi dibandingkan dengan PVA (28.1%) [28].

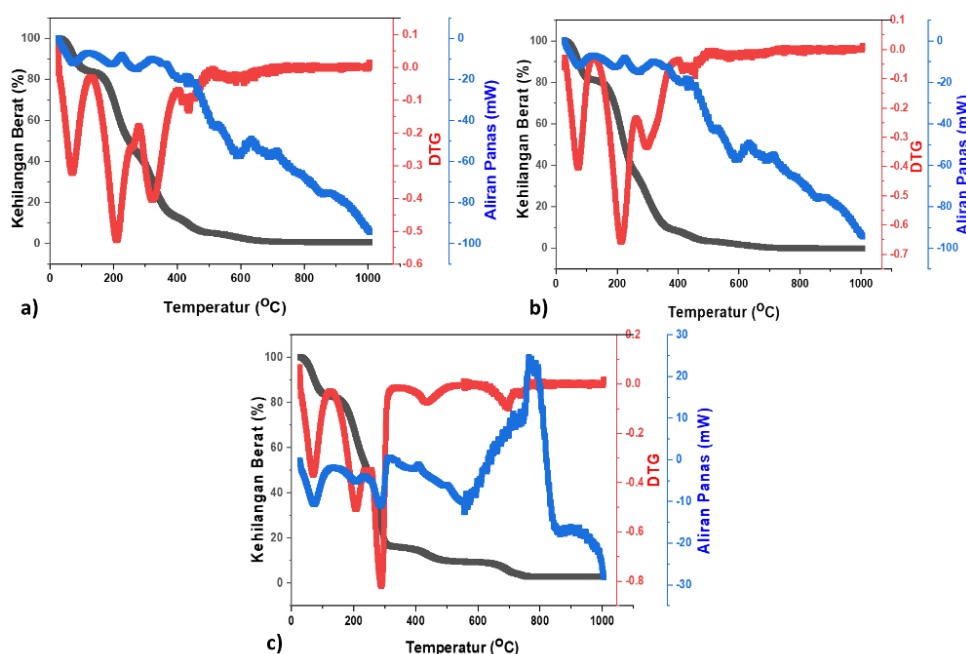


Gambar 5. *Morphology* permukaan biokomposit; (a) PVA, (b) PVA-NCW, (c) PVA- CaCO_3 .

Gambar 5(c) merupakan tampilan biokomposit terlihat dengan jelas adanya granula dengan struktur yang sangat kasar dengan butiran CaCO_3 . Penampakan gumpalan serbuk CaCO_3 dalam matriks PVA menyebabkan ketidakrataan pada permukaan sampel PVA – CaCO_3 . Hal ini menunjukkan bahwa serbuk CaCO_3 memiliki interaksi yang lebih kuat dengan PVA dan terdistribusi secara lebih merata dan terlihat lebih padat, yang menjelaskan mengapa kekuatannya tinggi. Meskipun pada bagian-bagian tertentu terdapat ketidakrataan permukaan hasil fabrikasi biokomposit.

Thermogravimetric Analysis

Ketahanan panas biokomposit diukur melalui perubahan berat akibat kenaikan temperatur dengan termogravimetrik ditampilkan pada Gambar 6. Ketahanan *thermal* biokomposit merupakan parameter penting ketika biokomposit PVA-NCW-CaCO₃ diaplikasikan sebagai pengganti plastik konvensional. Dari Gambar 6 terlihat bahwa terjadi peningkatan ketahanan *thermal* yang sangat signifikan ketika biokomposit PVA diperkuat NCW dan terlebih lagi dengan pengisi CaCO₃ dibandingkan dengan biokomposit murni PVA. PVA-CaCO₃ memiliki ketahanan *thermal* tertinggi sebesar 864,66 °C, PVA-NCW dan PVA murni memiliki ketahanan *thermal* masing-masing sebesar 723,78 °C dan 615,49 °C berturut-turut. Ketahanan *thermal* biokomposit ini masih di bawah komposit polimer PFu dengan sisa 27,5% pada temperatur[29].



Gambar 6. Kurva TGA, DTG dan DSC biokomposit; a) PVA, b) PVA-NCW, c) PVA-CaCO₃.

Tabel 2. parameter ketahanan *thermal* dari masing-masing sampel biokomposit

Sampel	Tahap 1			Tahap 2			Tahap 3			Sisa (%)
	T _{Onset} (°C)	T _{Max} (°C)	WL (%)	T _{Onset} (°C)	T _{Max} (°C)	WL (%)	T _{Onset} (°C)	T _{Max} (°C)	WL (%)	
PVA	37,71	248,18	17,17	287,95	458,21	71,25	458,21	615,49	5,74	0,63
PVA-NCW	37,15	251,2	5,73	257,98	318,82	79,61	428,95	723,78	18,75	3,03
PVA-CaCO ₃	37,85	253,30	17,21	303,13	517,57	66,75	558,08	864,66	11,68	6,38

Gambar 6 juga menampilkan bahwa terdapat tiga tahap kehilangan berat yaitu transisi tahap pertama terjadi pada temperatur 35 °C sampai 125 °C yang diindikasikan sebagai kehilangan kelembaban biokomposit akibat penguapan air yang terserap [30,31]. Tahap kehilangan berat kedua terjadi pada temperatur sekitar 257 °C sampai 517 °C sebagai degradasi dan rusaknya rantai ikatan antara PVA dengan nanoselulosa dan senyawa *amorf* dari CaCO₃. Tahap kehilangan berat ketiga terjadi pada temperatur (Tabel 2) yang merupakan rusaknya ikatan *backbone* C–C dari PVA yang menghasilkan karbon dan hidrokarbon. Sampel PVA-CaCO₃ mengalami aliran panas yang paling mencolok dibandingkan dengan dua sampel lainnya (PVA dan PVA-NCW). Sampel PVA-CaCO₃

mengalami aliran panas secara eksotermik sedangkan PVA dan PVA-NCW mengalami aliran panas secara endotermik[32]. Tiga tahap degradasi dari biokomposit ini mengindikasikan ketahanan thermal yang mumpuni dan kemampuan untuk mengganti plastik konvensional[29]. Untuk lebih lengkapnya temperatur laju dekomposisi *onset* dan *endset* dari biokomposit selama periode penurunan berat badan kedua terlihat pada Tabel 2.

KESIMPULAN

Nanoselulosa dari serat waru dan serbuk CaCO_3 telah diaplikasikan untuk memperbaiki karakteristik biokomposit PVA sebagai pengganti plastik konvensional. Biokomposit telah berhasil kami fabrikasi dan karakterisasi sifat fisik (densitas dan ketebalan), FTIR, kekuatan tarik, morfologi dan ketahanan *thermal*. Karakteristik-karakteristik tersebut sangat penting untuk diinvestigasi. Ketebalan terendah biokomposit dimiliki oleh sampel PVA (0,14 mm) dan tertinggi dimiliki oleh sampel PVA- CaCO_3 sebesar 1,32 mm. Hal yang sama juga terjadi pada nilai densitas komposit, sampel PVA memiliki densitas sebesar 1,13 g/cm^3 dan sampel PVA- CaCO_3 dengan densitas tertinggi yaitu sebesar 2,15 g/cm^3 . Densitas yang cenderung meningkat ini mengindikasikan kekuatan tarik yang meningkat juga. Kekuatan tarik meningkat dari 5,84 MPa menjadi 8,12 MPa setelah ditambahkan NCW dan 12,68 MPa setelah ditambahkan CaCO_3 . Adanya ikatan yang kuat antara matriks PVA dengan pengisi NCW dan serbuk CaCO_3 telah terkonfirmasi dengan jelas oleh hasil pengujian FTIR. Pengamatan morfologi menunjukkan masih adanya fase-fase domain penyusun biokomposit terutama di pada biokomposit PVA- CaCO_3 . Selanjutnya, ketahanan biokomposit terhadap panas meningkat dengan ditambahkan pengisi berupa NCW dan CaCO_3 . Hal ini ditandai meningkatnya jumlah sisa pemanasan yang meningkat dari 0,63% menjadi 3,03% dan 6,38%. Sebagai kesimpulan dalam penelitian ini, penambahan pengisi CaCO_3 dan NCW yang sesuai ke dalam PVA menghasilkan karakteristik biokomposit sebagai bioplastik yang menjanjikan untuk mengganti plastik konvensional.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada tim penelitian kami dari UB atas bantuan data yang disediakan.

REFERENSI

- [1] F. Gapsari, C. W. Kartikowati, K. A. Madurani, A. Harmayanti, and A. M. Sulaiman, "Enhanced PVA-bioplastic membranes with nanocellulose and hydroxyapatite derived from blood clam shells," *Environ Nanotechnol Monit Manag*, vol. 23, p. 101035, Jun. 2025, doi: 10.1016/j.enmm.2024.101035.
- [2] F. Gapsari, A. Purnowidodo, S. Hidayatullah, and S. Suteja, "Characterization of Timoho Fiber as a reinforcement in green composite," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 13, pp. 1305–1315, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.jmrt.2021.05.049.
- [3] G. Sobhiga, H. J. Maria, M. Mozetič, and S. Thomas, "A review on green materials: Exploring the potential of poly(vinyl alcohol) (PVA) and nanocellulose composites," *Int J Biol Macromol*, vol. 283, p. 137176, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2024.137176.
- [4] M. Teodorescu, M. Bercea, and S. Morariu, "Biomaterials of Poly(vinyl alcohol) and Natural Polymers," *Polymer Reviews*, vol. 58, no. 2, pp. 247–287, Apr. 2018, doi: 10.1080/15583724.2017.1403928.
- [5] F. Liu *et al.*, "Improved hydrophobicity, antibacterial and mechanical properties of polyvinyl alcohol/quaternary chitosan composite films for antibacterial packaging," *Carbohydr Polym*, vol. 312, p. 120755, Jul. 2023, doi: 10.1016/j.carbpol.2023.120755.

- [6] R. Şomoghi *et al.*, “The Impact of ZnO Nanofillers on the Mechanical and Anti-Corrosion Performances of Epoxy Composites,” *Polymers (Basel)*, vol. 16, no. 14, p. 2054, Jul. 2024, doi: 10.3390/polym16142054.
- [7] M. Dell’Edera *et al.*, “Photocatalytic TiO₂-based coatings for environmental applications,” *Catal Today*, vol. 380, pp. 62–83, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.cattod.2021.04.023.
- [8] A. Muthupandeeswari, P. Kalyani, and P. Vickraman, “Evaluation of vital features of PVA–CaCO₃ nanocomposite films for biodegradable packaging applications,” *Polymer Bulletin*, vol. 79, no. 1, pp. 65–85, Jan. 2022, doi: 10.1007/s00289-020-03492-x.
- [9] S. Padinhattayil and K. S. Rai, “PVA/GO-ZnO hybrid nanocomposites: Synthesis, Analysis and Applications,” *Indian J Sci Technol*, vol. 14, no. 23, pp. 1982–1992, Jun. 2021, doi: 10.17485/IJST/v14i23.236.
- [10] A. Bozdoğan, B. Aksakal, and O. Yargi, “Film formation and mechanical properties of an opaque titanium dioxide and transparent polyvinyl alcohol composite films,” *Polym Compos*, vol. 41, no. 3, pp. 939–950, Mar. 2020, doi: 10.1002/pc.25425.
- [11] K. Diharjo, F. Gapsari, A. Andoko, R. Septiari, S. M. Rangappa, and S. Siengchin, “Optimization of nano cellulose extraction from timoho fiber using response surface methodology (RSM),” *Biomass Convers Biorefin*, vol. 14, no. 20, pp. 25557–25567, Oct. 2024, doi: 10.1007/s13399-023-04551-9.
- [12] M. Mahardika, M. Asrofi, D. Amelia, E. Syafri, S. Mavinkere Rangappa, and S. Siengchin, “Tensile Strength and Moisture Resistance Properties of Biocomposite Films Based on Polyvinyl Alcohol (PVA) with Cellulose as Reinforcement from Durian Peel Fibers,” *E3S Web of Conferences*, vol. 302, p. 02001, Sep. 2021, doi: 10.1051/e3sconf/202130202001.
- [13] E. A. Rahim *et al.*, “Sintesis dan Karakterisasi Polivinil Alkohol (PVA) Terlapis Polieugenol,” *KOVALEN: Jurnal Riset Kimia*, vol. 10, no. 1, pp. 69–76, May 2024, doi: 10.22487/kovalen.2024.v10.i1.17088.
- [14] W. A. Wirawan, M. A. Chiron, E. Siswanto, and T. D. Widodo, “Morphology, Structure, and Mechanical Properties of New Natural Cellulose Fiber Reinforcement from Waru (*Hibiscus Tiliaceus*) Bark,” *Journal of Natural Fibers*, vol. 19, no. 15, pp. 12385–12397, 2022, doi: 10.1080/15440478.2022.2060402.
- [15] S. Sugiman, S. Salman, and B. Anshari, “Hydrothermal ageing of hydrophobic nano-calcium carbonate/epoxy nanocomposites,” *Polym Degrad Stab*, vol. 191, p. 109671, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2021.109671.
- [16] E. Pinto *et al.*, “Cellulose processing from biomass and its derivatization into carboxymethylcellulose: A review,” *Sci Afr*, vol. 15, p. e01078, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.sciaf.2021.e01078.
- [17] F. Gapsari, A. Andoko, K. Diharjo, M. R. Sanjay, and S. Siengchin, “The effectiveness of isolation and characterization nanocelullose from Timoho fiber for sustainable materials,” *Biomass Convers Biorefin*, vol. 14, no. 14, pp. 16487–16497, Jul. 2024, doi: 10.1007/s13399-022-03672-x.
- [18] M. N. Schoeler *et al.*, “Cellulose Nanofibers From Cassava Agro-Industrial Waste As Reinforcement in PVA Films,” *Quim Nova*, vol. 43, no. 6, pp. 711–717, Jun. 2020, doi: 10.21577/0100-4042.20170542.
- [19] F. Gapsari *et al.*, “Properties of organic and inorganic filler hybridization on Timoho Fiber-reinforced polyester polymer composites,” *Polym Compos*, vol. 43, no. 2, pp. 1147–1156, Feb. 2022, doi: 10.1002/pc.26443.
- [20] A. Ramezani Kakroodi, S. Cheng, M. Sain, and A. Asiri, “Mechanical, Thermal, and Morphological Properties of Nanocomposites Based on Polyvinyl Alcohol and

- Cellulose Nanofiber from *Aloe vera* Rind,” *J Nanomater*, vol. 2014, no. 1, Jan. 2014, doi: 10.1155/2014/903498.
- [21] G. M. Cholant *et al.*, “Polyvinyl Alcohol Films Reinforced with Nanocellulose from Rice Husk,” *Macromol*, vol. 5, no. 1, p. 6, Feb. 2025, doi: 10.3390/macromol5010006.
- [22] A. Andoko, F. Gapsari, K. Diharjo, S. M R, and S. Siengchin, “Isolation of microcellulose from timoho fiber using the process of delignification and maceration: Evaluation of physical, chemical, structural, and thermal properties,” *Int J Biol Macromol*, vol. 224, pp. 48–54, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2022.10.225.
- [23] A. Andoko, K. Diharjo, J. W. Soedarsono, F. Gapsari, S. M. Rangappa, and S. Siengchin, “Influence of various chemical treatments on mechanical, thermal and morphological characteristics of *Cordia dichotoma* fiber,” *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, vol. 10, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.cscee.2024.100972.
- [24] M. F. Hi. Abbas *et al.*, “Investigasi Sifat Mekanik Model Biodegradable Stent Berbasis Bahan PLLA,” *Scientific Journal of Mechanical Engineering Kinematika*, vol. 9, no. 2, pp. 229–243, Dec. 2024, doi: 10.20527/sjmekinematika.v9i2.327.
- [25] T. Aundry and A. Munang, “Analisis Kekuatan Mekanik Komposit Limbah Plastik Recycle Single Use dan Serbuk Kayu,” *Scientific Journal of Mechanical Engineering Kinematika*, vol. 9, no. 1, pp. 66–74, Jun. 2024, doi: 10.20527/sjmekinematika.v9i1.302.
- [26] H. Abral *et al.*, “Highly transparent and antimicrobial PVA based bionanocomposites reinforced by ginger nanofiber,” *Polym Test*, vol. 81, p. 106186, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.polymertesting.2019.106186.
- [27] S. Suganthi, S. Vignesh, J. Kalyana Sundar, and V. Raj, “Fabrication of PVA polymer films with improved antibacterial activity by fine-tuning via organic acids for food packaging applications,” *Appl Water Sci*, vol. 10, no. 4, p. 100, Apr. 2020, doi: 10.1007/s13201-020-1162-y.
- [28] A. K. Patel, R. Bajpai, and J. M. Keller, “On the crystallinity of PVA/palm leaf biocomposite using DSC and XRD techniques,” *Microsystem Technologies*, vol. 20, no. 1, pp. 41–49, Jan. 2014, doi: 10.1007/s00542-013-1882-0.
- [29] M. K. Erdoğan, M. Karakışla, and M. Saçak, “Preparation and characterization of electrically semi-conductive polyfuran-coated poly(ethylene terephthalate) fibers,” *The Journal of The Textile Institute*, vol. 110, no. 2, pp. 282–288, Feb. 2019, doi: 10.1080/00405000.2018.1477487.
- [30] A. Andoko, F. Gapsari, K. Diharjo, S. M R, and S. Siengchin, “Isolation of microcellulose from timoho fiber using the process of delignification and maceration: Evaluation of physical, chemical, structural, and thermal properties,” *Int J Biol Macromol*, vol. 224, pp. 48–54, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2022.10.225.
- [31] Suteja *et al.*, “Enhancing the performance of natural fiber composites: Integrating Walikukun fiber and aluminum filler in epoxy matrices,” *React Funct Polym*, vol. 214, p. 106302, Sep. 2025, doi: 10.1016/j.reactfunctpolym.2025.106302.
- [32] F. Gapsari *et al.*, “Modification of palm fiber with chitosan-AESO blend coating,” *Int J Biol Macromol*, vol. 242, p. 125099, Jul. 2023, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2023.125099.