

## KAJIAN PUSTAKA KOMPOSIT LIMBAH PLASTIK SEBAGAI PAVING BLOK PENGHASIL ENERGI BERKELANJUTAN TERINTEGRASI PIEZOELEKTRIK DAN PHOTOVOLTAIC (VIZO)

*Farah Yuki Presetyawati<sup>1</sup>, M. Maulana Yusuf<sup>2</sup>, Alvin Ichwannur Ridho<sup>2</sup>, Afifah Harwanti<sup>1</sup>, Yulianto Agung Rezeki<sup>1</sup>, Sarwanto<sup>1</sup>, Dewanto Harjunowibowo<sup>1</sup>, Sri Budiawanti<sup>1</sup>, Suharno<sup>1</sup>, Yesiana Arimurti<sup>1</sup>, dan Dwi Teguh Rahardjo<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Program Studi Pendidikan Fisika, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Universitas Sebelas Maret

<sup>2</sup>Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Sebelas Maret

Email: farahyuki.fyp.fyp@student.uns.ac.id

### Abstract

*This work aims to improve pedestrian functions, improve the welfare of waste banks and scavengers, and fulfil electricity needs for the surrounding community towards Society 5.0. The method of writing is done with secondary data through the latest literature study. The literature study focused on the development of technology for processing plastic waste, photovoltaic (PV), and piezoelectric (PZT) and their use in road construction. The results of the discussion show the potential of plastic waste as a composite material for paving. Similarly, PV and PZT can be integrated together as a producer of renewable electrical energy. With this innovation, VIZO is expected to be able to reduce plastic waste and provide welfare for the community, scavengers, waste banks, and help local government energy-saving programs.*

**Keywords:** composite paving block, energy harvesting, piezoelectric, photovoltaic, plastic waste

### PENDAHULUAN

Indonesia merupakan salah satu negara berkembang yang memiliki luas wilayah 1,9 juta km<sup>2</sup> dan laju pertumbuhan penduduk sebesar 1,15% per tahun [1]. Pertumbuhan penduduk yang semakin meningkat menyebabkan peningkatan produksi sampah secara signifikan, kedua terbesar setelah China. Berdasarkan data Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan yang dikeluarkan pada tahun 2016, Indonesia menghasilkan 9,85 miliar lembar sampah kantong plastik setiap tahun dari 90 ribu gerai ritel modern di seluruh Indonesia. Hal ini semakin diperparah dengan waktu urai sampah plastik yang lama 20 hingga 500 tahun [2].

Pertumbuhan penduduk selalu diiringi dengan kebutuhan terhadap energi listrik. Ketersediaan energi listrik yang sesuai sasaran dan terjangkau bagi setiap pihak akan menguntungkan bagi industri, bisnis, pelayanan publik, dan kualitas hidup masyarakat lainnya baik secara langsung maupun tidak langsung [3]. Indonesia memiliki total produksi energi primer yang berasal dari panas bumi, gas bumi, batubara, dan energi terbarukan mencapai 411,6 MTOE pada tahun 2018 [4]. Sedangkan, total konsumsi energi (tanpa biomasa tradisional)

tahun 2018 sekitar 114 MTOE naik 8,4% dibandingkan tahun 2017. Konsumsi tersebut terbagi pada sektor transportasi 40%, industri 36%, rumah tangga 16%, komersial 6%, dan sektor lainnya 2%.

Dewan Energi Nasional mengatakan bahwa energi yang digunakan secara berlebihan akan mengalami penurunan kapasitas dan kualitas lingkungan. Produksi minyak bumi Indonesia selama 10 tahun terakhir menurun dari 346 juta barel pada tahun 2009 menjadi 238 juta barel di tahun 2018. Bahkan, Indonesia melakukan impor minyak bumi sebesar 35% dari Timur Tengah. Gas bumi juga mengalami penurunan produksi sehingga kapasitas ekspor berkurang hingga menjadi 40% pada tahun 2018 [4]. Sedangkan penggunaan sumber energi terbarukan diprediksi meningkat 6,5% per tahun walaupun masih dikisaran 20% hingga tahun 2050 [5].

Secara geografis, Indonesia berada di wilayah khatulistiwa dengan sumber energi surya yang melimpah. Indonesia memiliki intensitas radiasi matahari rata-rata sebesar 4,8 kWh/m<sup>2</sup> per hari. Total intensitas penyinaran per hari mencapai 4500 watt hour/m<sup>2</sup> yang menyebabkan Indonesia memiliki sumber energi matahari terbesar di ASEAN [6].

Sehingga pemanfaatan PV sebagai teknologi penghasil listrik dari cahaya matahari menjadi penting.

Selain itu, meskipun PZT hanya mampu mengubah getaran menjadi energy listrik berukuran mW [7], dalam beberapa hal transduser ini memiliki potensi tinggi untuk dimanfaatkan. Jasim et al. telah menyelidiki kemampuan beberapa PZT dalam satu blok dan hal-hal yang mempengaruhi kinerjanya secara mekanis untuk menghasilkan listrik [8]. Blok PZT ini dipasang pada jalan dan mampu menghasilkan hingga  $1\text{mW}/\text{cm}^2$ . Lebih jauh, Song et al. memanfaatkan PZT pada paving blok guna menghasilkan tenaga listrik untuk sebuah system sensor IoT [9].

Berdasarkan permasalahan dan potensi yang ada, inovasi pemanfaatan limbah plastic sebagai paving penghasil energi terbarukan dari piezoelektrik dan *photovoltaic* merupakan hal yang potensial dilakukan. Inovasi ini diperlukan guna mengurangi jumlah sampah plastik, sekaligus memanfaatkan energi matahari dan getaran dari pengguna jalan. Teknologi ini diharapkan mampu mengatasi persoalan limbah plastik di masyarakat dan menyediakan energi terus menerus dengan murah.

## METODE PENULISAN

Metode penulisan dilakukan dengan data sekunder melalui studi pustaka terkini berupa artikel-artikel yang berkaitan erat dengan topik mengenai pemanfaatan limbah plastik sebagai paving jalan. Selain itu, artikel-artikel terkini yang membahas tentang teknologi *harvesting energy* menggunakan panel sel surya dan atau piezoelektrik terintegrasi dalam paving juga dijadikan sebagai sumber rujukan artikel ini. Artikel yang ditulis juga merekomendasikan inovasi berupa paving berbahan komposit limbah plastik terintegrasi *photovoltaic* (PV) dan piezoelektrik (PZT) sebagai teknologi ramah lingkungan untuk menghasilkan energi berkelanjutan. Artikel ini juga membahas keterkaitan dampak positif pada kebersihan lingkungan dan kesejahteraan masyarakat sebagai wujud dari Society 5.0.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Energi dan lingkungan merupakan dua aspek penting dalam setiap pembangunan wilayah serta pemanfaatan energi terbarukan. Sehingga penelitian tentang keduanya masih menjadi hal menarik bagi para peneliti hingga saat ini. Berbagai teknologi digunakan dalam upaya pemanfaatan lingkungan untuk pemanenan energi terbarukan terutama di jalan. Teknologi termoelektrik, solar collector) photovoltaic [42], dan piezoelektrik [9]. Dimana teknologi termoelektrik, solar collector menggunakan panas dan photovoltaic memanfaatkan cahaya matahari untuk menghasilkan listrik, sedangkan piezoelektrik memanfaatkan getaran sebagai sumber pembangkit listriknya.

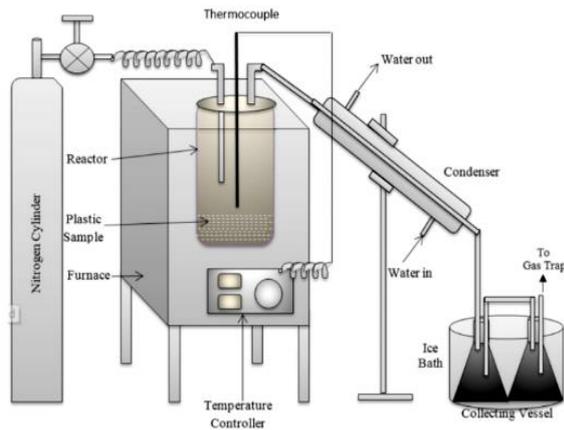
Selain teknologi tersebut, penggunaan bermacam material untuk aspal, dan paving blok telah dilakukan termasuk dari bahan daur ulang. Beberapa bahan daur ulang diantaranya adalah ampas biji besi, limbah kaca, dan limbah plastik.

## Teknologi Pengolahan Sampah Plastik

Pada tahun 2015, sekitar 6300 juta ton (Mt) limbah plastik telah dihasilkan dari 8300 Mt produksi plastik di dunia. Sembilan persen telah didaur ulang, 12% dibakar, dan 79% dibuang di lingkungan. Diprediksi pada tahun 2050, sekitar 12000 Mt limbah plastik akan dihasilkan [10]. Eropa memproduksi limbah plastik sebanyak 29.1 Mt dengan daur ulang dilakukan kurang dari 12% [11].

Proses daur ulang dapat dilakukan dengan cara mengubah plastik menjadi cairan bahan bakar melalui proses pirolisis dan kondensasi hidrokarbon. Plastik dipanaskan dalam reaktor bersuhu  $450\text{-}550\text{ }^\circ\text{C}$  sehingga diperoleh minyak [12]. Minyak tersebut kemudian didestilasi dalam reaktor hingga menguap dengan bantuan katalis seperti terlihat pada

Gambar 1. Hidrokarbon yang telah mencapai titik didih akan terkondensasi dalam kondensor. Proses tersebut diakhiri dengan filtrasi untuk mendapatkan bahan bakar yang bersih [13]. Pembuatan minyak secara pirolisis melalui pencampuran PP dan LLDPE dengan rasio 1:4 memerlukan waktu 3 jam serta temperatur  $430\text{-}450\text{ }^\circ\text{C}$  dan menghasilkan bahan bakar minyak sebesar 65-70% [14].



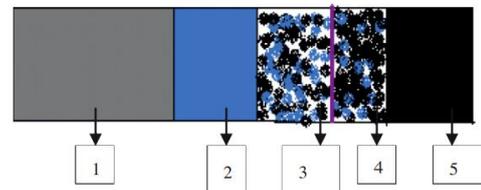
Gambar 1. Proses pirolisis limbah plastik [12]

Selain pirolisis, limbah plastik jenis *Polyethylene Terephthalate* (PET) dapat digunakan sebagai penguat struktur beton pada kolom beton hingga 51%. Namun, sistem penguatan ini belum diteliti ketahanannya dalam jangka panjang [15]. Andriastuti et al. menggunakan limbah botol PET sebagai ecobrick. Sebagai hasilnya, ecobrick ini kuat terhadap tekanan 407,89 kg [16]. Sementara itu, limbah PET di Malaysia diolah sebagai bahan tambahan pembuatan aspal. Penambahan 6% PET dari berat aspal dapat meningkatkan tingkat kekakuan campuran dan ketahanan terhadap deformasi permanen [17].

Limbah plastik jenis Low-density polyethylene (LDPE) dan High-density polyethylene (HDPE) juga dapat digunakan sebagai campuran aspal menggunakan metode Marshall. LDPE memiliki kinerja yang lebih baik daripada HDPE karena HDPE tahan terhadap kelembaban tinggi [18]. LDPE meningkatkan kekakuan konsentrat aspal, ketahanan *rutting*, serta berfungsi sebagai penahan keretakan [19]. Selain itu, limbah plastik LDPE yang diolah sebagai pengganti agregat bahan paving blok beton memiliki kuat tekan 23,81 MPa sesuai standar mutu SNI tipe B 03-0691-1996 [20]. Metode daur ulang ini mampu menghemat biaya pembuatan aspal hingga 5,18% jika dibandingkan dengan aspal biasa [21].

Pembuatan trotoar dengan campuran plastik mampu mengurangi kebutuhan aspal sekitar 10% dan mengurangi biaya Rs.30.000/km dalam satu lajur jalanan. Sistem ini, seperti yang terlihat pada Gambar 2, dapat diterapkan di lalu lintas padat karena memiliki ketahanan permukaan dan keterpaparan terhadap variasi iklim yang baik [22]. Perbaikan dan kontruksi jalan maupun trotoar dengan

menggunakan limbah plastik memiliki sifat hampa udara dengan stabilitas Marshall yang lebih tinggi sekitar 14,03-14,80 kN dibandingkan campuran bitumen konvensional yang berkisar 11,35 kN [23].

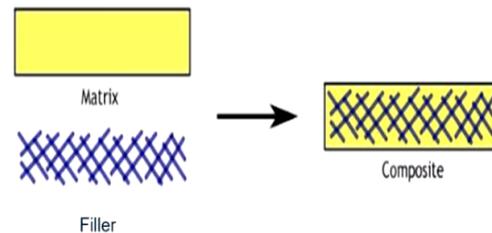


Keterangan:

1. Agregate
2. Plastik dengan agregat (lapisan polimer)
3. Campuran bitumen dan plastik
4. Aspal dan plastik
5. Aspal murni

Gambar 2. Campuran limbah plastik dan agregat aspal [22]

Metode daur ulang limbah plastik adalah komposit. Komposit merupakan hasil pencampuran beberapa material berskala mikroskopis dengan komposisi tertentu untuk membentuk material ketiga. Komposit terdiri dari fase penguat dan matrik dengan berat yang cukup ringan [24]. Metode pembuatan komposit dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Material Komposit dari Matrik dan *Filler*

Komposit dapat dibuat dengan menggunakan limbah plastik. Komposit plastik yang berfungsi sebagai paving blok cocok digunakan di area non-lalu lintas, seperti jalan setapak, *landscapes*, trotoar, dan wilayah genangan air. Hal ini karena komposit memiliki karakter penyerapan air yang rendah, kepadatan rendah hingga sedang, dan kekuatan tekan yang lebih rendah dari spesifikasi ambang batas global 5%-25% [25]. Meskipun demikian, plastik sebagai bahan material komposit memiliki titik lebur yang berbeda-beda seperti

terlihat pada **Error! Reference source not found.**

Sifat mekanik suatu komposit dipengaruhi oleh serat yang terkandung dalam komposit tersebut. Sifat-sifat tersebut antara lain memberikan karakter kaku, kuat, stabilisator panas, dan insulasi kelistrikan [26]. Sifat mekanik dan fisik material komposit dapat ditingkatkan melalui penambahan *binder* termoplastik berupa LDPE dan PET. Kombinasi kedua limbah plastik tersebut mampu memenuhi kriteria material bangunan dalam pengaplikasian beton ringan struktural dan *paving block* kategori C untuk pejalan kaki dan kategori D untuk pelataran taman [27].

Tabel 1. Titik Lebur Polimer [28]

Polyolefin	Titik Lebur (°C)
LDPE	115
HDPE	130
Polyethylene (PE)	135
Polypropylene (PP)	170
Polystyrene (PS)	240

Penggunaan limbah plastik untuk membuat paving dengan campuran pasir laut dan pasir darat memiliki absorpsi lebih tinggi dari semen [29]. Lebih jauh, Abukhettala and Fall [30] melakukan daur ulang sampah plastik sebagai bahan konstruksi dengan kombinasi kerikil dan pasir. Sebagai hasilnya, jalan yang dihasilkan memiliki sudut gesek yang lebih tinggi namun lebih rendah kekuatan tekannya daripada tanah tanpa campuran plastik

### Photovoltaic (PV)

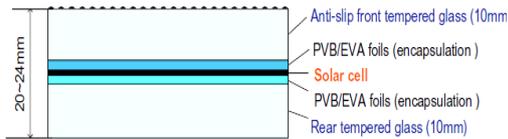
PV merupakan alat semikonduktor penghantar aliran listrik yang dapat mengubah cahaya menjadi energi listrik secara efisien dan murah. Beberapa sel dapat digabungkan guna memperoleh daya yang diinginkan secara seri, paralel atau kombinasi keduanya [31]. Pada umumnya efisiensi PV masih tergolong rendah, dimana tipe Si sebesar 10-25% [32], 18-28% untuk tipe GaAs, 17-19% untuk tipe *Thin-film chalcogenide*, 10% untuk tipe a-Si, 9-12% untuk tipe *Photochemical*, dan 8-11% untuk Organik [33,34]. Selain itu efisiensi ini akan menurun seiring panas yang berlebih hingga diatas 20°C [35]. PV ini banyak digunakan

untuk bangunan [36–38], rumah kaca [39,40], dan jalan/paving [41].

Zhou et al menganalisa sifat mekanis dari dua paving blok dari PV yang berbeda, struktur grid dan struktur lubang [42]. Mereka menggunakan 16 unit paving untuk tiap jenis struktur. Berdasarkan hasil yang diperoleh, struktur paving PV terbaik adalah struktur grid ditinjau dari segi kekuatan tekannya. Disamping itu, solar pavement dan solar panel telah dibuat dan diinvestigasi oleh Dezfooli et al. dimana pengukuran arus dan tegangan menjadi salah satu parameter yang diukur selain sifat mekanis keduanya [41]. Hasil investigasi menunjukkan bahwa tipe Solar pavement yang menggunakan aspal memiliki keunggulan dalam fleksibilitas, kekuatan tekan, dan cepat menyerap air karena lapisan aspal di lapisan bawahnya dibandingkan tipe Solar Panel. Meskipun demikian, daya listrik yang dihasilkan lebih kecil daripada tipe Solar Panel karena lapisan atas menutupi sebagian dari sel surya yang dibawahnya.

Lebih jauh, Ma et al. [43] mendemonstrasikan ubin PV berukuran 50cm<sup>2</sup> di Hongkong seperti terlihat pada Gambar 4. Hasil investigasi menunjukkan bahwa ubin PV ini memiliki kinerja konversi energi yang bagus, anti selip, tahan panas hingga 288°C, dan kuat menahan tekanan hingga 74kPa rata-rata beban manusia. Efthymiou et al. [44] juga menyelidiki pengaruh paving PV terhadap suhu permukaannya dan lingkungan sesudah pengaplikasian. Hasil penelitiannya menunjukkan penurunan suhu permukaan dan lingkungan sebesar 8°C dan 1°C. Penurunan suhu ini sejalan dengan hasil penelitian Xie et al. bahwa penggunaan bahan yang bersifat reflektif seperti kaca mampu menurunkan temperatur paving [45]. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan PV sebagai paving dapat menurunkan suhu sekitar hingga terasa lebih nyaman dan bahkan mampu menyuplai kebutuhan lampu jalan secara penuh.



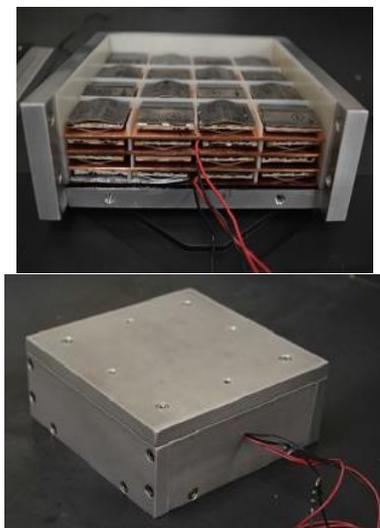


Gambar 4. Ubin PV dan irisan desainnya [43]

**Piezoelektrik (PZT)**

Material piezoelektrik untuk mengubah energi mekanis ke listrik telah banyak digunakan dalam berbagai aplikasi. Ada beberapa jenis PZT yang digunakan di pasar yakni PZT konvensional [7], *Piezo-Thermo generator* [46], dan *Piezo-phototronik* [47]. Dimana PZT konvensional mengubah energi getaran ke listrik, Piezo-Thermo generator mengubah getaran dan panas menjadi energi listrik, dan Piezo-phototronik mengubah getaran dan cahaya menjadi energi listrik.

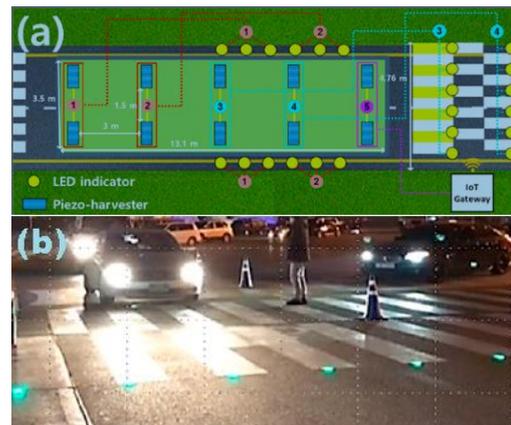
Aplikasi piezoelektrik sebagai pemanen energi getaran dalam paving telah dilakukan oleh Song et al. [9]. Mereka memasang 24 PZT secara paralel ke dalam modul paving blok dan menyelidiki berat minimum dan maksimum agar dapat menghasilkan getaran dan energi listrik. Dari penelitiannya didapatkan rentang beban adalah 60-100kg dan daya yang dihasilkan  $148.3 \text{ mW}_{\text{max}}$  dengan beban sebesar  $10 \text{ k}\Omega$ . Sedangkan Wang et al. menggunakan 8 PZT secara paralel dapat menghasilkan daya hingga  $50 \text{ mW}$  dengan tahanan beban  $4 \text{ k}\Omega$



Gambar 5. Susunan blok PZT dan bentuk paving uji [8]

Lebih jauh, Jasim et al. telah menyelidiki kemampuan beberapa PZT dalam satu blok, seperti terlihat pada Gambar 5, dan hal-hal yang mempengaruhi kinerjanya untuk menghasilkan listrik [8]. Blok PZT ini dipasang pada jalan dan mampu menghasilkan hingga  $2.1 \text{ mW}$  pada getaran  $5 \text{ Hz}$  dengan tahanan beban  $300 \text{ k}\Omega$ . Mereka mengatakan bahwa energi keluaran ini meningkat dengan frekuensi getaran dan besar beban yang dipasang. Hal ini senada dengan Cao et al. [48]. Namun demikian, keseimbangan antara kekuatan tarik dan regangan terhadap energi keluaran harus dijaga demi keawetan PZT.

Dalam aplikasi riilnya, Yong et al. [49] menguji delapan modul paving blok berisi masing-masing 10 PZT guna menghidupkan lampu LED tepi jalan dan sistem monitoring mandiri. Diperoleh rerata daya minimum dan maksimum sistem pada  $233 \text{ mW}$  hingga  $1140 \text{ mW}$ . Pengujian ini dilakukan selama 5 bulan dan mampu mengoperasikan 24 LED sebagai indikator jalan beserta sistem monitoring mandiri untuk mendeteksi kebocoran, temperatur dan regangan dengan sukses seperti ditunjukkan oleh Gambar 6. Hal ini menunjukkan bahwa aplikasi modul PZT skala besar berpotensi untuk digunakan sebagai alternatif sumber energi di jalan.



Gambar 6. (a) lokasi pemasangan PZT, dan (b) hasil uji produk [49]

Berdasarkan hasil review artikel yang telah dilakukan, diperoleh beberapa poin penting terkait dengan pemanfaatan limbah plastik, PV dan PZT sebagai teknologi pemanen energi. Hasil dari review artikel menunjukkan tingkat urgensi manajemen pengolahan yang baik untuk mengatasi permasalahan sampah plastik di dunia terutama di Indonesia. Selain

metode pembakaran sampah plastik dalam tanur suhu tinggi, metode pirolisis, dan pendauran ulang sampah plastik memiliki potensi untuk menyelesaikan permasalahan akibat sampah plastik. Terutama mendaur ulang plastik menjadi beberapa produk layak guna dan pemanfaatannya sebagai bahan campuran dalam konstruksi bangunan dan jalan seperti aspal dan paving menjadi hal yang menarik untuk ditindaklanjuti. Disamping itu, pemanfaatan limbah plastik sebagai material paving sudah banyak dilakukan dan memiliki keunggulan dari segi ekonomi, kekuatan, dan umur panjang.

Hasil review menunjukkan bahwa belum pernah dilakukan penelitian mengenai integrasi antara komposit limbah plastik, PV, dan PZT dalam paving jalanan sekaligus. PV dan PZT mampu saling mengisi sifat energi terbarukan yang *intermittent*. Pemanfaatan PV dan PZT sebagai teknologi penghasil energi dari cahaya matahari, getaran dari pejalan kaki, pesepeda memiliki potensi tinggi untuk dimanfaatkan sebagai sumber energi alternatif dalam perangkat elektronika berdaya rendah. Beberapa aplikasi skala besar di jalan raya menunjukkan bahwa teknologi ini dapat digunakan dengan baik selama berada pada batasan kemampuan modul paving terhadap tekanan, air, dan cuaca tertentu.

## SIMPULAN

Artikel ini bertujuan untuk mendapatkan *state-of-the-art* sains dan teknologi pemanfaatan limbah plastik, PV dan PZT sebagai material guna mendukung pengendalian limbah plastik dan pemanfaatan energi terbarukan. Berdasarkan hasil kajian pustaka, maka dapat ditarik kesimpulan bahwa limbah plastik dapat digunakan dalam bentuk komposit sebagai material pembuatan paving jalan yang ringan, awet, murah, dan ramah lingkungan. Selain itu, PV dan PZT berpotensi tinggi untuk digunakan secara bersama-sama sebagai pengubah energi matahari dan getaran sebagai energi listrik. Energi listrik ini dapat digunakan untuk berbagai keperluan termasuk sebagai mobile charging, penerangan jalan LED, LED indikator keamanan jalan, atau piranti elektronika lain berdaya rendah. Simpulan ditulis dengan jelas dan ringkas dalam bentuk paragraf dan harus menjawab tujuan penelitian. Simpulan harus berkontribusi pada penelitian saat ini tentang kemajuan ilmu

pengetahuan dan menyarankan percobaan selanjutnya untuk kemajuan dari penelitian.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih ditujukan kepada Universitas Sebelas Maret atas melalui pendanaan Penelitian Hibah Grup Riset (Penelitian HGR-UNS)

## DAFTAR PUSTAKA

- 1 Badan Pusat Statistik. Statistik Indonesia Statistical Yearbook of Indonesia 2020.2020.
- 2 Kementrian Keuangan Republik Indonesia. 2019. Bumi Dalam Kantong Plastik. Media Keuang. .
- 3 Rajagukguk ASF, Pakiding M, Rumbayan M. 2015. Kajian Perencanaan Kebutuhan dan Pemenuhan Energi Listrik di Kota Manado. E-Journal Tek. Elektro Dan Komput. **4**(3): 1.
- 4 Dewan Energi Nasional. Indonesia Energy Out Look 2019.2019.
- 5 BPPT. Outlook Energi Indonesia 2020. Adiarso, E Hilmawan and A Sugiyono, ed. Pusat Pengkajian Industri Proses dan Energi (PPIPE), Jakarta. 2020.
- 6 Safrizal. 2017. RANCANGAN PANEL SURYA SEBAGAI SUMBER ENERGI LISTRIK Jurnal DISPROTEK. J. Disprotek. **8**(2): 75.
- 7 Garimella RC, Sastry VR, Mohiuddin MS. 2015. Piezo-Gen - An Approach to Generate Electricity from Vibrations. Procedia Earth Planet. Sci. **11**: 445.
- 8 Jasim A, Yesner G, Wang H, Safari A, Maher A, Basily B. 2018. Laboratory testing and numerical simulation of piezoelectric energy harvester for roadway applications. Appl. Energy. .
- 9 Song GJ, Cho JY, Kim KB, Ahn JH, Song Y, Hwang W, Hong S Do, Sung TH. 2019. Development of a pavement block piezoelectric energy harvester for self-powered walkway applications. Appl. Energy. .
- 10 Geyer R, Jambeck JR, Law KL. 2017. Production , use , and fate of all plastics ever made. Sci. Adv. **3**(July): 25.
- 11 PlasticsEurope. 2020. K 2019 : PlasticsEurope unveils updated plastics data and Voluntary Commitment progress. EURACTIV PR. 1.

- 12 Zhang F, Zhao Y, Wang D, Yan M, Zhang J, Zhang P, Ding T, Chen L, Chen C. 2020. Current technologies for plastic waste treatment: A review. *J. Clean. Prod.* (xxxx): 124523.
- 13 Kumar Jha K, Kannan TTM. 2020. Recycling of plastic waste into fuel by pyrolysis - a review. *Mater. Today Proc.* (xxxx): 3.
- 14 Farshi R, R R, Raj MALA. 2016. Clay Catalyst in PP and LLDPE Conversion to Fuel Roopa. *Res. J. Chem. Environ. Sci.* **4**(4): 52.
- 15 Ongpeng JMC, Barra J, Carampatana K, Sebastian C, Yu JJ, Aviso KB, Tan RR. 2020. Strengthening rectangular columns using recycled PET bottle strips. *Eng. Sci. Technol. an Int. J.* (xxxx): 1.
- 16 Andriastuti BT, Teknik J, Fakultas L, Universitas T, Tanjungpura U. 2019. Potensi Ecobrick dalam Mengurangi Sampah Plastik Rumah Tangga di Kecamatan Pontianak Barat. *J. Teknol. Lingkung. Lahan Basah.* **07**(2): 55.
- 17 Ahmadinia E, Zargar M, Karim MR, Abdelaziz M, Shafiqh P. 2011. Using waste plastic bottles as additive for stone mastic asphalt. *Mater. Des.* **32**(10): 4844.
- 18 Haider S, Hafeez I, Jamal, Ullah R. 2020. Sustainable use of waste plastic modifiers to strengthen the adhesion properties of asphalt mixtures. *Constr. Build. Mater.* **235**: 117496.
- 19 Almeida A, Capitão S, Bandeira R, Fonseca M, Picado-Santos L. 2020. Performance of AC mixtures containing flakes of LDPE plastic film collected from urban waste considering ageing. *Constr. Build. Mater.* **232**: 117253.
- 20 Indrawijaya B, Wibisana A, Setyowati AD, Iswadi D, Naufal DP. 2019. Pemanfaatan Limbah Plastik LDPE sebagai Pengganti Agregat untuk Pembuatan Paving Blok Beton. *J. Ilm. Tek. Kim. UNPAM.* **3**(1): 1.
- 21 Hake SL, Damgir RM, Awsarmal PR. 2020. Utilization of Plastic waste in Bitumen Mixes for Flexible Pavement. *Transp. Res. Procedia.* **48**(2019): 3779.
- 22 Vasudevan R, Ramalinga Chandra Sekar A, Sundarakannan B, Velkennedy R. 2012. A technique to dispose waste plastics in an ecofriendly way - Application in construction of flexible pavements. *Constr. Build. Mater.* **28**(1): 311.
- 23 Nkanga UJ, Joseph JA, Adams F V., Uche OU. 2017. Characterization of Bitumen/Plastic Blends for Flexible Pavement Application. *Procedia Manuf.* **7**: 490.
- 24 Eqitha Dea Clareyna, Mawarani LJ. 2013. Pembuatan dan Karakteristik Komposit Polimer Berpenguat Bagasse. *J. Tek. Pomits.* **2**(2): 208.
- 25 Agyeman S, Obeng-Ahenkora NK, Assiamah S, Twumasi G. 2019. Exploiting recycled plastic waste as an alternative binder for paving blocks production. *Case Stud. Constr. Mater.* **11**: e00246.
- 26 Fajri R, Tarkono T, Sugiyanto S. 2013. Studi Sifat Mekanik Komposit Serat Sansevieria Cylindrica Dengan Variasi Fraksi Volume Bermatrik Polyester. *J. Ilm. Tek. Mesin FEMA.* **1**(2): 97963.
- 27 Putra DP, Wicaksono ST, Rasyida A, Bayuaji R. 2018. Studi Pengaruh Penambahan Binder Thermoplastic LDPE dan PET Terhadap Sifat Mekanik Komposit Partikulat untuk Aplikasi Material Bangunan. *J. Tek. ITS.* **7**(1): .
- 28 Bhaskar K, Jayabalakrishnan D, Vinoth Kumar M, Sendilvelan S, Prabhahar M. 2020. Analysis on mechanical properties of wood plastic composite. *Mater. Today Proc.* (xxxx): .
- 29 Tulashie SK, Boadu EK, Kotoka F, Mensah D. 2020. Plastic wastes to pavement blocks: A significant alternative way to reducing plastic wastes generation and accumulation in Ghana. *Constr. Build. Mater.* **241**: 118044.
- 30 Abukhattala M, Fall M. 2021. Transportation Geotechnics Geotechnical characterization of plastic waste materials in pavement subgrade applications. *Transp. Geotech.* **27**(September 2020): 100472.
- 31 Zhang Y, Ji G, Ma D, Chen C, Wang Y, Wang W, Li A. 2020. Exergy and energy analysis of pyrolysis of plastic wastes in rotary kiln with heat carrier. *Process Saf. Environ. Prot.* **142**: 203.
- 32 Zimmermann S, Helmers H, Tiwari

- MK, Paredes S, Michel B, Wiesenfarth M, Bett AW, Poulikakos D. 2015. A high-efficiency hybrid high-concentration photovoltaic system. *Int. J. Heat Mass Transf.* **89**: 514.
- 33 Green MA, Emery K, Hishikawa Y, Warta W, Dunlop ED. 2013. Solar cell efficiency tables (version 42). *Prog. Photovolt Res. Appl.* (version 42): 827.
- 34 Barkhouse DAR, Gunawan O, Gokmen T, Todorov TK, Mitzi DB. 2012. Device characteristics of a 10.1% hydrazine-processed Cu<sub>2</sub>ZnSn(Se,S)<sub>4</sub> solar cell. *Prog. Photovoltaics Res. Appl.* **20**(1): 6.
- 35 Wu Y, Eames P, Mallick T, Sabry M. 2012. Experimental characterisation of a Fresnel lens photovoltaic concentrating system. *Sol. Energy.* **86**(1): 430.
- 36 Olivieri L, Caamaño-Martín E, Moralejo-Vázquez FJ, Martín-Chivelet N, Olivieri F, Neila-Gonzalez FJ. 2014. Energy saving potential of semi-transparent photovoltaic elements for building integration. *Energy.* **76**: 572.
- 37 Young C-H, Chen Y-L, Chen P-C. 2014. Heat insulation solar glass and application on energy efficiency buildings. *Energy Build.* **78**: 66.
- 38 Schuepbach E, Muntwyler U, Schott T, Jost M, Renken C, Lanz M. 2015. Swiss energy strategy 2050: Research on photovoltaic electricity production. 2015 10th Int. Conf. Ecol. Veh. Renew. Energies, EVER 2015. .
- 39 Cuce E, Harjunowibowo D, Cuce PM. 2016. Renewable and sustainable energy saving strategies for greenhouse systems: A comprehensive review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **64**: 34.
- 40 Harjunowibowo D, Ding Y, Omer S, Riffat S. 2018. Recent active technologies of greenhouse systems – a comprehensive review. *Bulg. J. Agric. Sci.* **24**(1): 158.
- 41 Dezfooli AS, Nejad FM, Zakeri H, Kazemifard S. 2017. Solar pavement: A new emerging technology. *Sol. Energy.* **149**: 272.
- 42 Zhou B, Pei J, Richard B, Snm D, Zhang J. 2020. Analysis of mechanical properties for two different structures of photovoltaic pavement unit block. *Constr. Build. Mater.* **239**: 117864.
- 43 Ma T, Yang H, Gu W, Li Z, Yan S. 2019. Development of walkable photovoltaic floor tiles used for pavement. *Energy Convers. Manag.* **183**(October 2018): 764.
- 44 Efthymiou C, Santamouris M, Kolokotsa D, Koras A. 2016. ScienceDirect Development and testing of photovoltaic pavement for heat island mitigation. *Sol. Energy.* **130**: 148.
- 45 Xie N, Li H, Zhang H, Zhang X, Jia M. 2020. Solar Energy Materials and Solar Cells Effects of accelerated weathering on the optical characteristics of reflective coatings for cool pavement. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.* **215**(July): 110698.
- 46 Zhou Y, Zhang S, Xu X, Liu W, Zhang S, Li G, He J. 2020. Dynamic piezothermoelectric generator for simultaneously harvesting mechanical and thermal energies. *Nano Energy.* **69**(October 2019): 104397.
- 47 Michael G, Zhang Y, Nie J, Zheng D, Hu G, Liu R, Dan M, Li L, Zhang Y. 2020. High-performance piezophototronic multijunction solar cells based on single-type two-dimensional materials. *Nano Energy.* **76**(June): 105091.
- 48 Cao Y, Sha A, Liu Z, Li J, Jiang W. 2020. Energy output of piezoelectric transducers and pavements under simulated traffic load. *J. Clean. Prod.* **279**: 123508.
- 49 Yong J, Kim K, Seop W, Ho C, Hwan J. 2019. A multifunctional road-compatible piezoelectric energy harvester for autonomous driver-assist LED indicators with a self-monitoring system. *Appl. Energy.* **242**(December 2018): 294.