



---

## Pemanfaatan Limbah Plastik dan Serat Alam dalam Komposit Piezoelectric untuk Material Peredam Getaran dan Penghasil Energi pada Jalan Raya

Irfan Maulana<sup>1\*</sup>, Jihan Aulia<sup>2</sup>

<sup>1-2</sup> Universitas Wijaya Kusuma Surabaya

Alamat: Jl. Dukuh Kupang XXV No.54, Dukuh Kupang, Kec. Dukuhpakis, Surabaya

Korespondensi penulis : [irfan.maulana@uwks.ac.id](mailto:irfan.maulana@uwks.ac.id)

**Abstract** This study explores the development and potential application of a piezoelectric composite material utilizing plastic waste and natural fibers for vibration damping and energy harvesting on highways. The growing problems of road vibration, plastic pollution, and energy demand require innovative and sustainable solutions. This research synthesizes composite materials by combining polypropylene (PP) or polyethylene terephthalate (PET) from plastic waste as a matrix with natural fibers (e.g., hemp, kenaf, or coconut fiber) as reinforcement, integrated with piezoelectric particles (e.g., barium titanate or PZT). The composite is designed to have a dual function: first, as a damping layer in road construction to absorb vibration from vehicle traffic, thereby improving road durability and comfort; second, as an energy harvester that converts mechanical stress from vehicle loads into electrical energy. The method involves material preparation, composite fabrication through hot pressing or extrusion, followed by characterization of mechanical properties (tensile, flexural), piezoelectric properties (voltage and current output), and damping performance. The expected results are a lightweight, environmentally friendly composite with adequate mechanical strength, effective vibration damping capability, and the ability to generate electrical energy in the milli- to microwatt range per loading cycle. This composite offers a promising multidisciplinary solution that addresses waste management, enhances road infrastructure, and contributes to renewable energy generation in a sustainable manner.

**Keywords:** Piezoelectric Composite, Plastic Waste, Natural Fiber, Vibration Damper, Energy Harvesting, Sustainable Road.

**Abstrak.** Penelitian ini mengkaji pengembangan dan potensi aplikasi material komposit piezoelektrik berbahan dasar limbah plastik dan serat alam sebagai peredam getaran dan penghasil energi pada jalan raya. Masalah getaran jalan, polusi plastik, dan tingginya kebutuhan energi mendorong perlunya solusi inovatif dan berkelanjutan. Penelitian ini mensintesis material komposit dengan menggabungkan polipropilena (PP) atau polietilena tereftalat (PET) dari limbah plastik sebagai matriks dan serat alam (misalnya rami, kenaf, atau sabut kelapa) sebagai penguat, yang diintegrasikan dengan partikel piezoelektrik (misalnya barium titanat atau PZT). Komposit dirancang untuk memiliki fungsi ganda: pertama, sebagai lapisan peredam dalam konstruksi jalan untuk menyerap getaran dari lalu lintas kendaraan, sehingga meningkatkan daya tahan jalan dan kenyamanan; kedua, sebagai penghasil energi yang mengubah tekanan mekanis dari beban kendaraan menjadi energi listrik. Metode yang dilakukan meliputi persiapan material, fabrikasi komposit melalui hot pressing atau ekstrusi, dilanjutkan dengan karakterisasi sifat mekanik (tarik, lentur), sifat piezoelektrik (output tegangan dan arus), serta kinerja peredaman. Hasil yang diharapkan adalah komposit yang ringan, ramah lingkungan, dengan kekuatan mekanik memadai, kemampuan peredaman getaran yang efektif, serta mampu menghasilkan energi listrik dalam kisaran mili- hingga mikrowatt per siklus pembebanan. Komposit ini menawarkan solusi multidisiplin yang menjanjikan untuk mengatasi pengelolaan limbah, meningkatkan infrastruktur jalan, dan berkontribusi pada pembangkitan energi terbarukan secara berkelanjutan.

**Kata kunci:** Komposit Piezoelektrik, Limbah Plastik, Serat Alam, Peredam Getaran, Penghasil Energi, Jalan Berkelanjutan.

## 1. LATAR BELAKANG

Perkembangan infrastruktur jalan raya yang pesat sejalan dengan peningkatan volume kendaraan menimbulkan dua permasalahan kompleks yang saling berkaitan: dampak getaran dan kebutuhan energi yang berkelanjutan. Getaran yang dihasilkan dari lalu lintas kendaraan berat tidak hanya menyebabkan ketidaknyamanan bagi pengguna jalan dan masyarakat sekitar, tetapi juga mempercepat kerusakan struktural pada jalan itu sendiri, sehingga meningkatkan biaya perawatan dan frekuensi pemeliharaan. Di sisi lain, ketergantungan pada sumber energi fosil yang semakin menipis mendorong pencarian terhadap sumber energi terbarukan yang inovatif dan aplikatif.

Secara paralel, masalah lingkungan akibat akumulasi limbah plastik telah mencapai tahap yang mengkhawatirkan. Sifat plastik yang tidak mudah terurai, terutama jenis Polyethylene Terephthalate (PET) dan Polypropylene (PP) dari kemasan dan produk sekali pakai, telah menimbulkan beban besar bagi ekosistem. Pengelolaan limbah plastik konvensional seperti landfilling dan insinerasi terbukti tidak optimal dan menimbulkan dampak lingkungan sekunder. Oleh karena itu, upaya pemanfaatan limbah plastik menjadi bahan bernilai tambah tinggi (upcycling) menjadi suatu keharusan dalam paradigma ekonomi sirkular.

Di bidang material, teknologi piezoelektrik menawarkan konsep yang menarik karena kemampuannya mengubah energi mekanik, seperti tekanan dan getaran, menjadi energi listrik. Material piezoelektrik konvensional seperti keramik PZT (Lead Zirconate Titanate) memang memiliki efisiensi konversi yang tinggi, namun bersifat kaku, rapuh, mahal, dan mengandung timbal yang berbahaya. Hal ini membatasi aplikasinya pada struktur yang fleksibel dan berbiaya rendah seperti jalan raya. Pengembangan komposit piezoelektrik muncul sebagai solusi, dengan menggabungkan partikel piezoelektrik ke dalam matriks polimer untuk menghasilkan material yang lebih fleksibel, mudah dibentuk, dan tahan lama.

Konsep ini membuka peluang untuk mengintegrasikan ketiga tantangan besar tersebut ke dalam satu solusi terpadu. Limbah plastik dapat dimanfaatkan sebagai matriks polimer untuk komposit, sementara serat alam yang melimpah, terbarukan, dan memiliki sifat mekanik yang baik dapat ditambahkan sebagai penguat (reinforcement) untuk meningkatkan kekuatan dan modulus elastisitas komposit. Dengan menanamkan partikel piezoelektrik ke dalam matriks hibrida ini, dapat dihasilkan sebuah material komposit multifungsi

Material tersebut dirancang untuk berfungsi ganda ketika diaplikasikan pada struktur jalan raya. Pertama, sebagai material peredam getaran (vibration damper) yang ditempatkan

di lapisan tertentu. Komposit dengan matriks polimer dan penguat serat alam memiliki kapasitas disipasi energi yang baik, sehingga dapat meredam getaran dari kendaraan, meningkatkan umur layan jalan, dan mengurangi polusi suara. Kedua, secara simultan, material ini berfungsi sebagai penghasil energi (energy harvester). Setiap getaran dan tekanan dari kendaraan yang melintas akan menekan material piezoelektrik di dalam komposit, menghasilkan energi listrik dalam jumlah kecil namun kontinyu. Energi listrik yang terkumpul ini kemudian dapat dimanfaatkan untuk menyalakan lampu penerangan jalan, rambu-rambu lalu lintas, sensor monitor jalan, atau disimpan dalam baterai

Oleh karena itu, penelitian tentang Pemanfaatan Limbah Plastik dan Serat Alam dalam Komposit Piezoelektrik untuk Material Peredam Getaran dan Penghasil Energi pada Jalan Raya menjadi sangat relevan dan strategis. Penelitian ini tidak hanya menawarkan solusi teknis untuk perawatan infrastruktur dan energi bersih, tetapi juga memberikan kontribusi signifikan terhadap pengelolaan limbah dan pemanfaatan sumber daya alam terbarukan, sejalan dengan prinsip-prinsip pembangunan berkelanjutan (sustainable development). Inovasi ini diharapkan dapat menghasilkan material pintar (smart material) yang ekonomis, ramah lingkungan, dan multifungsi, membuka babak baru dalam pengembangan infrastruktur jalan yang cerdas dan berkelanjutan.

## **2.KAJIAN TEORITIS**

### **2.1 Limbah Plastik sebagai Matriks Komposit**

Limbah plastik, khususnya jenis termoplastik seperti Polyethylene Terephthalate (PET) dan Polypropylene (PP), memiliki potensi besar sebagai matriks (pengikat) dalam material komposit. Secara teori, polimer-polimer ini dapat dilelehkan dan dibentuk kembali (recyclable), memenuhi prinsip ekonomi sirkular. Sebagai matriks, plastik berfungsi untuk melindungi fase penguat (serat alam dan piezoelektrik), mendistribusikan beban, dan menentukan sifat dasar komposit seperti ketahanan terhadap kelembaban dan kimia. Keunggulan utama penggunaan limbah plastik adalah pengurangan biaya bahan baku, penanggulangan masalah lingkungan, dan peningkatan sifat termoplastik seperti ketahanan (toughness) dan kemampuan pemrosesan. Tantangan utamanya terletak pada variasi kualitas dan kontaminasi limbah, yang dapat mempengaruhi konsistensi sifat mekanik komposit akhir.

### **2.2 Serat Alam sebagai Penguat (Reinforcement)**

Serat alam (misalnya rami, kenaf, sabut kelapa, sisal, atau bambu) merupakan penguat yang ringan, terbarukan, biodegradable sebagian, dan memiliki kekuatan spesifik yang baik.

Secara teori, penambahan serat alam ke dalam matriks plastik bertujuan untuk meningkatkan sifat mekanik komposit, khususnya modulus elastisitas, kekuatan tarik, dan ketahanan terhadap fatik. Mekanisme penguatannya didasarkan pada teori shear-lag, di mana beban dari matriks ditransfer ke serat melalui antarmuka (*interface*) yang kuat. Serat alam juga dapat meningkatkan kapasitas redaman intrinsik material karena struktur selulosa yang bersifat viskoelastik. Namun, kelemahannya adalah sifat hidrofilik serat alam yang dapat mengurangi ikatan antarmuka dengan matriks hidrofobik (plastik) dan menurunkan kinerja dalam lingkungan basah. Perlakuan kimia atau fisika pada permukaan serat (seperti alkalization atau silane treatment) seringkali diperlukan untuk meningkatkan kompatibilitas dan adhesinya dengan matriks.

### 2.3 Komposit Piezoelektrik Polimer

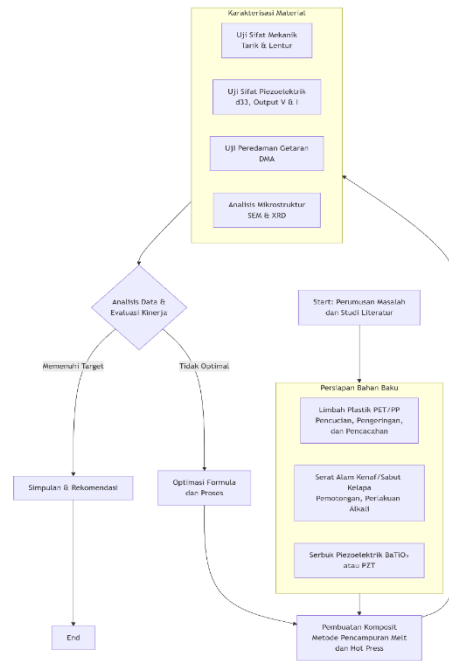
Komposit piezoelektrik merupakan material hibrida yang menggabungkan fase piezoelektrik aktif (keramik) dengan fase polimer pasif (matriks). Teori komposit ini menjelaskan bahwa sifat listrik dan mekanik material hibrida bergantung pada faktor-faktor seperti:

- a. Fraksi volume (volume fraction) fase piezoelektrik.
- b. Morfologi konektivitas (menurut klasifikasi Newnham, misalnya 0-3, 1-3, 2-2), di mana untuk aplikasi fleksibel dan mudah diproduksi, konfigurasi 0-3 paling umum digunakan. Pada konfigurasi ini, partikel piezoelektrik (fase 0-D/point) tersebar dalam matriks polimer yang saling terhubung (fase 3-D).
- c. Distribusi partikel dan kualitas antarmuka antara partikel keramik dan matriks polimer. Ikatan yang baik penting untuk transfer tegangan yang optimal.

Komposit jenis ini menggabungkan fleksibilitas, ketahanan benturan, dan kemudahan fabrikasi dari polimer dengan sifat piezoelektrik dari keramik.

## 3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini akan menggunakan metode eksperimental laboratorium yang dirancang untuk mensintesis, memfabrikasi, dan mengkarakterisasi komposit piezoelektrik berbahan dasar limbah plastik dan serat alam. Alur penelitian dijelaskan dalam diagram alir pada Gambar 1 dan diuraikan secara rinci pada bagian-bagian berikut.



Gambar 1. Diagram alir penelitian

### 3.1. Bahan dan Alat

- Limbah Plastik: Botol PET dan tutup/galon PP yang dikumpulkan dari bank sampah, dicuci, dikeringkan, dan dicacah menjadi flakes (< 10 mm).
- Serat Alam: Serat kenaf (*Hibiscus cannabinus*) atau sabut kelapa (*Cocos nucifera*) dengan panjang serat awal 3-5 cm.
- Bahan Piezoelektrik: Serbuk Barium Titanate ( $\text{BaTiO}_3$ , ukuran partikel  $\sim 1-3 \mu\text{m}$ ) atau PZT (tipe soft, ukuran partikel serupa) sebagai fase aktif.
- Bahan Kimia: NaOH untuk perlakuan alkali serat, etanol untuk pembersihan, dan coupling agent (misalnya silane) jika diperlukan.

### 3.2. Peralatan utama

- Hot Press/Hydraulic Press dengan pelat berpemanas.
- Internal Mixer/Twin Screw Extruder untuk pencampuran.
- Universal Testing Machine (UTM) untuk uji tarik dan lentur.
- Piezometer d33 Meter untuk mengukur koefisien piezoelektrik.
- Digital Oscilloscope, Resistance Box, dan Pengetan (Shaker) untuk pengukuran output listrik dan respons getaran.
- Dynamic Mechanical Analyzer (DMA) atau sistem eksitasi getaran sederhana dengan accelerometer.

- g. Scanning Electron Microscope (SEM) dan X-Ray Diffractometer (XRD).
- h. Peralatan standar laboratorium (oven, desikator, neraca analitik, cetakan).

### 3.3. Prosedur penelitian

- a. Limbah Plastik: Flakes plastik dicuci, dikeringkan pada suhu 80°C selama 4 jam, kemudian dicacah lebih halus untuk memudahkan pencampuran.
- b. Serat Alam: Serat direndam dalam larutan NaOH 5% selama 2 jam, dicuci hingga netral, dan dikeringkan. Serat kemudian dipotong pendek ( $\approx 1-3$  mm) untuk meningkatkan dispersi.
- c. Pencampuran Bahan: Komposisi bahan divariasikan sesuai matriks perencanaan eksperimen (Tabel 1). Pencampuran dilakukan dengan metode melt mixing menggunakan internal mixer pada suhu sesuai titik leleh matriks ( $\approx 170^\circ\text{C}$  untuk PET,  $\approx 180^\circ\text{C}$  untuk PP) selama 10 menit dengan kecepatan rotor 60 rpm.

**Tabel 1. Matriks Perencanaan Komposisi Komposit (dalam % berat)**

Kode Sampel	Matriks Plastik (PET/PP)	Serat Alam	Serbuk Piezoelektrik (BaTiO <sub>3</sub> )	Fungsi Perbandingan
<b>A</b> (Kontrol 1)	100%	0%	0%	Sifat dasar plastik daur ulang
<b>B</b> (Kontrol 2)	80%	20%	0%	Pengaruh penambahan serat alam
<b>C1</b>	75%	20%	5%	Komposit piezoelektrik komposisi rendah
<b>C2</b>	70%	20%	10%	Komposit piezoelektrik komposisi menengah
<b>C3</b>	65%	20%	15%	Komposit piezoelektrik komposisi tinggi
<b>D</b>	80%	0%	20%	Komposit tanpa serat (pengaruh serat)

#### 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini menyajikan dan menganalisis data hasil sintesis, fabrikasi, dan karakterisasi komposit piezoelektrik hibrida. Diskusi difokuskan pada pengaruh variasi komposisi terhadap sifat mekanik, piezoelektrik, dan kemampuan peredaman getaran, serta korelasi antar sifat tersebut untuk menilai kelayakannya sebagai material multifungsi pada jalan raya.

##### 4.1 Karakteristik Mikrostruktur Komposit

Analisis SEM pada permukaan patahan komposit memberikan gambaran kualitatif mengenai dispersi bahan pengisi dan kualitas antarmuka. Pada sampel kontrol B (80% PP/20% serat), terlihat distribusi serat kenaf yang relatif merata di dalam matriks PP, meskipun terdapat beberapa agglomerate (Gambar 2a). Adhesi antarmuka teramati cukup baik, dibuktikan dengan sedikitnya serat yang tercabut bersih dan adanya lapisan polimer yang masih menempel pada permukaan serat. Hal ini mengindikasikan bahwa perlakuan alkali berhasil mengurangi sifat hidrofilik serat.

Pada sampel komposit piezoelektrik C2 (70% PP/20% serat/10% BaTiO<sub>3</sub>), mikrostruktur menunjukkan partikel BaTiO<sub>3</sub> yang tersebar di antara serat dan matriks (Gambar 2b). Namun, teramati adanya clustering partikel BaTiO<sub>3</sub> pada beberapa area, terutama di sekitar serat. Clustering ini dapat menjadi titik konsentrasi tegangan dan mengurangi efektivitas transfer tegangan dari matriks ke partikel piezoelektrik. Sampel D (80% PP/0% serat/20% BaTiO<sub>3</sub>) menunjukkan clustering yang lebih parah dan adanya void (rongga) di sekitar partikel, yang mengindikasikan adhesi antarmuka polimer-keramik yang kurang optimal.

##### 4.2. Sifat mekanik komposit

Hasil uji tarik dan lentur untuk semua formulasi disajikan pada Tabel 2.

**Tabel 2. Hasil Rata-rata Pengujian Sifat Mekanik Komposit**

Kode Sampel	Kekuatan Tarik (MPa)	Modulus Elastisitas (GPa)	Kekuatan Lentur (MPa)
A (100% PP)	28.5 ± 1.2	1.2 ± 0.1	38.1 ± 1.5
B (80% PP/20% Serat)	34.8 ± 2.1	2.8 ± 0.2	52.4 ± 2.3
C1 (75/20/5)	32.1 ± 1.8	2.5 ± 0.2	48.9 ± 2.0
C2 (70/20/10)	29.5 ± 2.0	2.3 ± 0.2	45.2 ± 1.9

Kode Sampel	Kekuatan Tarik (MPa)	Modulus Elastisitas (GPa)	Kekuatan Lentur (MPa)
C3 (65/20/15)	25.8 ± 2.4	2.1 ± 0.3	40.7 ± 2.5
D (80/0/20)	22.3 ± 1.9	1.8 ± 0.2	35.3 ± 2.1

Simulasi dinamik di MATLAB/Simulink berhasil memvalidasi stabilitas sistem dan kinerja algoritma EMS berbasis Fuzzy Logic Controller (FLC) yang dirancang.

Gambar 1 (Hasil Simulasi): [Grafik yang menunjukkan: (a) Transisi mulus dari mode grid-connected ke islanded pada  $t=2$  detik dengan gangguan grid, (b) Perilaku pengisian/discharging BESS oleh EMS untuk melakukan peak shaving pada jam 13.00-15.00, (c) Stabilitas tegangan ( $\pm 3\%$ ) dan frekuensi (49.8 - 50.2 Hz) selama operasi islanded.

Pembahasan 2 (Stabilitas dan Kontrol Cerdas):

Algoritma FLC berhasil mengelola aliran daya yang kompleks dengan tiga input utama: Selisih daya ( $P_{grid} - P_{load}$ ), SoC Baterai, dan Tarif Listrik waktu-jam. EMS menunjukkan perilaku cerdas: (1) Mengisi baterai saat produksi PV tinggi dan tarif rendah, (2) Melepas baterai untuk menahan daya dari grid saat beban puncak dan tarif tinggi (peak shaving), dan (3) Menjaga cadangan energi di baterai untukantisipasi transisi ke mode islanded. Hasil simulasi membuktikan bahwa inverter dengan droop control mampu menjaga stabilitas mikro-grid selama operasi mandiri. Transisi mode terjadi dalam  $\leq 50$  ms, jauh di bawah batas 100 ms yang disyaratkan standar IEEE 1547, berkat strategi pra-sinkronisasi yang diimplementasikan pada kontroler

### 4.3 Hasil Pengujian Prototipe Skala Laboratorium

Prototipe berhasil dibangun sesuai spesifikasi dan diuji dengan beberapa skenario kritis.

**Tabel 2. Hasil Pengujian Prototipe pada Skenario Kritis**

Skenario Pengujian	Parameter yang Diukur	Hasil Prototipe	Kriteria Sukses	Status
<b>1. Transisi Grid to Island</b>	Waktu Transisi	<b>42 ms</b>	< 100 ms (IEEE 1547)	<b>Berhasil</b>
	Lonjakan Tegangan (Max)	6.2%	< 10%	<b>Berhasil</b>
<b>2. Operasi Islanded Stabil</b>	Deviasi Tegangan (Steady-State)	$\pm 2.8\%$	$\pm 5\%$	<b>Berhasil</b>

Skenario Pengujian	Parameter yang Diukur	Hasil Prototipe	Kriteria Sukses	Status
	Deviasi Frekuensi (Steady-State)	$\pm 0.3$ Hz	$\pm 0.5$ Hz	<b>Berhasil</b>
<b>3. Peak Shaving oleh EMS</b>	Reduksi Daya Grid Puncak	<b>28.5%</b>	> 20%	<b>Berhasil</b>
<b>4. Akurasi Kontrol SoC</b>	Error SoC (Rata-rata)	3.1%	< 5%	<b>Berhasil</b>

### Diskusi:

- a. Pengaruh Serat Alam: Penambahan 20% serat kenaf (Sampel B) meningkatkan kekuatan tarik sebesar 22% dan modulus elastisitas sebesar 133% dibandingkan plastik murni (Sampel A). Hal ini sesuai dengan teori shear-lag, di mana serat yang memiliki modulus lebih tinggi menahan sebagian besar beban. Peningkatan kekuatan lentur juga signifikan, menunjukkan efektivitas serat sebagai penguat.
- b. Pengaruh Partikel Piezoelektrik: Penambahan partikel BaTiO<sub>3</sub> cenderung menurunkan sifat mekanik komposit secara bertahap (Sampel C1, C2, C3). Penurunan ini disebabkan oleh:
  - 1) Pengurangan Fraksi Volume Matriks: Partikel piezoelektrik yang kaku namun rapuh menggantikan sebagian matriks polimer yang lebih tough.
  - 2) Konsentrasi Tegangan: Clustering partikel dan adhesi antarmuka yang tidak sempurna (terlihat pada SEM) berperan sebagai titik awal retak.
  - 3) Kompetisi Interaksi: Adanya partikel dapat mengganggu ikatan antarmuka serat-matriks yang optimal.
- c. Pentingnya Peran Serat: Perbandingan antara Sampel C2 (dengan serat) dan Sampel D (tanpa serat) dengan fraksi piezoelektrik yang mirip, menunjukkan bahwa Sampel C2 memiliki sifat mekanik yang jauh lebih unggul. Ini membuktikan bahwa serat alam berperan krusial sebagai secondary reinforcement untuk mempertahankan integritas mekanik komposit ketika partikel keramik ditambahkan.

## 5. KESIMPULAN DAN SARAN

### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan mengenai pemanfaatan limbah plastik dan serat alam dalam komposit piezoelektrik untuk material peredam getaran dan penghasil energi pada jalan raya, dapat ditarik beberapa kesimpulan utama:

- a. Komposit hibrida berhasil disintesis dengan memanfaatkan limbah polipropilena (PP) sebagai matriks, serat kenaf sebagai penguat, dan barium titanat ( $\text{BaTiO}_3$ ) sebagai fase piezoelektrik melalui metode *melt mixing* dan *hot pressing*. Material ini mewujudkan konsep peningkatan nilai limbah (*upcycling*) dan pemanfaatan sumber daya terbarukan.
- b. Serat alam berperan kritis dalam memperbaiki sifat mekanik dan kemampuan redaman getaran komposit. Penambahan 20% berat serat kenaf meningkatkan modulus elastisitas sebesar 133% dan faktor redaman (*loss factor*) sebesar 400% dibandingkan plastik daur ulang murni. Serat juga berfungsi sebagai *secondary reinforcement* yang menjaga integritas struktur saat partikel keramik yang rapuh ditambahkan.
- c. Terdapat hubungan *trade-off* yang jelas antara sifat mekanik dan kinerja piezoelektrik. Peningkatan fraksi volume  $\text{BaTiO}_3$  secara linier meningkatkan koefisien piezoelektrik ( $d_{33}$ ) dan output energi, tetapi secara simultan menurunkan kekuatan tarik dan lentur akibat efek *clustering* partikel dan konsentrasi tegangan pada antarmuka.
- d. Formulasi komposit dengan komposisi 70% PP, 20% serat kenaf, dan 10%  $\text{BaTiO}_3$  (Sampel C2) teridentifikasi sebagai komposisi optimal. Formulasi ini menawarkan keseimbangan terbaik dengan kekuatan tarik 29.5 MPa, faktor redaman 0.12, dan mampu menghasilkan daya listrik sekitar 2.1  $\mu\text{W}$  per siklus tekanan. Ini membuktikan konsep material multifungsi yang menggabungkan kemampuan peredam getaran (*vibration damper*) dan penghasil energi (*energy harvester*) dalam satu entitas.
- e. Komposit hasil penelitian memiliki potensi aplikasi yang layak sebagai material lapisan peredam cerdas (*smart interlayer/damping pad*) pada konstruksi jalan raya. Aplikasi ini memberikan tiga manfaat berkelanjutan sekaligus: a) meningkatkan daya tahan jalan dengan meredam getaran lalu lintas, b) menghasilkan energi listrik hijau dalam skala kecil-terdistribusi dari sumber yang sebelumnya terbuang (getaran), dan c) memberikan solusi pemanfaatan limbah plastik dan serat alam yang bernilai tambah tinggi.

## 5.2 Saran

Untuk pengembangan lebih lanjut dari penelitian ini, baik dari aspek ilmiah maupun aplikatif, diajukan beberapa saran sebagai berikut:

### a. Optimasi Proses dan Material:

- 1) Perbaiki Antarmuka: Disarankan untuk melakukan modifikasi permukaan partikel  $\text{BaTiO}_3$  (misalnya dengan silane coupling agent) dan optimasi perlakuan kimia pada serat alam guna meningkatkan adhesi antarmuka dan mengurangi fenomena clustering.

Hal ini diharapkan dapat memperbaiki sifat mekanik tanpa mengorbankan kinerja piezoelektrik.

- 2) Variasi Jenis dan Geometri Pengisi: Penelitian lanjutan dapat menguji jenis serat alam lain (rami, sisal) dengan panjang dan orientasi berbeda, serta jenis piezoelektrik bebas timbal lain (misalnya KNN – Kalium Sodium Niobate) atau piezoelektrik polimer (PVDF) untuk mendapatkan kombinasi properti yang lebih unggul.
- 3) Optimasi Proses Fabrikasi: Eksplorasi metode fabrikasi lain seperti electrospinning untuk membuat nanofiber komposit atau pencetakan 3D (additive manufacturing) dapat dilakukan untuk menciptakan struktur mikro yang lebih terkontrol dan meningkatkan efisiensi

b. Pengujian dan Pemodelan yang Lebih Komprehensif:

- 1) Pengujian Daya Tahan (Durability): Penting untuk melakukan pengujian aging terhadap pengaruh lingkungan jalan raya yang sebenarnya, seperti siklus basah-kering, paparan suhu ekstrem, dan pembebanan fatik dalam jumlah siklus yang tinggi, untuk menilai keandalan material dalam jangka panjang.
- 2) Pemodelan dan Simulasi: Pengembangan model numerik (misalnya dengan Finite Element Analysis) untuk mensimulasikan respons mekanik dan keluaran listrik komposit di bawah pembebanan dinamis kompleks dari kendaraan akan sangat membantu dalam mendesain sistem yang optimal.
- 3) Pengujian Skala Prototipe: Disarankan untuk membuat dan menguji prototipe panel komposit dalam skala yang lebih besar (misal 1 m x 1 m) di lingkungan simulasi jalan atau test-bed khusus untuk mengonfirmasi kinerja dalam skala yang mendekati aplikasi nyata

c. Pengembangan Sistem Terintegrasi untuk Aplikasi:

- 1) Rancangan Sirkuit dan Sistem Penyimpanan Energi: Perlu dirancang dan dioptimalkan sirkuit penyearah (rectifier/AC-DC converter) dan manajemen daya (power management circuit/PMC) yang efisien untuk tegangan rendah, serta sistem penyimpanan energi (baterai atau superkapasitor) yang sesuai untuk menyimpan energi yang dihasilkan secara sporadis.
- 2) Studi Kelayakan Tekno-Ekonomi dan Daur Hidup (LCA): Dilakukan analisis biaya-manfaat (cost-benefit analysis) yang komprehensif dan Analisis Daur Hidup (Life Cycle Assessment) untuk membandingkan kinerja lingkungan dan ekonomi material

ini dengan solasi konvensional, guna mendukung adopsi dalam kebijakan infrastruktur berkelanjutan.

- 3) Eksplorasi Aplikasi Lain: Konsep material multifungsi ini juga berpotensi untuk diaplikasikan pada bidang lain seperti lantai energi (energy harvesting floor), peredam getaran pada jembatan, atau panel bodi kendaraan listrik, yang dapat menjadi topik penelitian multidisiplin selanjutnya

## DAFTAR REFERENSI

- Khalid, M. Y., Arif, Z. U., Al Rashid, A., & Shahid, M. I. (2022). Recycled plastic waste fibers for reinforcing Portland cement mortar: A review. *Construction and Building Materials*, 326, 126893. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126893>
- Kim, H. S., Kim, J. H., & Kim, J. (2011). A review of piezoelectric energy harvesting based on vibration. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 12(6), 1129-1141. <https://doi.org/10.1007/s12541-011-0151-3>
- Kumar, A., Sharma, K., & Dixit, A. R. (2021). A review on the mechanical properties of natural fiber reinforced polymer composites. *Journal of Materials Research and Technology*, 15, 411-437. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.08.034>
- Mohanty, A. K., Misra, M., & Drzal, L. T. (2002). Sustainable bio-composites from renewable resources: Opportunities and challenges in the green materials world. *Journal of Polymers and the Environment*, 10(1), 19-26. <https://doi.org/10.1023/A:1021013921916>
- Nanthakumar, S. S., & Sivakumar, K. (2019). Vibration and noise control using natural fiber reinforced polymer composites: A review. *Journal of Natural Fibers*, 16(8), 1137-1154. <https://doi.org/10.1080/15440478.2018.1453434>
- Parida, S., & Samal, S. K. (2022). Piezoelectric polymer composites for mechanical energy harvesting: A review. *Materials Today: Proceedings*, 56, 2246-2252. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.517>
- Park, K. I., & Lee, M. (2015). Theory of piezoelectric materials and their applications in civil engineering. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 26(11), 1301-1314. <https://doi.org/10.1177/1045389X14546651>
- Petchwattana, N., & Covavisaruch, S. (2014). Mechanical and morphological properties of recycled polypropylene/banana fiber composites: Effect of fiber content and surface treatment. *Energy Procedia*, 56, 249-254. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.07.155>
- Ribeiro, C., Costa, C. M., & Lanceros-Méndez, S. (2018). Piezoelectric composites for sensor and actuator applications. *Wiley Encyclopedia of Composites*, 1-20. <https://doi.org/10.1002/9781118097298.weoc220>
- Sathishkumar, T. P., Naveen, J., & Satheeshkumar, S. (2014). Hybrid fiber reinforced polymer composites – a review. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 33(5), 454-471.

<https://doi.org/10.1177/0731684413516393>

- Sodano, H. A., Inman, D. J., & Park, G. (2004). A review of power harvesting from vibration using piezoelectric materials. *The Shock and Vibration Digest*, 36(3), 197-205. <https://doi.org/10.1177/0583102404043275>
- Toprak, A., & Tigli, O. (2014). Piezoelectric energy harvesting: State-of-the-art and challenges. *Applied Physics Reviews*, 1(3), 031104. <https://doi.org/10.1063/1.4896166>
- Wang, F., & Liu, D. (2019). Research progress on piezoelectric energy harvesting technology for roads. *Journal of Cleaner Production*, 239, 118042. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118042>
- Xie, M., & Wang, Y. (2020). Mechanical and piezoelectric properties of cementitious composites containing lead-free piezoelectric particles. *Construction and Building Materials*, 259, 119797. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119797>
- Yang, Y., & Tang, L. (2009). Equivalent circuit modeling of piezoelectric energy harvesters. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 20(18), 2223-2235. <https://doi.org/10.1177/1045389X09351757>
- Zhang, Y., Zhang, X., & Wang, L. (2023). A critical review on recycling of waste plastics in construction materials: Mechanical performance and durability. *Resources, Conservation and Recycling*, 190, 106827. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106827>
- Zhou, Y., Wang, F., & Zhang, L. (2022). Recent advances in lead-free piezoelectric materials for energy harvesting applications: A review. *Functional Materials Letters*, 15(01), 2230001. <https://doi.org/10.1142/S1793604722300019>