



Sistem Pemanen Energi Berbasis Piezoelektrik Sebagai Sumber Energi Terbarukan Pada Konstruksi Jalan

Ayi Muhsinin¹, Hilman Badruzzaman², Agi Rivi Hendardi³

¹Depratemen Teknik Sipil Fakultas Teknik, Universitas Perjuangan

²Depratemen Teknik Sipil Fakultas Teknik, Universitas Perjuangan

³Depratemen Teknik Sipil Fakultas Teknik, Universitas Perjuangan

2003020059@unper.ac.id

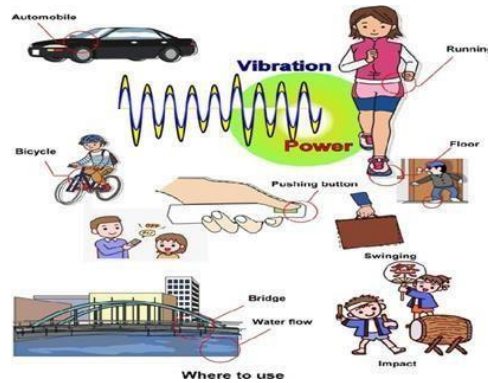
Abstrak

Piezoelektrik adalah bahan yang dapat menghasilkan energi listrik ketika diberikan tekanan serta regangan secara mekanik begitupun sebaliknya. Energi kinetik yang dihamburkan secara besar-besaran dari lalu lintas jalan raya adalah sumber energi berkelanjutan yang dapat diperoleh melalui efek piezoelektrik. Perancangan sistem diperlukan untuk mengubah energi deformasi yang disebabkan oleh kendaraan yang bergerak dari perkerasan menjadi energi listrik secara optimal, sedangkan inovasi pemanfaatan piezoelektrik dalam bidang teknik sipil di Indonesia masih terbatas. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk memperkenalkan sistem piezoelektrik sebagai sumber energi terbarukan dan berkelanjutan yang memanfaatkan energi deformasi kendaraan menjadi energi listrik dengan media perkerasan jalan. Metode penelitian menggunakan metode deskriptif dengan data kuantitatif berdasarkan penelitian yang sudah dilakukan oleh para peneliti yang tertuang dalam beberapa jurnal dan telah melakukan perancangan serta pengujian sistem pemanen energi. Hasil penelitian menunjukkan, beberapa penelitian telah mendesain sistem pemanen energi jalan raya berbasis piezoelektrik yang mendapatkan hasil potensial listrik yang optimal diantaranya: ditemukan sistem pemanen energi piezoelektrik inovatif yang mencapai kepadatan energi setinggi 15,37 J/(m.pass.lane) . Kinerja pemanenan energi adalah dipengaruhi oleh bobot kendaraan, kecepatan, dan lokasi pemasangan modul energi. Mekanisme amplifikasi memungkinkan perangkat untuk sepenuhnya mengeksplorasi potensi konversi daya dari bahan piezoelektrik dan dapat mengirimkan listrik yang dipanen jauh lebih banyak daripada yang dihasilkan oleh bahan piezoelektrik yang sama di bawah langsung pembebanan tekan tanpa amplifikasi. Teknologi pemanen energy berbasis piezoelektrik memiliki potensi besar untuk menjadi bagian dari jalan raya pintar. Hal ini membuktikan bahwa pemanfaatan system piezoelektrik sangat berpotensi sebagai sumber energy terbarukan di Indonesia.

Kata kunci: Piezoelektrik, Deformasi, Energi, Jalan.

1. Pendahuluan

Kebutuhan akan energi listrik terus mengalami peningkatan seiring dengan bertambahnya populasi manusia. Sistem pemanen energi adalah teknik yang sangat menjanjikan yang dapat membantu memecahkan tantangan energi global tanpa menghabiskan sumber daya alam. Sistem pemanenan energi menangkap energi yang tidak terpakai dan terbuang dan mengubahnya menjadi bentuk yang lebih bermanfaat (Jasim et al., 2017). Pengetahuan tentang material, mekanika, dan sistem sensor menawarkan solusi revolusioner untuk melestarikan kondisi transportasi, infrastruktur dan mengembangkan teknologi energi hijau.

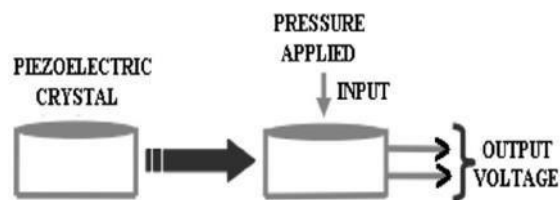


Gambar 1. Ilustrasi Eksistensi Energi Getaran dalam Kehidupan Sehari-hari

(Kalyani, Pias and Vyas, 2015, p. 9)

Sumber: <http://vibpower.w3.kanazawa-u.ac.jp/about-e.html>

Pada Gambar 1 menjelaskan potensi atau eksistensi energi getaran dalam kehidupan sehari-hari. Energi getaran adalah energi terbarukan yang tidak menimbulkan polusi, yang dapat memberikan solusi baru untuk usia energi yang pendek (Zhang, Ding and Wang, 2021). Jalan merupakan media yang dapat menghasilkan energi getaran yang besar dari laju kendaraan di atasnya, hal ini dikarenakan perkerasan jalan raya dirancang untuk menahan jutaan lintasan kendaraan selama masa pakainya, dimana perkerasan tersebut mengalami tegangan, regangan, deformasi dan getaran yang cukup besar dari kendaraan yang bergerak. Energi ini dihamburkan di perkerasan sebagai energi yang terbuang, yang menyebabkan peningkatan risiko kerusakan perkerasan (Jasim et al., 2017). Dengan demikian energi yang dihasilkan dari energi kinetik yang dihamburkan secara besar-besaran dari lalu lintas jalan raya dapat dijadikan sumber energi berkelanjutan yang dapat diperoleh melalui efek piezoelektrik.



Gambar 2. Prinsip Kerja Efek Piezoelektrik (Kalyani, Pias and Vyas, 2015,p. 10)

Sumber: (Kalyani, Pias and Vyas, 2015)

Piezoelektrik adalah bahan yang dapat menghasilkan energi listrik ketika diberikan tekanan serta regangan secara mekanik begitupun sebaliknya (Wati, 2021) prinsip kerja sebagaimana pada Gambar 2. Teknologi pemanen energi piezoelektrik mampu mengumpulkan dan menggunakan berbagai energi getaran, yang selalu ada di lingkungan manusia. Misalnya, jenis energi yang terjadi di berbagai jenis peralatan mekanik, di gedung-gedung, di jalan dan di rel kereta api (Hwang et al., 2019). transduser piezoelektrik dapat dirancang untuk memanen energi mekanik terbuang yang dihasilkan di bawah beban roda yang dapat disimpan dalam kapasitor elektronik atau terintegrasi dengan sensor untuk pemantauan kondisi jalan. Energi

yang terkumpul juga dapat digunakan untuk lampu lalu lintas, rambu listrik, penerangan, dan fitur keselamatan di pinggir jalan (Jasim et al., 2017).

Sejumlah penelitian telah dilakukan untuk memaksimalkan kinerja transduser piezoelektrik dalam upaya menghasilkan daya listrik yang optimal, di Indonesia implementasi transduser piezoelektrik yang paling banyak adalah transduser speed bumper. Transduser speed bumper dikembangkan oleh Yulia et al., (2016) memanfaatkan waste vibration energy dari gerakan kendaraan bermotor menggunakan polisi tidur piezoelektrik dengan hasil efisiensi maksimum 2,87%. Afif and Rini, (2018) melakukan penelitian perbandingan nilai tegangan vs gaya berat benda dalam prototype skala mini, teknologi polisi tidur terdiri dari lempeng utama, pegas, lempeng piezoelektrik dan baterai penyimpanan tegangan listrik. Penelitian serupa dilakukan oleh Sidiq, Syahrillah and Isra, (2021) speed bump memanfaatkan 38 disk piezoelektrik yang disusun secara seri dan di uji dengan tekanan dari kendaraan bermotor dengan hasil tegangan 17,88 Volt dan arus listrik 0,39 Ampere, daya listrik 6,97 Watt dengan rata-rata listrik yang dihasilkan 2,378 Watt. Aziz, Fadililah and Eng, (2021) dengan konsep pengujian yang sama mendapatkan hasil tegangan 12 Vdc-16 Vdc dan arus 0,15 A yang kemudian digunakan untuk mengisi baterai/aki dengan interval waktu 23,3 jam. Pathoni et al., (2021) dalam bentuk implementasi yang sama mendapat hasil tegangan yang bervariasi sekitar 1-1,8 Volt. Pratama, Herdiyansyah and Manfaluthy, (2022) mengintegrasikan transduser piezoelektrik yang divalidasi menggunakan 200 kali pijakan pada prototype speed bump, dari total 200 kali pijakan pada speed bump tegangan yang disimpan pada ACCU terus mengalami kenaikan tetapi tegangan yang dihasilkan oleh piezoelektrik terus mengalami penurunan.

Berdasarkan uraian beberapa penelitian diatas, dapat dikatakan bahwa bentuk implementasi dari beberapa perancangan sistem transduser piezoelektrik masih belum bekerja secara maksimal ditinjau dari efisiensi energi yang dihasilkan pada setiap penelitian. Sementara itu beberapa penelitian mengenai sistem pemanen energy piezoelektrik juga telah dilakukan di beberapa negara luar Indonesia dalam bentuk implementasi yang berbeda, penelitian yang dilakukan secara lebih detail dan penuh pertimbangan dari berbagai parameter yang memiliki pengaruh dalam menghasilkan efisiensi energy yang lebih baik sehingga hasil potensial listrik yang didapat cenderung lebih maksimal. Tujuan dari studi ini adalah merepresentasikan beberapa hasil penelitian yang telah dilakukan tentang pemanfaatan transduser piezoelektrik pada konstruksi jalan dalam bentuk implementasi yang berbeda , akan tetapi memiliki nilai efisiensi yang lebih baik, guna dijadikan sebagai bahan kajian untuk pengembangan pemanfaatan sistem transduser piezoelektrik pada konstruksi jalan di Indonesia.

2. Metode

Metode penelitian menggunakan metode deskriptif dengan data kuantitatif berdasarkan penelitian yang sudah dilakukan oleh para peneliti yang tertuang dalam beberapa jurnal dan telah melakukan perancangan serta pengujian sistem pemanen energi. Data yang digunakan pada penelitian ini adalah data sekunder yang didapat dengan melakukan studi literature untuk mencari dan menentukan referensi mengenai jurnal, buku, artikel yang berkaitan dengan tema penelitian. Studi literature yang dilakukan adalah dengan menganalisis penelitian yang sudah dilakukan berkenaan dengan sistem pemanen energi berbasis piezoelektrik pada konstruksi jalan di Indonesia untuk meninjau hasil penelitian dan kualitas hasil dari penelitian tersebut. Kemudian studi literature dilanjutkan dengan menganalisis beberapa penelitian yang telah dilakukan oleh para peneliti dari luar

Indonesia yang memiliki potensi untuk mengatasi bentuk permasalahan yang terdapat pada penelitian di Indonesia terkait transduser piezoelektrik. Terakhir dengan melakukan analisis data, pada tahap ini data yang telah didapatkan selanjutnya direpresentasikan sesuai dengan hasil penelitian yang telah dilakukan kemudian di analisis sebagai bahan untuk menyusun kesimpulan.

3. Hasil

3.1. Harvesting Energy Vibration

Metode pemanenan energi getaran dapat menggunakan salah satu dari dua jenis teknologi induksi elektromagnetik dimana energi diambil dari medan magnet yang dihasilkan dalam motor induktif AC dan pemanenan energy piezoelektrik dari getaran mekanis (Kalyani, Pious and Vyas, 2015). Pemanen energy diartikan sebagai upaya menghimpun atau mengumpulkan energy yang nilainya relative kecil kemudian disimpan dalam satu media penyimpanan sehingga terakumulasi menjadi energy yang lebih besar dan dapat digunakan (Wati, 2021).

Tabel 1. Sumber energy mekanik disekitar kita yang dapat dipanen menjadi energy listrik

Tubuh	Transportasi	Infrastruktur	Industri	Lingkungan
Manusia/Getaran				
Menarik nafas, mengeluarkan nafas, aliran/tekanan darah, berjalan, gerakan tangan, gerakan jari, <i>jogging</i> , <i>talking</i>	Pesawat, mobil, kereta, roda, track, pedal, rem, mesin, turbin, getaran, noise	Jembatan, jalan, terowongan, kebun, struktur rumah, kendali saklar, pipa gas/air, sistem AC	Motor, kompresor, <i>chiller</i> , pompa, kipas, getaran, pemotong, <i>dicing</i> , <i>noise</i>	Angin, arus/ombak laut, gelombang akustik

Sumber: (Wati, 2021)

3.2. Piezoelektrik

Keramik piezoelektrik adalah polikristal yang dibuat dengan oksida maksimum (zirconia, timbal oksida, titania, dll.) yang mengalami reaksi sintering dan solid state tinggi, kemudian melalui arus searah tegangan tinggi terpolarisasi, sehingga memiliki istilah umum efek piezoelektrik dari keramik feroelektrik (Tianze et al., 2009). Kalyani, Pious and Vyas, (2015) mengemukakan Kristal piezoelektrik mengubah getaran mekanik menjadi energy listrik . berbagai penelitian telah membuktikan baha energy yang dipanen tersebut sangat baik dalam skalabilitas, kemampuan, kepadatan energy yang tinggi dan kompabilitas dengan teknologi elektronik standard. Tentang prinsip kerja piezoelektrik sebagaimana pada Gambar 2 piezoelektrik diselidiki pada akhir 1990-an. Teknologi ini sangat berguna yang terus menerus muncul. Ketika muatan elektronik terakumulasi dalam bahan padat tertentu (seperti Kristal, beberapa keramik, dan materi biologis seperti tulang, DNA, dan protein tertentu) yang dihasilkan sebagai respon terhadap tekanan mekanis yang diterapkan. Dengan kata lain kita dapat mengatakan bahwa ketika kristal tertentu seperti kuarsa atau keramik terkena regangan

mekanik maka polarisasi listrik terjadi didalamnya dan tingkat polarisasi berbanding lurus dengan regangan yang diterapkan. Dalam studi ini material piezoelektrik yang digunakan adalah PZT Lead Zirconate Titanate yang termasuk pada keramik polikrystalin

3.3. Transduser

Transduser adalah perangkat elektronik yang mengubah satu bentuk energy ke bentuk energy lainnya. Seperti energy listrik, energy mekanik, energy elektromagnetik, energy kimia, energy akustik, dan energy panas dll (Kalyani, Pious and Vyas, 2015). Studi ini merepresentasikan inovasi sistem transduser dengan memanfaatkan piezoelektrik material untuk mengubah energy mekanik menjadi energy listrik. Beberapa inovasi tersebut sebagaimana yang telah diuraikan pada bagian hasil studi diatas

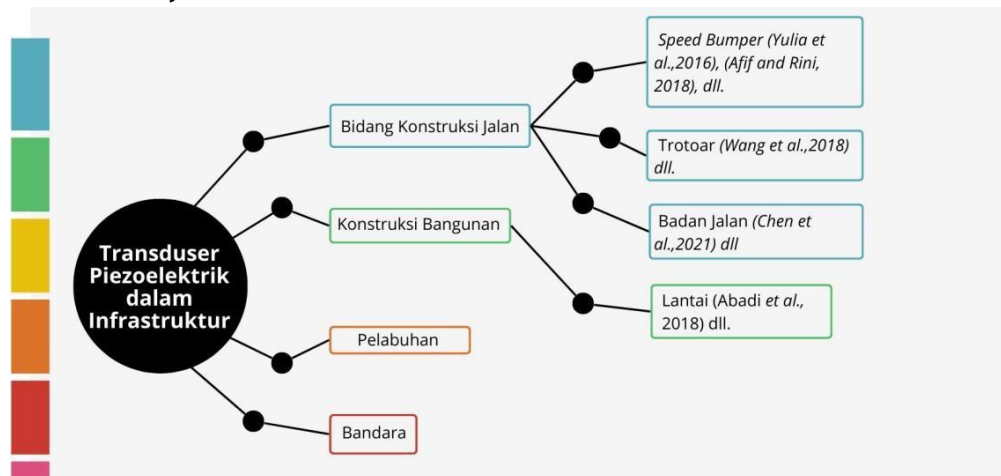
3.4. Energi Listrik

Energi listrik merupakan kemampuan untuk melakukan atau menghasilkan usaha listrik (kemampuan yang diperlukan untuk memindahkan muatan dari suatu titik ke titik yang lain) (Wati, 2021). Energi listrik di era modern telah berkembang pesat sejak pertama kali ditemukan. Energi listrik bukan hanya sebagai bahan penelitian melainkan juga sebagai sumber tenaga penggerak untuk peralatan yang digunakan manusia (Anwar et al., 2019). Sehingga inovasi pengelolaan dan pemberdayaan energi listrik ini sangat diperlukan untuk keberlangsungan hidup manusia. Secara matematis energy listrik dilambangkan dengan (P). sedangkan persamaan yang digunakan untuk menentukan besar energy listrik sebagai berikut:

$$P = QV$$

Dimana P adalah energy listrik dalam satuan watt (W), Q adalah muatan listrik dalam satuan coulomb (C) dan V adalah beda potensial listrik dalam satuan volt (V) (Wati, 2021).

3.5. Potensi Teknologi Harvesting Energy Berbasis Piezoelektrik untuk Konstruksi Jalan



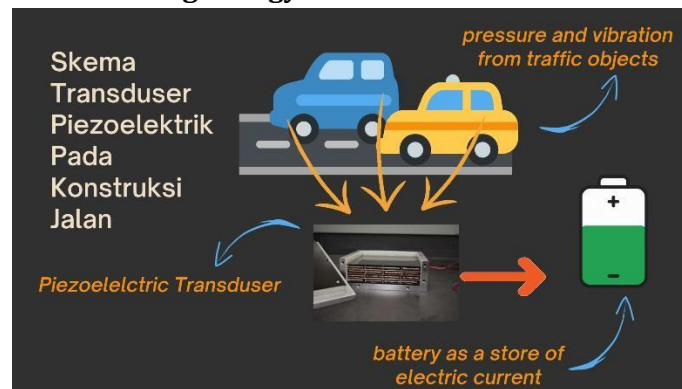
Gambar 8. Diagram Perkembangan Teknologi Harvesting Energy Piezoelectric dalam Infrastruktur dan Konstruksi

Perkembangan teknologi pemanen energi berbasis piezoelektrik terus dikembangkan, salah satunya inovasi dalam bentuk implementasi infrastruktur dan konstruksi yang dapat dilihat pada Gambar 7. Penelitian yang dilakukan oleh Kim,

Shen and Ahad, (2015) Hasil penelitian awalnya menunjukkan bahwa biaya energi yang diratakan relatif tinggi, tetapi pembangkit energi potensial dapat ditingkatkan dengan beberapa variabel. Sehingga penelitian tersebut perlu dilakukan lebih lanjut, meskipun demikian keoptimisan terbentuk pada proyek penelitian tersebut dengan menyatakan bahwa proyek penelitian tersebut akan berkontribusi pada kemungkinan kapasitas energi swadaya jalan raya. Kemudian pembuktian tersebut terjawab dengan beberapa pernyataan dari para peneliti dalam bidang ini yang mengemukakan bahwa potensi teknologi harvsting energy berbasis piezoelektrik untuk kostruksi Jalan cukup besar. Salah satunya adalah hasil penelitian oleh Chen et al., (2021) yang berhasil untuk merekomendasikan system pemanenan energi piezoelektrik jalan raya yang inovatif, Klaimnya bahwa sistem prototipe telah mencapai kepadatan energi tertinggi yang dilaporkan dalam literature, dan memiliki potensi besar untuk menjadi bagian dari jalan raya pintar.

4. Pembahasan

4.1. Desain Sistem Harvesting Energy Piezoelectric



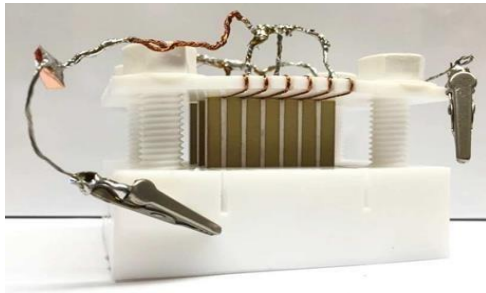
Gambar 3. Skema Prinsip Kerja Transduser Piezoelektrik Pada Konstruksi Jalan

Sumber: Olahan Peneliti

Gambar 3 secara garis besar menjelaskan prinsip kerja transduser piezoelektrik yaitu dengan memanfaatkan energi tekanan dan getaran dari arus lalu lintas kendaraan yang di distribusikan lewat perkerasan jalan energi tersebut dikonversi menjadi energi listrik dengan efek piezoelektrik melalui transduser, kemudian listrik yang dihasilkan disimpan pada alat penyimpanan energi listrik dalam hal ini dapat berupa baterai dengan besar kapasitansi menyesuaikan dengan kebutuhan. Berikut beberapa desain sistem harvesting energy piezoelectric yang sudah dikembangkan di luar negri:

4.2. Layered Bridge Transducer

Jasim et al., (2017) berupaya untuk mengembangkan desain baru transduser piezoelektrik dengan pendekatan geometri dioptimalkan yang ditargetkan untuk pemanenan di jalan di bawah beban kendaraan. Brigde dengan poling berlapis dan desain elektroda senagaimana pada Gambar 3 diusulkan untuk meningkatkan keluaran energi. Simulasi multi-fisika dilakukan untuk mengevaluasi keluaran energi menggunakan PZT yang berbeda dalam hal ini PZT-5X terpilih, besaran beban, jenis transduser, dan parameter geometri.



(a)



(b)

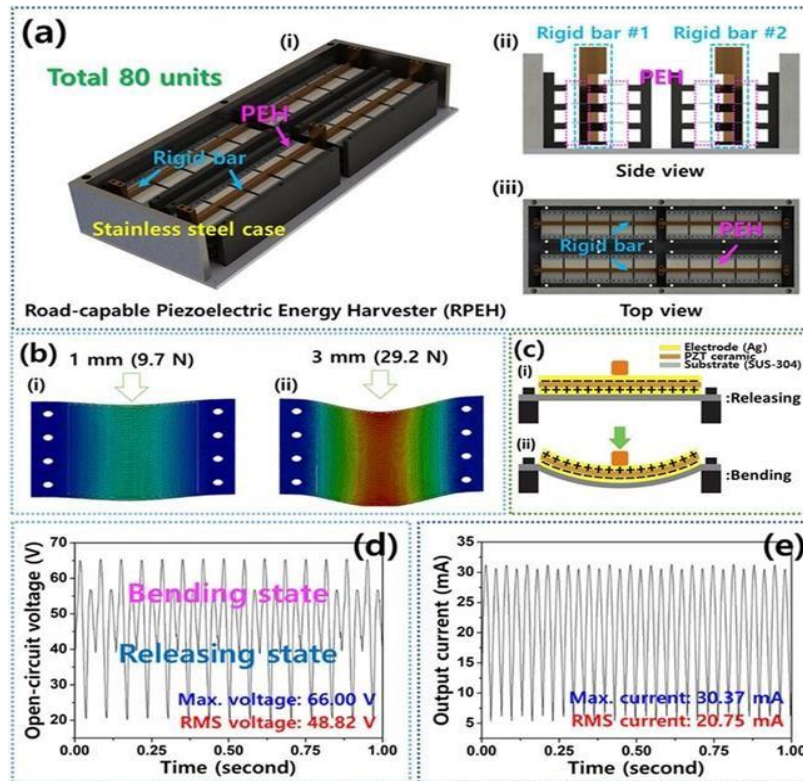
Gambar 3. (a) Illustration of Poling Configuration for PZT Strip (Jasim et al., 2017, p. 20) (b) Energy Harvester with 64 Transducers Assembly (Jasim et al., 017, p. 32)

Sumber: (Jasim et al., 2017)

Hasil FEA, parameter geometris yang dioptimalkan ditemukan, dengan desain tersebut kriteria tegangan kegagalan dioptimalkan, dari transduser jembatan menghasilkan potensial listrik 556V, yang dapat energi potensial 0,743mJ (kondisi rangkaian terbuka) untuk satu transduser di bawah tegangan eksternal 0,7 MPa. Pengujian laboratorium pada modul energy harvester menunjukkan hasil simulasi dengan daya terukur. Daya keluaran maksimum 2,1mW ditemukan pada beban resistif 70kPa pada 5Hz. Daya keluaran lebih besar pada resistif tinggi karena impedansi tinggi dari transduser Jembatan. Penelitian selanjutnya Jasim et al., (2018) menyatakan bahwa kinerja pemanenan energi adalah dipengaruhi oleh bobot kendaraan, kecepatan, dan lokasi pemasangan modul energi.

4.3. Road-capable Piezoelectric Energy Harvester (RPEH)

Hwang et al., (2019) dalam penelitiannya menghasilkan output daya 4,3 Wmax dengan kepadatan daya 43,0 W/ 2 melalui desain jalan perangkat pemanen energi dengan pemanen energi listrik piezo (PEH) dipasang di kedua ujungnya untuk meningkatkan beban yang dapat ditoleransi dan modul yang tahan lama terhadap lingkungan jalan raya yang keras dikembangkan menggunakan pelat aluminium, pelat baja, dan batang polipropilen. Aplikasi sistem pemanen energi piezoelektrik jalan raya (RPEH) dapat dilihat pada Gambar 4.



4.4. Gambar 4. (a) Skema RPEH yang ditunjukkan: (i) tampak diagonal, (ii) tampak samping, dan (iii) tampak atas. (b) Hasil simulasi gaya sumbu z dengan perpindahan vertikal dalam keadaan tertekan. (c) Prinsip pembangkitan RPEH. (d) Tegangan rangkaian terbuka (V) dari RPEH adalah 66 Vmax. (e) Arus keluaran (mA) dari RPEH adalah 30,37 mAmax (Hwang et al., 2019, p. 314) Sumber: (Hwang et al., 2019)



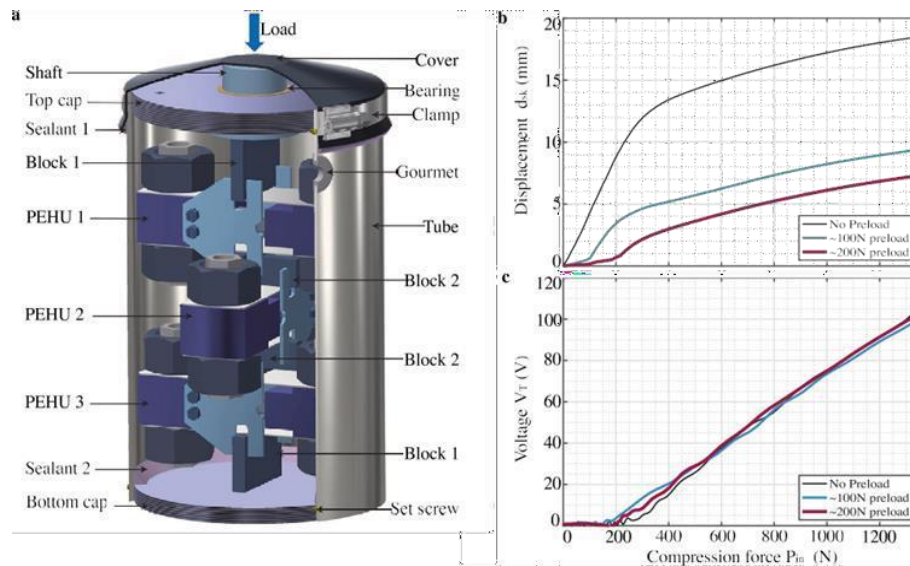
Gambar 5. (a) Foto-foto RPEH yang dipasang pada jalan uji yang sebenarnya. (b) Proses pemasangan RPEH di sepanjang jalan yang sebenarnya: (i) pemilihan posisi, (ii)

pemotongan jalan, (iii) penggalian, (iv) paving poliuretan, (v) tempat perumahan dan (vi) pemasangan.

Sumber: (Hwang et al., 2019)

4.5. Piezoelectric Energy Harvesting Tower

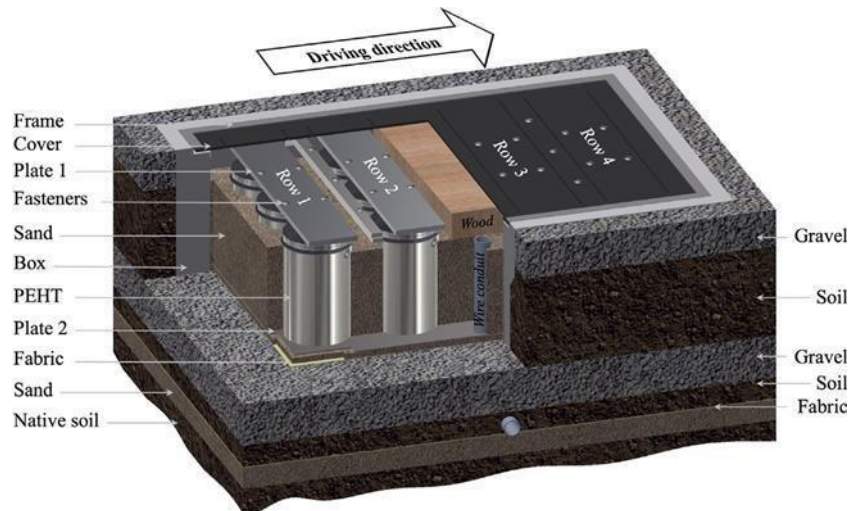
Chen et al., (2021) mendemonstrasikan sistem pemanenan energi piezoelektrik jalan raya yang inovatif, yang mencapai kepadatan energi setinggi 15,37 J/(m.pass.lane), tegangan maksimum diamati 484 V, energy listrik rangkaian terbuka 20,29 J berdasarkan sirkuit terbuka pengukuran tegangan dalam tes jalan dengan kecepatan 40 km/jam. Kepadatan energi yang tinggi dicapai dengan menggabungkan mekanisme amplifikasi gaya kompresi-ke- kompresi serta konfigurasi sistem yang dioptimalkan untuk memanfaatkan sepenuhnya beban dinamis dari kendaraan. Klaimnya sistem prototipe telah mencapai kepadatan energi tertinggi yang dilaporkan dalam literatur. Gambar 7 memperlihatkan model 3D menara pemanen energy piezoelektrik yang digunakan pada penelitian tersebut.



Gambar 6. Unit Menara Pemanen Energi Piezoelektrik

Sumber: (Chen et al., 2021)

Menara pemanen energi piezoelektrik dan kinerja kuasi-statisnya. Pada Gambar 6a, Model 3D menara pemanen energi piezoelektrik. Ada tiga unit pemanen energi piezoelektrik yang ditumpuk di menara. Gambar 6b, Perbandingan kekakuan nonlinier dari prototipe PEHT di bawah pembebanan kompresi kuasi-statis 1333 N ketika tidak ada beban awal dan beban awal vertikal 100 N dan 200 N diterapkan. Prabeban secara substansial mengurangi perpindahan tenggelam total . c, Dalam pengujian yang sama, tegangan rangkaian terbuka yang dihasilkan menara tidak berubah secara signifikan dengan preload. Menara tersebut kemudian di pasang pada kotak beton yang berhubungan langsung dengan konstruksi perkerasan jalan untuk dilakukan pengujian jalan di modelkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Model 3D Kotak Pemanen Energi Piezoelektrik untuk Uji Jalan

Sumber: (Chen et al., 2021)

4.6. Kesimpulan

Pada desain sistem layered bridge transducer Simulasi multi fisika dilakukan untuk mengevaluasi keluaran energy menggunakan PZT yang berbeda, besaran beban, jenis transduser, dan parameter geometri. Hasilnya adalah desain sistem berhasil dianalisis dan mampu memperkirakan batas maksimum pembebanan untuk menghindari potensi kegagalan mekanis dan tetap menjaga efisiensi pemanenan energy. Dengan pemodelan FEA didapat potensial listrik 556V, energi potensial 0,743mJ (kondisi rangkaian terbuka) untuk satu transduser di bawah tegangan eksternal 0,7 MPa. Hasil uji laboratorium menunjukkan, daya keluaran maksimum 2,1mW ditemukan pada beban resistif 70kPa pada 5Hz. Kinerja pemanenan energi adalah dipengaruhi oleh bobot kendaraan, kecepatan, dan lokasi pemasangan modul energi.

Road-capable Piezoelectric Energy Harvester (RPEH) di desain untuk implementasi badan jalan, instalasi langsung di aplikasikan pada elemen perkerasan jalan pada titik yang sudah ditentukan, dengan hasil pengujian tegangan rangkaian terbuka dari RPEH adalah 66 Vmax, output daya 4,3 max dengan kepadatan daya 43,0 W/m². Desain piezoelectric energy harvesting tower menggabungkan mekanisme amplifikasi gaya kompresi ke kompresi serta konfigurasi sistem yang dioptimalkan, hasil dari pengujian lapangan didapat tegangan maksimum diamati adalah 484 V, energy listrik rangkaian terbuka 20,29 J, dan kepadatan energi didapatkan sebesar 15,37 J/(m.pas,lane) berdasarkan sirkuit terbuka pengukuran tegangan dalam tes jalan dengan kecepatan 40 km/jam. Klaim dari sistem ini adalah sistem prototipe telah mencapai kepadatan energi tertinggi yang dilaporkan dalam literatur.

Beberapa tahapan proses pertimbangan parameter seperti pemilihan material dan pemodelan yang digunakan oleh para peneliti dalam menciptakan desain sistem yang mampu menghasilkan energi yang maksimal dapat dijadikan referensi untuk keberlanjutan penelitian sistem transduser piezoelektrik di Indonesia khususnya dalam implementasi konstruksi jalan untuk bisa mendapatkan pemanenan energi yang lebih baik dan terukur.

Daftar Rujukan

- Afif, M. and Rini, N.P. (2018) 'Rancang Bangun Instalasi Lampu Pju Termodifikasi Ldr Berbasis Material Piezoelektrik Pada Polisi Tidur', *Jurnal Fisika FLUX*, 14(2), p. 85. Available at: <https://doi.org/10.20527/flux.v14i2.3930>.
- Anwar, S. et al. (2019) 'Pengukuran Energi Listrik Berbasis PZEM-004T', *Prosiding Seminar Nasional Politeknik Negeri Lhokseumawe*, 3(1), pp. 272-276. Available at: <http://ejournal.pnl.ac.id/index.php/semnasnl/article/view/1694>.
- Aziz, I.N., Fadililah, S.T.U. and Eng, M. (2021) 'Rancang Bangun Alat Pembangkit Listrik dengan Memanfaatkan Hasil Gaya Tekan Kendaraan Bermotor di Pintu Masuk Parkir'. Available at: http://eprints.ums.ac.id/id/eprint/92431%0Ahttp://eprints.ums.ac.id/92431/11/NASKAH_PUBLIKASI.pdf.
- Chen, C. et al. (2021) 'A high density piezoelectric energy harvesting device from highway traffic — System design and road test', *Applied Energy*, 299(January), p. 117331. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117331>.
- Hwang, W. et al. (2019) 'Watts-level road-compatible piezoelectric energy harvester for a self-powered temperature monitoring system on an actual roadway', *Applied Energy*, 243(December 2018), pp. 313-320. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.03.122>.
- Jasim, A. et al. (2017) 'Optimized design of layered bridge transducer for piezoelectric energy harvesting from roadway', *Energy*, 141, pp. 1133- 1145. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.10.005>.
- Jasim, A. et al. (2018) 'Laboratory testing and numerical simulation of piezoelectric energy harvester for roadway applications', *Applied Energy*, 224(May), pp. 438-447. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.05.040>.
- Kalyani, V.L., Pious, A. and Vyas, P. (2015) 'Harvesting Electrical Energy via Vibration Energy and its Applications', *Journal of Management Engineering and Information Technology (JMEIT)*, (2), pp. 2394-8124.
- Kim, S., Shen, J. and Ahad, M. (2015) 'Piezoelectric-Based Energy Harvesting Technology for Roadway Sustainability', *International Journal of Applied Science and Technology*, 5(1), pp. 20-25.
- Pathoni, H. et al. (2021) 'Design speed bump piezoelectric used pressure method (case study Jambi University gate portal)', *Journal of Physics: Conference Series*, 1731(1). Available at: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1731/1/012061>.
- Pratama, L.P., Herdiyansyah, R.A. and Manfaluthy, M. (2022) 'Rancang Bangun Prototipe Pemanen Energi Getaran pada Speed Bump Menggunakan Transducer Piezoelectric', *Medika Teknika : Jurnal Teknik Elektromedik Indonesia*, 3(2), pp. 39-48. Available at: <https://doi.org/10.18196/mt.v3i2.14126>.
- Sidiq, A., Syahrillah, G.R.F. and Isra, M.. (2021) 'Studi Experimental Pemanfaatan Speed Bumper (Polisi Tidur) Menjadi Energi Listrik Menggunakan Piezoelektrik', *Al-Jazari Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, 6(2). Available at: <https://doi.org/10.31602/al-jazari.v6i2.6055>.
- Tianze, L. et al. (2009) 'Analysis of the characteristics of piezoelectric sensor and research of its application', *IEEE International Symposium on Applications of Ferroelectrics*, pp. 1-4. Available at: <https://doi.org/10.1109/ISAF.2009.5307537>.
- Wati, E.K. (2021) 'REKAYASA V I B R A S I Kendali dan Pemanfaatan Vibrasi dengan Piezoelektrik di bidang Rekayasa Instrumentasi & Kontrol'.
- Yulia, E. et al. (2016) 'Polisi Tidur Piezoelektrik Sebagai Pembangkit Listrik dengan Memanfaatkan Energi Mekanik Kendaraan Bermotor', *Jurnal Otomasi Kontrol dan Instrumentasi*, 8(1), p. 105. Available at: <https://doi.org/10.5614/joki.2016.8.1.9>.
- Zhang, W., Ding, G. and Wang, J. (2021) 'Road energy harvesting characteristics of damage-resistant stacked piezoelectric ceramics', *Ferroelectrics*, 570(1), pp. 37-56. Available at: <https://doi.org/10.1080/00150193.2020.1839254>.