

Penerapan Teknologi *Energy Harvesting* untuk Proyek Infrastruktur yang Berkelanjutan

Implementation of Energy Harvesting Technology for Sustainable Infrastructure Projects

Timotius Alfanov^{1*}, Oei Fuk Jin¹

¹Program Studi Magister Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Tarumanagara
Jl. Letjen S. Parman Nomor 1, Jakarta 11440, Indonesia

*Corresponding author: timotius.327241005@stu.untar.ac.id

ABSTRAK

DOI:
[10.30595/jrst.v9i2.25952](https://doi.org/10.30595/jrst.v9i2.25952)

Histori Artikel:

Diajukan:
18/02/2025

Diterima:
29/05/2025

Diterbitkan:
08/09/2025

Konstruksi digital telah menjadi strategi penting dalam mendorong *Sustainable Development Goals* (SDGs) yang ditetapkan oleh Perserikatan Bangsa-Bangsa (PBB), terutama dalam konteks pengembangan infrastruktur. Tujuan dari penelitian ini adalah membahas perkembangan teknologi *Energy Harvesting* (EH) yang sudah diteliti pada infrastruktur sampai saat ini. Dengan memanfaatkan energi yang ada di lingkungan sekitar, teknologi EH menawarkan potensi besar dalam mengurangi emisi karbon yang dihasilkan oleh sistem infrastruktur. Metode *Systematic Literature Review* (SLR) digunakan dalam penelitian ini dengan proses seleksi yang melibatkan pencarian literatur di database Scopus, seleksi berdasarkan abstrak dan konten, serta analisis mendalam terhadap 27 artikel relevan. Penelitian ini membahas lima teknologi EH yang paling umum, yaitu teknologi *Photovoltaic*, *Piezoelectric*, *Thermoelectric*, *Wind Energy Conversion System* (WECS), dan *Wave Energy Converter* (WEC). Setiap teknologi tersebut dievaluasi berdasarkan aplikasinya dalam infrastruktur dengan fokus pada efisiensi dan efektivitas dari penerapan teknologi tersebut. Hasilnya menunjukkan bahwa teknologi *Photovoltaic* dan *Piezoelectric* merupakan opsi yang paling siap untuk implementasi jangka pendek, sedangkan *Thermoelectric* dan WEC menunjukkan potensi jangka panjang yang besar walaupun masih menghadapi tantangan teknis dan ekonomi. Kombinasi antar teknologi juga terbukti meningkatkan efisiensi dibandingkan sistem tunggal. Energi yang dipanen dapat digunakan untuk berbagai kebutuhan infrastruktur, seperti sistem penerangan jalan dan *Structural Health Monitoring* (SHM). Penelitian ini merekomendasikan pemanfaatan teknologi hybrid sebagai solusi yang lebih efisien, disesuaikan dengan karakteristik lokasi dan jenis infrastruktur. Selain itu, dibutuhkan dukungan kebijakan dan insentif untuk mempercepat adopsi teknologi ini. Dengan menerapkan strategi ini, industri konstruksi dapat berkontribusi signifikan dalam mencapai agenda PBB di tahun 2030 untuk pembangunan yang berkelanjutan.

Kata Kunci: Energi Terbarukan; Pemanenan Energi; Infrastruktur Hijau; Konstruksi Berkelanjutan; Sistem Mandiri

ABSTRACT

Digital construction has become an important strategy in promoting the Sustainable Development Goals (SDGs) set by the United Nations, especially in the context of infrastructure development. The purpose of this research is to discuss the development of Energy Harvesting (EH) technologies that have been investigated in infrastructure to date. By utilizing energy in the surrounding environment, EH technology offers great potential in reducing carbon emissions generated by infrastructure systems. This study employs the Systematic Literature Review (SLR) method, involving a structured process of literature search in the Scopus

database, selection based on abstracts and content relevance, and in-depth analysis of 27 qualified articles. This research discusses five of the most common EH technologies, namely photovoltaic, piezoelectric, thermoelectric, Wind Energy Conversion System (WECS), and Wind Energy Converter (WEC) technologies. Each technology was evaluated based on its application in infrastructure with a focus on the efficiency and effectiveness of the application of the technology. The results indicate that Photovoltaic and Piezoelectric technologies are the most ready for short-term implementation, while Thermoelectric and WEC technologies show strong long-term potential despite facing technical and economic challenges. Hybrid combinations of multiple technologies have also been proven to enhance efficiency compared to single systems. The harvested energy can be utilized for various infrastructure needs, such as street lighting and Structural Health Monitoring (SHM) systems. This study recommends the application of hybrid technologies as a more efficient solution, tailored to the characteristics of the location and type of infrastructure. In addition, policy support and incentives are needed to accelerate the adoption of these technologies. By implementing these strategies, the construction industry can significantly contribute to achieving the UN's 2030 agenda for sustainable development.

Keywords: Renewable Energy; Energy Harvesting; Green Infrastructure; Sustainable Construction; Self-Powered Systems

1. PENDAHULUAN

Masalah energi masih menjadi tantangan yang besar bagi banyak negara, terutama ketergantungan pada bahan bakar fosil yang menyebabkan peningkatan emisi gas rumah kaca hampir dua pertiga dari total seluruh peningkatan (Mobarak, Shrahily, Mohammad, & Alzandi, 2022). Dengan populasi dunia yang terus berkembang, kebutuhan akan energi juga semakin meningkat, sementara sumber daya alam yang ada terbatas (Kwasinski & Kwasinski, 2015). Krisis energi ini menuntut adanya solusi untuk mengurangi ketergantungan pada sumber energi konvensional (Rahman dkk., 2021). Dalam konteks ini, tujuan pembangunan berkelanjutan (*Sustainable Development Goals/SDG's*) yang dicanangkan oleh Perserikatan Bangsa-Bangsa (PBB), terutama pada poin SDG 7, 11, dan 13 menjadi panduan penting dalam penerapan energi terbarukan untuk menanggapi dampak negatif dari perubahan iklim yang terjadi. Salah satu pendekatan yang mulai menarik perhatian adalah penerapan teknologi *energy harvesting*, khususnya pada sektor konstruksi dalam mendukung proyek infrastruktur yang berkelanjutan.

Energy harvesting (atau bisa disebut pemanenan energi) merupakan sebuah proses perubahan energi terbarukan yang ada di lingkungan sekitar menjadi energi listrik yang dapat digunakan. Konsep *energy harvesting* ini memiliki potensi yang sangat besar untuk diterapkan pada proyek infrastruktur yang ada karena selalu ada energi terbarukan yang dapat dimanfaatkan dari bangunan-bangunan infrastruktur, seperti getaran kendaraan di jalan raya (Gholikhani, Nasouri, dkk., 2019), panas dari cahaya matahari di bangunan gedung (Salama &

Al-Turjman, 2023), energi gelombang air pada pelabuhan (Zanuttigh dkk., 2015), dan lain sebagainya. Inilah yang menunjukkan bagaimana proyek infrastruktur dapat mengintegrasikan teknologi canggih untuk mencapai keberlanjutan jangka panjang.

Namun, penerapan teknologi *energy harvesting* pada proyek infrastruktur masih menghadapi berbagai tantangan, salah satu yang utama adalah efisiensinya. Sebagai contoh, konversi energi listrik dari energi panas terkadang menghasilkan daya yang relatif kecil dibandingkan kebutuhan yang ada dan kurangnya metode penyimpanan yang tepat. Tantangan lainnya adalah berkaitan dengan integrasi dan skalabilitas, serta durabilitasnya. Selain integrasi teknologi *energy harvesting* pada proyek infrastruktur berkelanjutan yang akan dibangun, integrasi teknologi *energy harvesting* pada proyek infrastruktur yang sudah ada juga menemui beberapa tantangan, salah satunya adalah memerlukan perubahan yang besar, baik dalam hal desain maupun biaya dalam mengimplementasikannya. Oleh karena itu, untuk mencapai keberhasilan penerapan teknologi ini, diperlukan inovasi yang terus berkembang supaya inovasi yang sudah ada saat ini dapat diadaptasi pada berbagai bangunan infrastruktur yang ada dan yang akan datang.

Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi dan menganalisis penerapan teknologi *energy harvesting* pada proyek infrastruktur berkelanjutan melalui tinjauan literatur sistematis. Penelitian ini akan berfokus pada 5 teknologi EH yang paling umum, yaitu teknologi *Photovoltaic*, *Piezoelectric*, *Thermoelectric*, *Wind Energy Conversion System (WECS)*, dan *Wave Energy Converter (WEC)*.

Artikel-artikel yang terpilih tersebut mencakup penelitian yang membahas teknologi energy harvesting yang berkaitan langsung dengan proyek infrastruktur yang berkelanjutan dan menjadi dasar untuk analisis lebih lanjut yang dibahas pada bab selanjutnya. Dalam penelitian ini, juga dilakukan visualisasi subyek menggunakan perangkat lunak *VOSviewer* untuk memudahkan pembuatan hasil dan pembahasan dengan mengkategorikan hubungan antar subyek yang sering muncul dari 27 artikel tersebut seperti yang bisa terlihat pada **Gambar 1**.

Gambar 1 terdiri dari beberapa *cluster* berwarna yang merepresentasikan kelompok istilah yang sering muncul dalam penelitian. Dari pemetaan ini, terlihat bahwa penelitian banyak membahas sistem energy harvesting (*cluster* merah), integrasinya dengan sumber energi terbarukan (*cluster* hijau), dampaknya pada efisiensi infrastruktur (*cluster* biru), serta berbagai teknologi yang digunakan (*cluster* kuning).

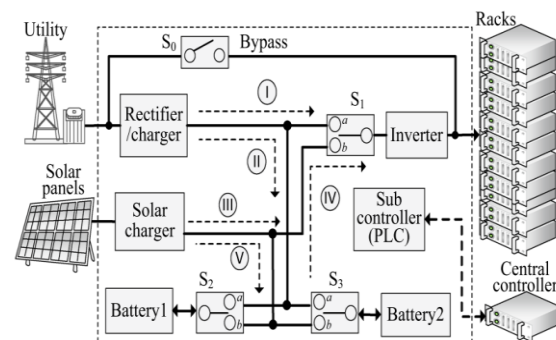
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Teknologi Photovoltaic

Teknologi *photovoltaic* (PV) telah menjadi salah satu inovasi utama dalam memanfaatkan energi terbarukan, terutama dalam proyek infrastruktur. Dengan kemampuan mengubah energi dari matahari menjadi energi listrik, teknologi *photovoltaic* menawarkan solusi dalam mengurangi ketergantungan pada energi yang terbatas, seperti fosil, sekaligus mendukung target-target global dalam tujuan pembangunan yang berkelanjutan (Venugopal dkk., 2018).

Memahami potensi dasar teknologi *photovoltaic* memberikan landasan untuk mengeksplorasi strategi yang dapat digunakan untuk mengoptimalkan pemanenan energi, mengingat energi terbarukan ini bersifat intermiten (tidak stabil/tidak selalu ada). Salah satu cara dalam mengatasi hal tersebut adalah dengan menggunakan baterai sebagai cadangan energi, seperti pada **Gambar 2**. Namun, selain dengan adanya baterai, diperlukan juga manajemen energi yang tepat supaya baterai tersebut dapat terisi penuh oleh tenaga surya selama siang hari dan sangat jarang berada pada kondisi habis, terutama pada malam hari. Salah satu cara manajemen energi yang tepat supaya baterai dapat digunakan secara efektif adalah dengan menerapkan beberapa mode pada sistem pemanenan dan penyimpanan energi tersebut. Mode-mode tersebut harus mengakomodir beberapa kondisi. Sebagai contoh, saat kondisi cuaca sedang mendung atau berawan, sistem

harus diatur supaya energi yang digunakan adalah energi listrik konvensional dan energi surya yang sedikit tersebut bisa dimanfaatkan sepenuhnya untuk mengisi baterai. Bahkan, energi listrik konvensional tersebut bisa diatur untuk membantu mengisi baterai sebagai cadangan energi. Sementara itu, apabila kondisi cuaca sangat cerah, sistem bisa diatur untuk menggunakan energi listrik dari konversi tenaga surya sepenuhnya. Jadi, optimalisasi energi sangatlah penting supaya sistem pemanenan dan penyimpanan energi *photovoltaic* dapat berfungsi secara efektif (Liu dkk., 2016).



Gambar 2. Skema Kelistrikan Teknologi Photovoltaic dengan Baterai (Liu dkk., 2016)

Dengan optimalisasi energi yang baik, penerapan teknologi *photovoltaic* ini dapat secara signifikan mengurangi konsumsi energi dan biaya operasional. Di banyak fasilitas industri, seperti ruang pendingin makanan, penggunaan panel surya untuk menghasilkan listrik telah terbukti efisien, walau hanya dalam simulasi laboratorium. Pada hari-hari dengan sinar matahari penuh, 83,5% kebutuhan energi listrik untuk pendingin dapat dipenuhi oleh sistem *Photovoltaic*. Manfaat lain yang didapat dengan menggunakan teknologi ini adalah kinerja kompresor yang menjadi tidak terlalu berat sehingga dapat membuat kompresor tersebut lebih tahan lama. Selain itu, penerapan *photovoltaic* di sektor industri menunjukkan bahwa integrasi teknologi ini dapat memberikan manfaat ekonomi yang signifikan, dengan menurunkan biaya operasional sampai 50%, yang selanjutnya dapat berkontribusi pada upaya keberlanjutan dalam berbagai sektor (Rosiek, Romero-Cano, Puertas, & Batlles, 2019).

Dalam sektor infrastruktur jalan, belakangan ini mulai diaplikasikan suatu sistem yang bisa digunakan untuk melakukan pemantauan yang terintegrasi dengan semua komponen yang ada pada suatu daerah atau kota. Konsep ini direpresentasikan oleh *Internet of Things* (IoT) *monitoring systems*. Dalam menjamin unsur efisiensi, keberlanjutan, dan

konektivitas, sistem tersebut bisa dikombinasikan dengan teknologi *energy harvesting* sebagai pengganti energi listrik yang selama ini berasal dari energi tidak terbarukan. Salah satu energi terbarukan yang selalu ada pada jalan raya adalah energi cahaya dari matahari. Ternyata, dengan konfigurasi yang tepat, sistem PVSS (*Photovoltaic Standalone System*) dapat memenuhi kebutuhan energi dari sensor yang digunakan dalam pemantauan energi. Sementara itu, untuk efisiensi sistem PVSS tersebut, dapat dioptimalkan dengan memilih sensor *monitoring* yang tepat dan pengaturan pengambilan sampel dan waktu siklus yang baik (Fedele, Merenda, Praticò, Carotenuto, & Della Corte, 2018).

Di sisi lain, teknologi *photovoltaic* juga dapat diaplikasikan dalam sistem penerangan jalan. Ini dibuktikan langsung di beberapa negara di dunia, diantaranya adalah negara Australia, negara Yordania, dan negara Indonesia, seperti yang bisa terlihat pada **Gambar 3**.



Gambar 3. Aplikasi Teknologi Photovoltaic dalam Sistem Penerangan Jalan di Kota Cumbia, Australia (Orejon-Sanchez, Andres-Diaz, & Gago-Calderon, 2021)

Penerapan teknologi tersebut terbukti menghasilkan penghematan biaya material sebesar 43% dibandingkan dengan opsi jaringan listrik biasa. Kemudian, tidak hanya hemat material, penerapan teknologi *photovoltaic* pada sistem penerangan jalan tersebut juga menunjukkan kelayakan teknis dan sosial untuk penerapan skala urban. Dari 453 responden yang terlibat dan ditanyakan berkaitan dengan penerapan teknologi *photovoltaic* tersebut, lebih dari 88% setuju bahwa *photovoltaic* merupakan solusi yang berkelanjutan, walaupun ada sedikit dari mereka yang masih mengkhawatirkan kemungkinan terjadinya pemadaman lampu

akibat kurangnya energi (Orejon-Sanchez dkk., 2021).

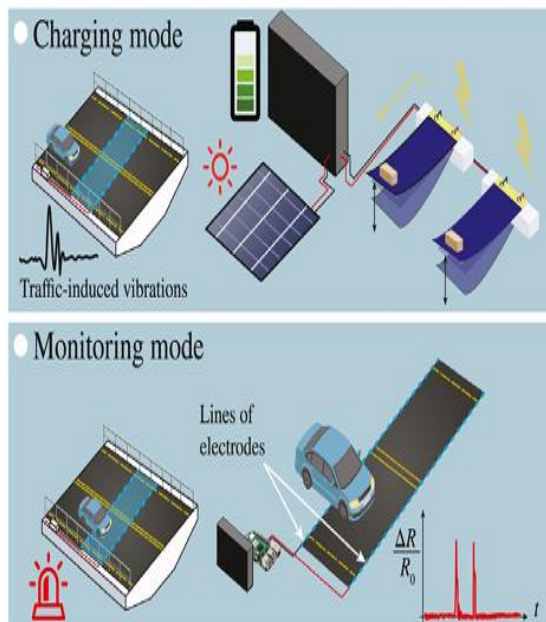
Pendekatan serupa juga diterapkan pada permukaan jalan parkir berpanel *photovoltaic*, yang tidak hanya berfungsi sebagai sumber energi, tetapi juga membantu mengurangi suhu lingkungan di sekitar area parkir. Ini sudah dibuktikan langsung di San Pietro Vincula Square, Roma. Jadi, area parkir tersebut dimodelkan pada sebuah perangkat lunak ENVI-Met dengan data aktual yang diperoleh dari observasi langsung di lapangan. Hasilnya diperoleh bahwa lapangan parkir yang permukaannya dimodifikasi dengan panel *photovoltaic* dapat mengurangi suhu walaupun bisa dikatakan tidak terlalu jauh, yaitu sebesar 4 derajat Celcius untuk suhu rata-rata permukaan (*Mean Radiant Temperature*) (Serrone, Peluso, & Moretti, 2023).

Secara keseluruhan, teknologi *photovoltaic* memiliki potensi besar untuk meningkatkan efisiensi energi dan mendukung pembangunan infrastruktur yang lebih berkelanjutan. Berbagai aplikasi mulai dari pemantauan kesehatan infrastruktur, penerangan jalan, hingga *pavement* jalan berbasis *photovoltaic*, telah menunjukkan manfaat yang cukup berarti, baik dari segi teknis maupun lingkungan. Namun, di balik keunggulan ini, masih ada tantangan yang perlu diatasi, terutama terkait dengan biaya investasi dari material *photovoltaic* yang relatif tinggi. Hal ini dapat menghambat adopsi teknologi tersebut. Alasan inilah yang menyebabkan beberapa negara lebih memilih mengembangkan charging station untuk mobil listrik daripada membuat penerapan teknologi *photovoltaic* karena nilai *Break-Even Point* (BEP) dari pembuatan *charging station* lebih cepat dibandingkan dengan teknologi *Photovoltaic* (Serrone dkk., 2023). Oleh karena itu, diperlukan solusi untuk menekan biaya rantai pasokan agar penerapan *photovoltaic* dapat lebih mudah diakses dan diimplementasikan secara global, mendukung transisi menuju infrastruktur yang lebih hijau dan berkelanjutan.

3.2. Teknologi Piezoelectric

Teknologi *Piezoelectric* adalah teknologi yang bekerja dengan mengonversi energi mekanis dari getaran yang dihasilkan oleh infrastruktur, seperti jembatan, jalan raya, dan bangunan menjadi energi listrik (Harne, Zhang, Li, & Wang, 2016). Salah satu aplikasi yang diteliti adalah sistem *self-powered weigh-in-motion* pada jalan tol yang menggunakan kombinasi antara sensor berat dan teknologi

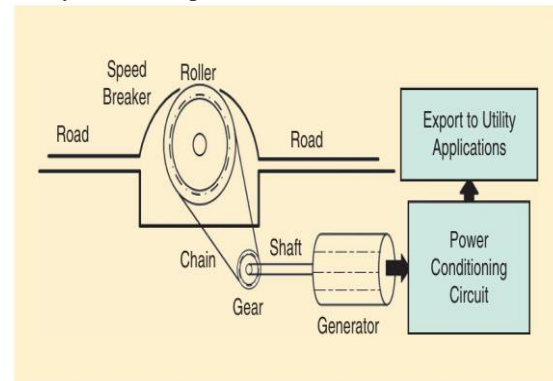
pemanenan energi dari getaran yang bisa terlihat pada **Gambar 4**. Penelitian mengenai prototipe laboratorium dan analisis *finite element* sistem ini telah menunjukkan bahwa teknologi ini dapat secara efektif mendukung sistem infrastruktur mandiri yang mengurangi ketergantungan pada energi eksternal. Jadi, saat kendaraan melintas, bersamaan *smart pavement* melakukan *monitoring* (penimbangan berat), sensor gerakan yang ada akan membantu men-charge baterai melalui perubahan energi mekanik menjadi energi listrik (Birgin, García-Macías, D’Alessandro, & Ubertino, 2023).



Gambar 4. Smart Pavement Dengan Sistem Self-Powered Weigh-In-Motion (Birgin dkk., 2023)

Metodenya adalah gerakan vertikal yang dihasilkan kendaraan dikonversi menjadi gerakan rotasi poros yang dapat dilihat pada **Gambar 5**. Banyak mekanisme rotasi poros yang dapat dipilih, seperti mekanisme *roller*, *rack-and-pinion*, *crank-shaft*, piston dan pedal sepeda. Metode lain yang juga dapat digunakan adalah dengan teknologi semikonduktor, dimana energi listrik bisa dihasilkan hanya dari tekanan, tanpa perlu ada bagian mekanis yang bergerak. Hasil penelitian menunjukkan bahwa prototipe berhasil menghasilkan daya yang cukup untuk aplikasi umum pada jalan raya, seperti penerangan jalan dan sinyal lalu lintas. Efisiensi energi yang dihasilkan lebih bergantung pada kecepatan kendaraan yang berhubungan dengan lamanya gerakan vertikal yang terjadi. Jadi, teknologi *piezoelectric* terbukti sebagai sumber energi yang ramah lingkungan, kecil, dan tidak tergantung pada kondisi iklim (Gholikhani,

Tahami, Khalili, & Dessouky, 2019; Thobias, Padayattil, & Gopakumar, 2018).



Gambar 5. Mekanisme Gerakan Rotasi Poros Dari Gerakan Vertikal Kendaraan (Thobias dkk., 2018)

Dengan pendekatan yang serupa, penerapan teknologi *piezoelectric* pada jembatan menunjukkan potensi yang tidak kalah besar dalam mendukung energi terbarukan. Pada infrastruktur jembatan, penggunaan *vibration energy harvesting* telah diuji melalui perbandingan antara satu perangkat dengan kapasitas yang besar dan beberapa perangkat dengan kapasitas yang kecil yang ditempatkan sepanjang jembatan. Studi kasus ini dilakukan pada jembatan *cable-stayed Bill Emerson Memorial* yang terbentang di atas Sungai Mississippi. Hasil pendekatan komputasional menunjukkan bahwa model yang optimal dalam memberikan hasil yang terbaik adalah dengan metode menaruh banyak perangkat berkapasitas kecil di sepanjang jembatan. Selain itu, berkaitan dengan efisiensinya, jembatan dengan massa yang lebih besar memungkinkan penangkapan energi getaran yang lebih efektif. Oleh karena itu, dalam penerapannya pada kasus ini, dapat dibuat taman-taman hijau di pinggir jembatan untuk menjadi tambahan massa supaya perangkat *energy harvester* dapat menghasilkan energi listrik yang lebih banyak, sebanding dengan energi getaran yang ditangkap (Fernandez & Wojtkiewicz, 2022).

Selain jembatan, bangunan tinggi seperti hotel, dan sebagainya juga menawarkan peluang yang besar untuk teknologi ini. Jika di jembatan sebelumnya, energi mekanis yang dimanfaatkan adalah getaran dari kendaraan yang melintas, pada bangunan gedung, energi mekanis yang dapat dimanfaatkan adalah getaran dari angin yang terjadi. Dalam sebuah studi eksperimental, diuji dua model dengan bentuk yang berbeda untuk diteliti model manakah yang menghasilkan energi yang lebih besar yang

tujuannya digunakan untuk sistem *monitoring* kesehatan struktural bangunan. Hasil eksperimen ini memperlihatkan bahwa potensi yang ada berbanding lurus terhadap fleksibilitas dari model tersebut. Jadi, model dengan fleksibilitas lebih besar akan menghasilkan getaran yang lebih besar juga sehingga energi listrik yang dihasilkan juga menjadi lebih besar (Kaur, Mahesh, & Singamsetty, 2019).

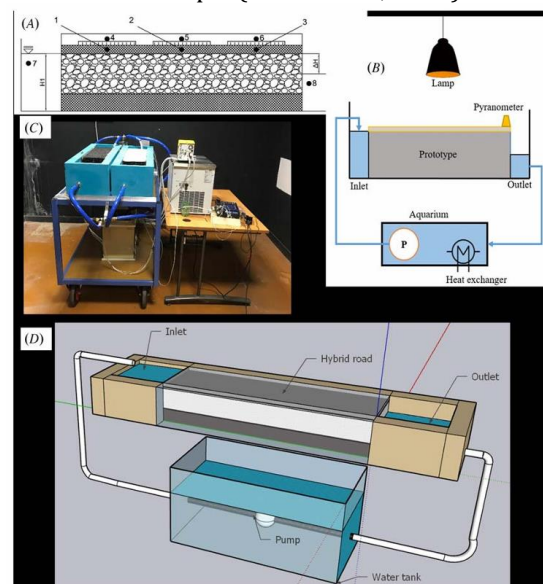
Selain getaran dari beban angin, sumber energi getaran lain yang dapat dimanfaatkan dari bangunan gedung modern adalah dari sistem HVAC (*Heating, Ventilation, and Air Conditioning*). Aliran udara dalam sistem HVAC menciptakan energi yang dapat dimanfaatkan melalui perangkat *piezoelectric* untuk mendukung sensor-sensor monitoring di dalam bangunan. Dengan menggunakan simulasi model *Finite Element* (FE) dan pengujian prototipe di laboratorium, teknologi ini terbukti mampu menyediakan listrik yang cukup untuk berbagai perangkat sensor, tanpa mengganggu kinerja sistem HVAC itu sendiri. Teknologi ini tidak hanya mengurangi konsumsi energi di gedung, tetapi juga membuka jalan bagi pengembangan sensor mandiri yang lebih efisien (Gkoumas & Bontempi, 2019).

3.3. Teknologi *Thermoelectric*

Sistem *thermoelectric* merupakan teknologi yang dapat mengubah energi panas menjadi energi listrik dengan memanfaatkan perbedaan suhu. Umumnya, teknologi ini sering digunakan pada infrastruktur jalan. Sistem *thermoelectric* ini memiliki keunggulan dibandingkan dengan teknologi *energy harvesting* lainnya, diantaranya adalah biaya perawatan yang rendah karena tidak ada komponen yang bekerja dengan mekanisme gerak dan dapat dipasang di luar jalur lalu lintas sehingga tidak memiliki dampak terhadap perkerasan di jalur lalu lintas tersebut (berkaitan dengan overlay, dsb.). Untuk perkerasan aspal, temperatur pada permukaan jalan diperkirakan bisa meningkat hingga mencapai 60 sampai 70 derajat celsius pada musim panas. Dengan memanfaatkan energi panas yang biasanya terbuang, teknologi ini memiliki potensi yang sangat besar untuk membantu mengurangi dampak lingkungan yang terjadi (Tahami dkk., 2021).

Sebagai bagian dari upaya memaksimalkan potensi tersebut, sejumlah penelitian telah dilakukan untuk menemukan desain yang paling efisien dalam memanen energi panas dari jalan raya. Salah satunya adalah dengan melakukan pengujian

laboratorium pada prototipe perkerasan jalan yang sudah dimodifikasi (*hybrid road*) dengan menggunakan lampu halogen sebagai pengganti matahari. Jadi, perkerasan jalan tersebut dibuat berongga dengan tujuan untuk mengalirkan air seperti yang terlihat pada **Gambar 6**. Perbedaan suhu yang diambil untuk mendapatkan energi listrik adalah perbedaan antara suhu air di bagian *inlet* dan suhu air di bagian *outlet*. Hasilnya didapati bahwa prototipe tersebut berhasil menghasilkan energi rata-rata sebesar 55,2 Watt selama 6 jam pengujian. Selain itu, ditemui juga bahwa dengan adanya air yang mengalir pada perkerasan berongga tersebut, suhunya berkurang 60% dibandingkan dengan perkerasan yang tidak dialiri air. Hal ini merupakan salah satu poin positif yang didapatkan karena hal itu dapat memperpanjang umur rencana aspal (Vizzari dkk., 2022).



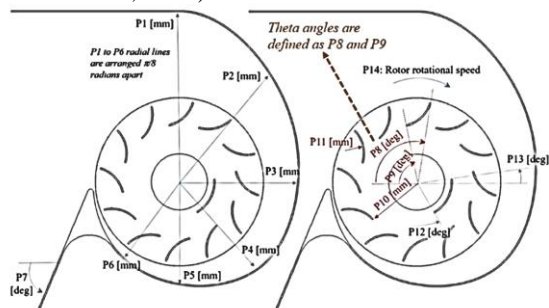
Gambar 6. Pengujian Laboratorium *Hybrid Road* (Vizzari dkk., 2022)

Untuk memastikan sistem *thermoelectric* dapat bekerja dengan optimal, terdapat beberapa hal yang harus diperhatikan dalam mendesain sistem ini, salah satunya adalah berkaitan dengan distribusi suhu yang terjadi pada sistem tersebut. Analisis tersebut bisa dilakukan menggunakan *software finite element*. Hasil yang diperoleh tersebut nantinya bisa digunakan sebagai dasar untuk penentuan letak-letak sensor supaya perbedaan suhu yang terukur bisa menghasilkan nilai maksimal dan menghasilkan energi yang paling besar (Tahami dkk., 2021). Hal lain yang harus diperhatikan adalah berkaitan dengan jumlah *Thermo-Electric Generator* (TEG) yang dipasang pada suatu segmen jalan karena satu TEG akan

menghasilkan daya yang lebih besar secara individu dibandingkan dengan satu TEG pada suatu sistem dengan banyak TEG. Oleh karena itu, penentuan jumlah TEG perlu diperhatikan supaya banyaknya biaya yang nantinya dikeluarkan bisa seimbang dengan peningkatan energi yang dihasilkan karena biaya awal pemasangan ini bisa dikatakan cukup tinggi. Namun, dalam jangka panjang, teknologi ini dapat meningkatkan keberlanjutan jalan raya sekaligus mengurangi biaya operasional terkait pemeliharaan infrastruktur. Selain itu, penggunaan teknologi ini memungkinkan jalan raya menjadi sumber energi yang dapat digunakan untuk keperluan bagi jalan raya itu sendiri, seperti sistem pencahayaan, sistem pemantauan kesehatan, dan lain sebagainya (Tahami, Gholikhani, & Dessouky, 2020).

3.4. Teknologi Wind Energy Conversion System (WECS)

Sesuai dengan namanya, teknologi *wind energy conversion system* (WECS) merupakan teknologi yang dapat mengubah energi angin menjadi energi listrik. Pada dasarnya, teknologi ini menggunakan turbin yang dapat berputar ketika ada angin. Untuk memastikan bahwa turbin angin dalam sistem bekerja secara optimal, bisa dilakukan sebuah teknik yang dinamakan *Computational Fluid Dynamics* (CFD) dalam mendesain turbin. Jadi, CFD merupakan simulasi menggunakan program komputer untuk membantu melihat aliran udara yang terjadi dan menentukan desain yang terbaik untuk turbin angin melalui penentuan parameter-parameter yang dapat dilihat pada Gambar 7. Selain memilih desain turbin yang terbaik, dapat dipasang juga alat bernama *boost converter* yang dapat meningkatkan tegangan keluaran yang dihasilkan dari teknologi WECS (Acarer, Uyulan, & Karadeniz, 2020).



Gambar 7. Parameter dari Desain Turbin Angin (Acarer dkk., 2020)

Dalam beberapa tahun terakhir, penelitian mengenai penerapan WECS lebih sering membahas kombinasinya dengan

teknologi *energy harvesting* lainnya, salah satunya adalah dengan teknologi *photovoltaic* seperti yang terlihat pada Gambar 8. Sistem ini memaksimalkan pemanenan energi dengan memanfaatkan dua sumber energi yang berbeda, tetapi saling melengkapi, di mana *Photovoltaic* lebih optimal pada siang hari dan WECS bekerja baik saat kecepatan angin memadai. Hasil pengujian eksperimen yang dilakukan membuktikan bahwa dengan kombinasi tersebut, nilai output yang dihasilkan menjadi lebih besar 10% dibandingkan hanya memanen energi angin saja (Mustafa dkk., 2021).



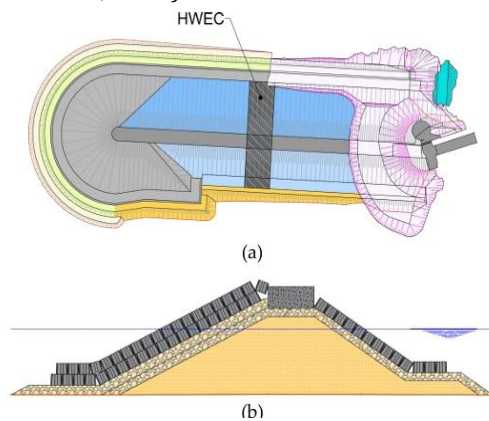
Gambar 8. Model Eksperimen Hybrid antara Teknologi WECS dan Photovoltaic (Mustafa dkk., 2021)

3.5. Teknologi Wave Energy Converter (WEC)

Gelombang laut menyimpan energi yang sangat besar, yang sampai saat ini masih jarang diteliti dibandingkan dengan energi terbarukan lainnya, seperti tenaga surya atau angin. Salah satu teknologi yang sedang berkembang adalah *Wave Energy Converter* (WEC) yang memanfaatkan energi gelombang laut untuk menghasilkan listrik. Teknologi ini tidak hanya relevan di wilayah pesisir, tetapi juga di pelabuhan atau infrastruktur lainnya yang berhubungan langsung dengan gelombang laut. Memang sejauh ini, harga konstruksi dari WEC bisa dikatakan tinggi (Clemente, Calheiros-Cabral, Rosa-Santos, & Taveira-Pinto, 2021). Namun, apabila struktur ini bisa diintegrasikan dengan struktur lain, seperti dengan struktur pemecah gelombang, ini tentunya bisa menjadi poin yang menarik dalam pengembangan teknologi ini.

Salah satu studi kasus telah dilakukan pada Pelabuhan Leixoes yang terletak di Pantai Utara Portugal. Teknologi WEC direncanakan untuk dibuat dan diintegrasikan dengan struktur pemecah gelombang sehingga disebut *hybrid-WEC* yang dapat dilihat pada Gambar 9. Rata-rata listrik yang dapat dipanen yang dihitung menggunakan model SWAN (sebuah *software*

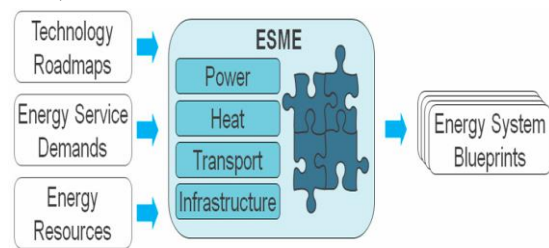
yang dapat mensimulasikan gelombang laut) adalah sebesar 16,9kW/m. Struktur pemecah gelombang tersebut menggunakan sistem yang disebut *Oscillating Water Column* (OWC), dimana prinsip kerjanya adalah dengan memanfaatkan tinggi rendahnya gelombang laut dalam waktu tertentu untuk menciptakan tekanan udara pada chamber yang akan menggerakkan turbin dan dikonversi menjadi energi listrik oleh generator. Setelah dilakukan penelitian dengan simulasi pada model numerik, didapatkan hasil bahwa h-WEC menunjukkan efisiensi konversi yang baik. Dengan pembangunan struktur sepanjang 240 meter, kebutuhan listrik yang dapat dipenuhi adalah sebesar 50%. Selain itu, sesuai dengan prinsip awal dimana h-WEC juga berfungsi sebagai pemecah gelombang laut, ditemukan juga bahwa h-WEC berhasil mengurangi aliran air yang meluap (*overtopping discharge*). Inilah salah satu cara dalam membuat teknologi WEC menjadi layak untuk diinvestasikan (Calheiros-Cabral dkk., 2022).



Gambar 9. Ekstensi Pemecah Gelombang di Pelabuhan Leixoes (A) Denah dan (B) Potongan Melintang (Calheiros-Cabral dkk., 2022)

Penelitian lain meneliti bagaimana nilai *Levelized Cost of Energy* (LCOE) dari teknologi WEC tersebut. LCOE adalah metrik standar untuk membandingkan kelayakan ekonomi berbagai teknologi pembangkit energi. Ini menghitung biaya keseluruhan untuk membangun, mengoperasikan, dan memelihara pembangkit

listrik selama masa hidupnya, yang kemudian dibagi dengan total energi yang dihasilkan selama masa itu. Nilai LCOE dihitung dengan pemodelan *Energy Technologies Institute's* (ETI's) *Energy Systems Modelling Environment* (ESME) dengan beberapa parameter yang diperlukan seperti pada **Error! Reference source not found.** Hasil yang didapat dari analisis ini adalah nilai LCOE teknologi WEC saat ini memang masih cukup tinggi, berkisar antara 10 sampai 38 p/kWh. Ini diharapkan bisa turun dengan adanya inovasi pada teknologi ini sampai di angka 4,5 p/kWh. Dengan seperti itu, barulah teknologi WEC ini dapat bersaing dengan teknologi *energy harvesting* yang lain. Jadi, meskipun teknologi WEC menawarkan berbagai manfaat, masih terdapat tantangan yang harus dihadapi. Salah satu tantangan utama adalah tingginya biaya material, terutama untuk ekspor komponen WEC ke negara-negara berkembang (Stegman, Adrian, Jeffrey, Johanning, & Bradley, 2017).



Gambar 10. Diagram Pemodelan ESME (Stegman dkk., 2017)

3.6. Perbandingan Implementasi Teknologi Energy Harvesting

Untuk memberikan gambaran yang lebih jelas mengenai kekuatan dan keterbatasan dari masing-masing teknologi *energy harvesting* yang telah dibahas pada subbab sebelumnya, pada bagian ini disajikan perbandingan secara ringkas dalam bentuk tabel. Perbandingan tersebut mencakup aspek kelebihan dan kekurangan utama dari setiap teknologi berdasarkan hasil temuan studi literatur, sebagaimana ditampilkan pada **Tabel 1** berikut.

Tabel 1. Perbandingan Teknologi Energy Harvesting

Teknologi	Kelebihan	Kekurangan
Photovoltaic	Energi melimpah di siang hari; Cocok untuk sistem monitoring & penerangan	Ketergantungan pada cuaca; Biaya awal instalasi relatif tinggi
Piezoelectric	Ukuran kecil; Tidak bergantung cuaca; Cocok untuk area lalu lintas tinggi	Energi terbatas; Efisiensi bergantung pada frekuensi getaran
Thermoelectric	Tidak memiliki bagian bergerak, dapat ditempatkan di luar jalur lalu lintas	Efisiensi rendah, butuh perbedaan suhu yang signifikan

Teknologi	Kelebihan	Kekurangan
WECS	Efektif di daerah yang memiliki lapangan yang terbuka	Skala besar, tidak cocok dan kurang efektif di area padat atau tertutup
WEC	Potensi besar di wilayah pesisir, dapat digabung dengan pemecah gelombang	Biaya konstruksi tinggi; Teknologi belum matang dan masih jarang diterapkan

Dari kelima teknologi yang dikaji, *photovoltaic* dan *piezoelectric* menjadi opsi yang paling realistis untuk implementasi jangka pendek karena telah banyak diuji di kondisi nyata. Sementara itu, teknologi seperti WEC dan *thermoelectric* menunjukkan potensi yang besar tetapi masih membutuhkan pengembangan dari sisi teknis maupun ekonomis. Kombinasi antar teknologi, seperti PV-WECS, juga terbukti meningkatkan efisiensi hingga 10% dibanding sistem tunggal, menjadikannya arah masa depan bagi pengembangan sistem infrastruktur mandiri dan berkelanjutan.

4. SIMPULAN

Teknologi *energy harvesting* adalah solusi konkret untuk pembangunan berkelanjutan dengan memanfaatkan energi terbarukan sebagai sumber listrik. Melalui kajian sistematis menggunakan metodologi SLR, penelitian ini menganalisis berbagai teknologi *energy harvesting*, yaitu *Photovoltaic*, *Piezoelectric*, *Thermoelectric*, *Wind Energy Conversion System* (WECS), dan *Wave Energy Converter* (WEC). Hasilnya menunjukkan bahwa teknologi-teknologi ini telah menunjukkan potensi yang menjanjikan, terutama dalam penerapannya di proyek infrastruktur, seperti penerangan jalan dan sistem *Structural Health Monitoring* (SHM). Selain itu, penelitian ini menemukan bahwa *photovoltaic* dan *piezoelectric* merupakan teknologi yang paling siap untuk implementasi jangka pendek, karena telah banyak diuji dalam kondisi nyata. Di sisi lain, *thermoelectric* dan WEC memiliki potensi jangka panjang namun masih menghadapi kendala teknis dan ekonomi. Penelitian mengenai sistem hybrid dari berbagai teknologi *energy harvesting* juga sedang berkembang dan terbukti dapat meningkatkan efisiensi sistem hingga 10% dibandingkan penerapan sistem tunggal.

Namun, implementasi di lapangan masih memerlukan penelitian lebih lanjut karena hasil pengujian di laboratorium tidak selalu sesuai dengan kondisi nyata. Selain itu, analisis ekonomi yang mendalam juga diperlukan, mengingat beberapa teknologi masih terkendala oleh biaya tinggi. Kesiapan infrastruktur dan dukungan kebijakan pemerintah menjadi faktor penting dalam memperluas adopsi teknologi ini.

Oleh karena itu, studi lebih lanjut mengenai uji lapangan serta dukungan regulasi dan insentif diperlukan untuk mempercepat penerapan *energy harvesting* secara luas.

REFERENSI

- Acarer, S., Uyulan, Ç., & Karadeniz, Z. H. (2020). Optimization of Radial Inflow Wind Turbines for Urban Wind Energy Harvesting. *Energy*, 202, 117772. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117772>.
- Birgin, H. B., García-Macías, E., D'Alessandro, A., & Ubertini, F. (2023). Self-Powered Weigh-In-Motion System Combining Vibration Energy Harvesting and Self-Sensing Composite Pavements. *Construction and Building Materials*, 369, 130538. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130538>.
- Calheiros-Cabral, T., Majidi, A. G., Ramos, V., Giannini, G., Rosa-Santos, P., & Taveira-Pinto, F. (2022). Development and Assessment of a Hybrid Breakwater-Integrated Wave Energy Converter. *International Marine Energy Journal*, 5(3), 281–291. <https://doi.org/10.36688/imej.5.281-291>.
- Clemente, D., Calheiros-Cabral, T., Rosa-Santos, P., & Taveira-Pinto, F. (2021). Hydraulic and Structural Assessment of a Rubble-Mound Breakwater with a Hybrid Wave Energy Converter. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(9), 922. <https://doi.org/10.3390/jmse9090922>.
- Serrone, G. Del, Peluso, P., & Moretti, L. (2023). Photovoltaic Road Pavements as A Strategy for Low-Carbon Urban Infrastructures. *Heliyon*, 9(9), e19977. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e19977>.
- Fedele, R., Merenda, M., Praticò, F. G., Carotenuto, R., & Della Corte, F. G. (2018). Energy Harvesting for IoT Road Monitoring Systems. *Instrumentation Mesure Metrologie*, 17(4), 605–623. <https://doi.org/10.3166/I2M.17.605-623>.

- Fernandez, L., & Wojtkiewicz, S. F. (2022). Multifunctional Design of Vibrational Energy Harvesters in a Bridge Structure. *Sustainability (Switzerland)*, *14*(24), 16540. <https://doi.org/10.3390/su142416540>.
- Gholikhani, M., Nasouri, R., Tahami, S. A., Legette, S., Dessouky, S., & Montoya, A. (2019). Harvesting Kinetic Energy from Roadway Pavement Through An Electromagnetic Speed Bump. *Applied Energy*, *250*, 503–511. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.05.060>.
- Gholikhani, M., Tahami, S. A., Khalili, M., & Dessouky, S. (2019). Electromagnetic Energy Harvesting Technology: Key to Sustainability in Transportation Systems. *Sustainability (Switzerland)*, *11*(18), 4906. <https://doi.org/10.3390/su11184906>.
- Gkoumas, K., & Bontempi, F. (2019). Development of A Piezoelectric Energy Harvesting Sensor: From Concept to Reality. *Frattura ed Integrita Strutturale*, *13*(47), 150–160. <https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.47.12>.
- Harne, R. L., Zhang, C., Li, B., & Wang, K. W. (2016). An Analytical Approach for Predicting The Energy Capture and Conversion by Impulsively-Excited Bistable Vibration Energy Harvesters. *Journal of Sound and Vibration*, *373*, 205–222. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2016.03.012>.
- Kaur, N., Mahesh, D., & Singamsetty, S. (2019). An Experimental Study on Piezoelectric Energy Harvesting from Wind and Ambient Structural Vibrations for Wireless Structural Health Monitoring. *Advances in Structural Engineering*, *23*(5), 1010–1023. <https://doi.org/10.1177/1369433219886956>
- Kwasinski, A., & Kwasinski, A. (2015). Increasing Sustainability and Resiliency of Cellular Network Infrastructure by Harvesting Renewable Energy. *IEEE Communications Magazine*, *53*(4), 110–116. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2015.7081083>.
- Liu, L., Sun, H., Li, C., Hu, Y., Xin, J., Zheng, N., & Li, T. (2016). RE-UPS: An Adaptive Distributed Energy Storage System for Dynamically Managing Solar Energy in Green Datacenters. *Journal of Supercomputing*, *72*(1), 295–316. <https://doi.org/10.1007/s11227-015-1529-2>.
- Mobarak, B., Shrahily, R., Mohammad, A., & Alzandi, A. A. (2022). Assessing Green Infrastructures Using GIS and the Multi-Criteria Decision-Making Method: The Case of the Al Baha Region (Saudi Arabia). *Forests*, *13*(12), 1–21. <https://doi.org/10.3390/f13122013>.
- Mustafa, G., Baloch, M. H., Qazi, S. H., Tahir, S., Khan, N., & Mirjat, B. A. (2021). Experimental Investigation and Control of a Hybrid (PV-Wind) Energy Power System. *Technology & Applied Science Research*, *11*(1), 6781–6786. <https://doi.org/10.48084/etasr.3964>.
- Orejon-Sanchez, R. D., Andres-Diaz, J. R., & Gago-Calderon, A. (2021). Autonomous Photovoltaic LED Urban Street Lighting: Technical, Economic, and Social Viability Analysis Based on a Case Study. *Sustainability (Switzerland)*, *13*(21), 11746. <https://doi.org/10.3390/su132111746>.
- Rahman, S. M., Al-Ismael, F. S. M., Haque, M. E., Shafiullah, M., Islam, M. R., Chowdhury, M. T., ... Khan, Z. A. (2021). Electricity Generation in Saudi Arabia: Tracing Opportunities and Challenges to Reducing Greenhouse Gas Emissions. *IEEE Access*, *9*, 116163–116182. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3105378>.
- Rosiek, S., Romero-Cano, M. S., Puertas, A. M., & Batlles, F. J. (2019). Industrial Food Chamber Cooling and Power System Integrated with Renewable Energy as An Example of Power Grid Sustainability Improvement. *Renewable Energy*, *138*, 697–708. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.02.010>.
- Salama, R., & Al-Turjman, F. (2023). Sustainable Energy Production in Smart Cities. *Sustainability (Switzerland)*, *15*(22), 16052. <https://doi.org/10.3390/su152216052>.
- Stegman, A., Adrian, D. A., Jeffrey, H., Johanning, L., & Bradley, S. (2017). Exploring Marine Energy Potential in the UK Using a Whole Systems Modelling Approach. *Energies*, *10*(9), 1251. <https://doi.org/10.3390/en10091251>.
- Tahami, A. S., Gholiakhani, M., Dessouky, S., Montoya, A., Papagiannakis, A. T., Fuentes, L., & Walubita, L. F. (2021). Evaluation of A Roadway Thermoelectric Energy Harvester Through FE Analysis and

Laboratory Tests. *International Journal of Sustainable Engineering*, 14(5), 1016–1032.
<https://doi.org/10.1080/19397038.2021.1924892>.

Tahami, A. S., Gholikhani, M., & Dessouky, S. (2020). Thermoelectric Energy Harvesting System for Roadway Sustainability. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2674(2), 135–145.
<https://doi.org/10.1177/0361198120905575>

Thobias, T., Padayattil, G. M., & Gopakumar, P. (2018). Emerging Smart Methodologies for On-Road Electrical Energy Harvesting. *IEEE Potentials*, 37(2), 29–34.
<https://doi.org/10.1109/MPOT.2017.2733618>.

Venugopal, P., Shekhar, A., Visser, E., Scheele, N., Mouli, G. R. C., Bauer, P., & Silvester, S. (2018). Roadway to Self-Healing Highways with Integrated Wireless Electric Vehicle Charging and Sustainable Energy Harvesting Technologies. *Applied Energy*, 212, 1226–1239.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.12.108>.

Vizzari, D., Dumoulin, J., Chailleux, E., Genesseeux, E., Lavaud, S., Bouron, S., ... Thermal Behavior, al. (2022). Thermal Behavior of a Novel Solar Hybrid Road for Energy Harvesting. *Journal of Testing and Evaluation*, 51(4), 2282–2295.
<https://doi.org/10.1520/JTE20220283i>.

Zanuttigh, B., Angelelli, E., Bellotti, G., Romano, A., Krontira, Y., Troianos, D., ... Broszeit, S. (2015). Boosting Blue Growth in a Mild Sea: Analysis of the Synergies Produced by a Multi-Purpose Offshore Installation in the Northern Adriatic, Italy. *Sustainability (Switzerland)*, 7(6), 6804–6853.
<https://doi.org/10.3390/su7066804>.