

Implementasi Konsep Piezoelectric Sebagai Energi Alternatif Di Jalur Pedestrian Situs Kota Lama Semarang

Aditya Romadhona^{✉ 1}, Herman Setiadi², Syarif Kavi Muhammad³

¹ Universitas Diponegoro, Kota Semarang, Indonesia

² Universitas Diponegoro, Kota Semarang, Indonesia

³ Universitas Diponegoro, Kota Semarang, Indonesia

Diunggah: 25/01/2025

Direview: 17/03/2025

Diterima: 14/05/2025

✉ adityaromadhona@students.undip.ac.id

Abstrak: Penerapan teknologi *piezoelectric* pada jalur pedestrian merupakan pendekatan inovatif untuk menghasilkan energi alternatif di ruang publik. Penelitian ini berfokus pada implementasi ubin *piezoelectric* di jalur pedestrian Situs Kota Lama Semarang, kawasan bersejarah dengan nilai budaya tinggi. Teknologi *piezoelectric* mengubah energi kinetik dari langkah kaki menjadi energi listrik yang dapat dimanfaatkan untuk penerangan jalan, papan informasi digital, dan pengisian daya perangkat seluler. Pengumpulan data dilakukan melalui survei kepadatan arus pejalan kaki, identifikasi lokasi pemasangan optimal, dan analisis potensi output energi. Data dianalisis menggunakan *Geographic Information System* (GIS) untuk memetakan persebaran fasilitas pedestrian dan volume pejalan kaki. Analisis *kernel density* digunakan untuk menentukan lokasi strategis pemasangan ubin *piezoelectric*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa lokasi dengan volume pejalan kaki tinggi seperti Jalan Letjen Suprpto merupakan titik strategis pemasangan. Energi yang dihasilkan dapat memenuhi kebutuhan infrastruktur publik skala kecil dan mendukung pengembangan *smart city* serta keberlanjutan energi di kawasan Kota Lama Semarang.

Kata Kunci: Piezoelectric; Jalur Pedestrian Kota Lama Semarang; *Smart City*; Energi Terbarukan.

Implementation of the Piezoelectric Concept as Alternative Energy on the Pedestrian Path of the Old City Site of Semarang

Abstract: The application of piezoelectric technology on pedestrian pathways presents an innovative approach to generating alternative energy in public spaces. This study focuses on the implementation of piezoelectric tiles along pedestrian lanes in the Semarang Old Town Site, a heritage-rich urban area. Piezoelectric systems convert kinetic energy from foot traffic into electrical energy, which can be used for street lighting, digital information boards, and mobile device charging, thereby reducing reliance on conventional energy sources. Data collection involved pedestrian flow surveys, identification of optimal installation points, and energy output analysis. Geographic Information System (GIS) tools were employed to map pedestrian facilities and traffic volume, followed by kernel density analysis to determine strategic installation zones. The results indicate that high-traffic areas, such as Letjen Suprpto Street are offer the most effective locations for deploying piezoelectric tiles. The harvested energy is sufficient to power public infrastructure in small coverage, supporting smart city initiatives and energy sustainability in Semarang Old Town.

Keywords: Piezoelectric; Semarang Old Town Pedestrian Lane; Smart City; Renewable Energy.

1. Pendahuluan

Situs Kota Lama Semarang merupakan kawasan cagar budaya nasional yang memiliki nilai sejarah dan budaya yang tinggi. Lanskap kawasan ini menyerupai kota-kota di Eropa, lengkap dengan kanal serta bangunan peninggalan kolonial Belanda, sehingga dijuluki sebagai “*Little Netherlands*” (Wulanningrum, 2014). Berdasarkan Keputusan Menteri Pendidikan dan Kebudayaan Republik Indonesia Nomor 682/P/2020, kawasan ini ditetapkan sebagai Cagar Budaya Nasional yang wajib dilestarikan (Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan Republik Indonesia, 2020).

Dalam rangka pelestarian dan pemanfaatan nilai sejarah tersebut, Pemerintah Kota Semarang melaksanakan program revitalisasi sebagai bagian dari strategi pengembangan pariwisata dan pelestarian budaya (Dewantara, 2017). Revitalisasi ini dilandasi oleh Peraturan Daerah Kota Semarang Nomor 8 Tahun 2003 dan dilakukan secara bertahap, mencakup tahap perlindungan, pelestarian/pengembangan, serta tahap pemanfaatan (Dewantara, 2017). Hasilnya menunjukkan peningkatan fungsi kawasan dan daya tarik wisata yang berimplikasi positif terhadap pertumbuhan ekonomi lokal. Salah satu aspek penting dari revitalisasi tersebut adalah peningkatan kualitas jalur pedestrian (Kurnianingtyas & Dahnyanto, 2023).

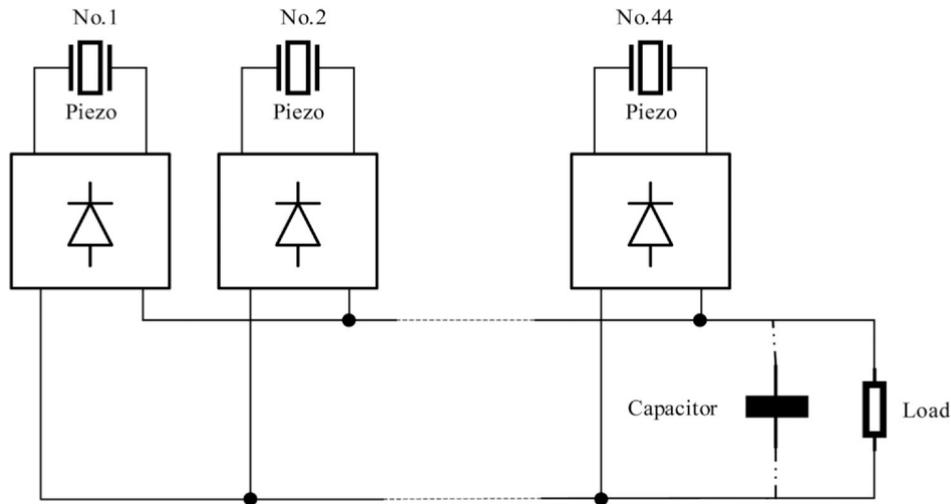
Jalur pedestrian dirancang tidak hanya untuk menunjang mobilitas pengunjung, tetapi juga untuk menjaga keselarasan dengan estetika kawasan bersejarah. Fasilitas seperti guiding block, lampu penerangan, serta street furniture telah disediakan untuk menciptakan kenyamanan bagi para pengunjung. Namun, peningkatan jumlah wisatawan dari tahun ke tahun memunculkan tantangan baru, yaitu kebutuhan akan infrastruktur yang lebih inovatif dan berkelanjutan. Dalam konteks ini, Pemerintah Kota Semarang menetapkan Kota Lama sebagai *pilot project* pengembangan *smart city* yang mengintegrasikan pelestarian warisan budaya dengan pemanfaatan teknologi modern (Nooringsih & Susanti, 2022).

Salah satu tantangan utama dalam pengembangan kawasan cerdas tersebut adalah penyediaan energi alternatif yang berorientasi pada keberlanjutan untuk mendukung operasional kawasan, khususnya penerangan jalan, papan informasi digital, serta pengisian daya perangkat elektronik di ruang publik. Teknologi *piezoelectric* menjadi salah satu solusi inovatif yang relevan dalam konteks ini. Teknologi ini bekerja dengan prinsip menghasilkan energi listrik dari tekanan mekanis, seperti langkah kaki pejalan, yang diteruskan ke material *piezoelectric* dalam bentuk ubin. Meskipun energi yang dihasilkan relatif kecil, akumulasi dari intensitas tekanan dan frekuensi penggunaan memungkinkan energi tersebut untuk disimpan dan dimanfaatkan kembali (Yingyong et al., 2021) (Karmakar et al., 2022) (Arias-Pacheco et al., 2023).

Menurut penelitian yang dilakukan oleh Yingyong et al. (2021) ubin *piezoelectric* dibuat dari material berbasis struktur kristal yang memiliki kemampuan menghasilkan tegangan listrik ketika mengalami tekanan mekanis, seperti pijakan kaki manusia. Mekanisme ini terjadi karena struktur kristal tersebut mampu memisahkan muatan listrik internal saat terdeformasi, menghasilkan arus listrik yang dapat diukur dan disimpan dalam media penyimpanan energi seperti baterai atau kapasitor. Efisiensi konversi energi dari ubin ini sangat dipengaruhi oleh dua faktor utama, yaitu besarnya tekanan yang diterima serta sifat fisik material *piezoelectric* yang digunakan, seperti elastisitas, daya tahan, dan ketahanan terhadap cuaca. Energi listrik yang dihasilkan bersifat intermiten

dan dalam skala kecil, namun cukup stabil untuk digunakan pada berbagai perangkat elektronik berdaya rendah, seperti lampu LED, sensor gerak, maupun sistem informasi digital.

Keunggulan utama teknologi *piezoelectric* dibandingkan dengan sumber energi terbarukan lainnya adalah kemampuannya untuk menghasilkan listrik tanpa bergantung pada kondisi cuaca. Tidak seperti panel surya atau turbin angin yang bersifat intermiten, ubin *piezoelectric* mampu beroperasi secara konsisten selama terdapat aktivitas manusia. Oleh karena itu, penerapan teknologi ini sangat ideal di area yang memiliki arus pejalan kaki



yang tinggi dan stabil, seperti kawasan wisata bersejarah (Yingyong et al., 2021).

Selain itu, beberapa penelitian telah menunjukkan keberhasilan pengembangan dan pengujian teknologi ubin *piezoelectric*. Panthongsy et al. (2018) mengembangkan ubin dengan mekanisme *frequency up-conversion* untuk mengubah getaran mekanis frekuensi rendah menjadi getaran elektromekanis frekuensi tinggi, sehingga meningkatkan efisiensi energi. Isarakorn et al. (2019) juga mengembangkan ubin *Energy Harvesting Floor Tile* (EHFT) dua tahap yang terbukti menghasilkan energi lebih tinggi dibandingkan model satu tahap. Penerapan teknologi ini telah menjangkau skala internasional; Pavegen, salah satu perusahaan komersial penyedia ubin *piezoelectric*, telah mengerjakan lebih dari 300 proyek di 37 negara dan terus berkembang hingga saat ini.

2. Metode

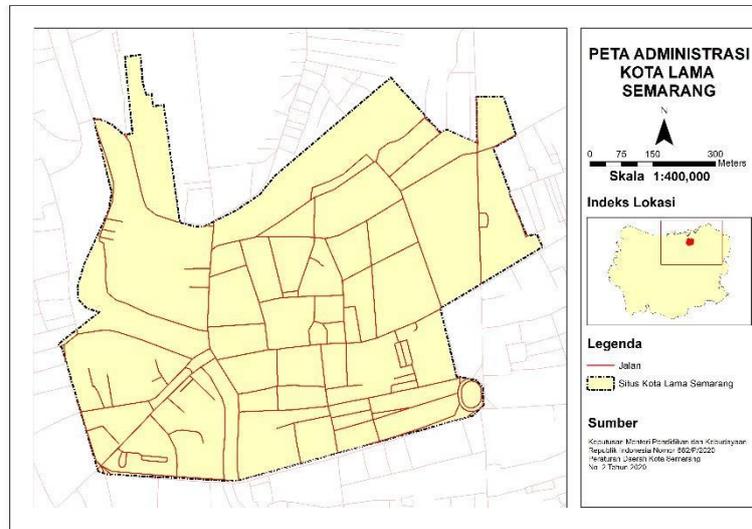
2.1 Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilakukan di jalur pedestrian Situs Kota Lama Semarang, yang ditetapkan sebagai kawasan cagar budaya nasional berdasarkan Keputusan Menteri Pendidikan dan Kebudayaan Republik Indonesia Nomor 682/P/2020. Selain itu, dalam dokumen Rencana Tata Bangunan dan Lingkungan (RTBL), kawasan ini juga diakui sebagai representasi penting dari warisan sejarah pertumbuhan Kota Lama Semarang (Pemerintah Kota Lama Semarang, 2003).

Situs Kota Lama Semarang memiliki nilai strategis karena merupakan salah satu destinasi wisata utama di Kota Lama Semarang. Berdasarkan data Dinas Kebudayaan dan Pariwisata Kota Lama Semarang (2023), sebanyak 95,60% wisatawan yang datang ke Kota Lama Semarang memilih Kota Lama sebagai tujuan utama kunjungan mereka. Pada tahun 2022, jumlah wisatawan yang tercatat mencapai 5.343.151 orang, dengan rata-rata kunjungan harian sebesar 14.638 orang. Angka ini menunjukkan tingginya intensitas aktivitas pejalan kaki di kawasan tersebut, yang menjadikan jalur pedestrian di Kota Lama sebagai lokasi yang potensial untuk penerapan teknologi *piezoelectric*.

Selain sebagai kawasan bersejarah dan tujuan wisata unggulan, Kota Lama Semarang juga ditetapkan sebagai *pilot project* penerapan konsep *smart city* oleh Pemerintah Kota Lama Semarang. Hal ini menjadikan kawasan tersebut tidak hanya penting dari segi nilai budaya dan ekonomi, tetapi juga dari sisi inovasi teknologi perkotaan. Pemilihan lokasi ini dalam penelitian didasarkan pada kombinasi antara kepadatan aktivitas manusia, pentingnya

pelestarian nilai sejarah, serta peluang penerapan solusi teknologi energi terbarukan di ruang publik yang representatif.



Gambar 2. Delineasi lokasi penelitian

2.2 Metode Pengumpulan Data

Pengumpulan data dalam penelitian ini dilakukan melalui dua pendekatan utama, yaitu survei lapangan dan studi literatur. Survei lapangan dilakukan untuk memperoleh data primer mengenai kondisi eksisting jalur pedestrian di Situs Kota Lama Semarang, termasuk persebaran Bangunan Cagar Budaya (BCB), fasilitas pendukung seperti *guiding block*, pencahayaan, dan elemen infrastruktur lainnya yang relevan untuk penerapan teknologi *piezoelectric*. Data tersebut dipetakan dalam bentuk digital (*shapefile*) untuk dianalisis secara spasial.

Studi literatur dilakukan dengan menelaah sumber-sumber ilmiah dan dokumen kebijakan terkait, seperti RTBL Kota Lama, indikator *smart city*, serta penelitian terdahulu tentang teknologi *piezoelectric* untuk memperkuat landasan teoritik dan mendukung analisis implementasi energi alternatif di kawasan cagar budaya.

2.3 Metode Analisis Data

Data yang dikumpulkan dianalisis menggunakan pendekatan spasial berbasis *Geographic Information System* (GIS). Analisis ini digunakan untuk memetakan fasilitas pedestrian, titik keramaian, dan persebaran BCB di kawasan studi. Teknik *kernel density analysis* diterapkan untuk mengidentifikasi lokasi strategis dengan kepadatan aktivitas pejalan kaki tinggi sebagai lokasi potensial pemasangan ubin *piezoelectric*.

3. Hasil Dan Pembahasan

3.1 Identifikasi Jalur Pedestrian dan Bangunan Cagar Budaya

Revitalisasi kawasan Situs Kota Lama Semarang merupakan bagian dari komitmen pemerintah untuk melestarikan kawasan bersejarah sekaligus meningkatkan kualitas ruang publik di pusat kota. Kegiatan revitalisasi ini mulai dilaksanakan secara bertahap sejak tahun 2017 oleh Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (PUPR), yang membaginya ke dalam dua tahapan utama. Revitalisasi tahap pertama dimulai pada tahun 2017, sedangkan tahap kedua dilaksanakan pada tahun 2021. Kegiatan ini tidak hanya berfokus pada pelestarian fisik bangunan bersejarah, tetapi juga menekankan perbaikan infrastruktur dan peningkatan kualitas lingkungan kawasan secara menyeluruh (Bima Bayu Aji, 2021).

Salah satu hasil paling menonjol dari program revitalisasi kawasan Kota Lama Semarang adalah perbaikan signifikan terhadap kualitas jalur pedestrian yang kini jauh lebih baik dibandingkan kondisi sebelumnya. Jalur pedestrian yang sebelumnya memiliki dimensi terbatas dan belum optimal kini telah diperluas menjadi selebar 2,5 hingga 4 meter, sesuai dengan ketentuan yang tercantum dalam dokumen Rencana Tata Bangunan dan Lingkungan (RTBL) Kota Lama Semarang. Peningkatan ini tidak hanya berdampak pada pemenuhan standar teknis infrastruktur, tetapi juga memberikan manfaat nyata dalam meningkatkan kenyamanan, keamanan, dan aksesibilitas bagi para pengguna jalan. Baik wisatawan maupun warga lokal kini dapat bergerak dengan lebih leluasa, aman, dan efisien dalam menjelajahi kawasan tersebut. Lebar jalur yang lebih proporsional juga memungkinkan integrasi berbagai fasilitas publik seperti *guiding block*, bangku, dan penerangan, sehingga jalur pedestrian tidak hanya berfungsi sebagai ruang sirkulasi, tetapi juga sebagai bagian dari ruang sosial yang aktif (Karmanis & Sumarmo, 2023).

Selain memperbaiki dimensi dan permukaan pedestrian, revitalisasi juga mencakup peningkatan fasilitas pendukung untuk menunjang fungsi kawasan sebagai ruang publik yang inklusif dan representatif. Fasilitas-fasilitas yang disediakan meliputi totem informasi interaktif yang memuat peta kawasan serta dilengkapi dengan huruf braille untuk memudahkan penyandang disabilitas. Jalur pedestrian menggunakan *paving block* berkualitas tinggi dengan desain dan warna seragam, serta dilengkapi *guiding block* berwarna kuning dengan pola timbul khusus untuk membantu navigasi tunanetra. Selain itu, disediakan pula bangku taman yang tersebar di berbagai titik strategis, toilet umum, jaringan Wi-Fi gratis di sekitar Taman Srigunting, dan *charger box* dengan desain unik menyerupai kotak telepon bergaya klasik Eropa, yang menyatu harmonis dengan atmosfer Kota Lama.

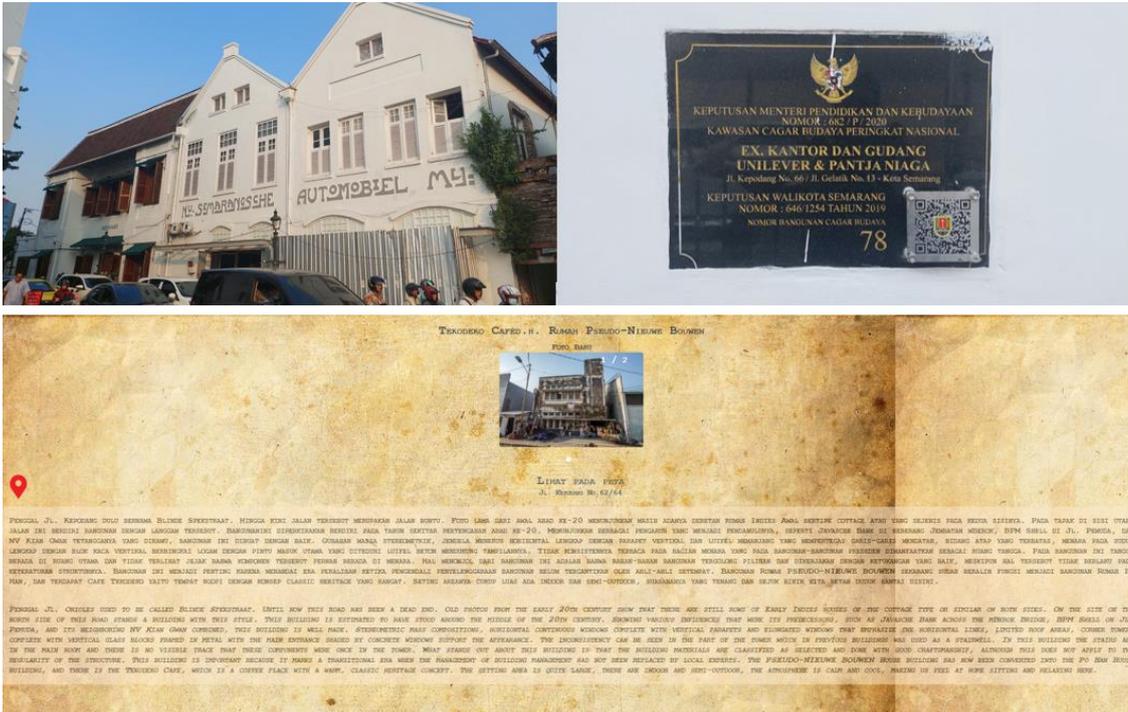
Untuk mendukung kenyamanan dan keamanan pengunjung, kawasan ini juga telah dilengkapi dengan kamera pengawas (CCTV) di berbagai titik, tempat sampah dengan desain yang menyatu dengan lingkungan, pagar pembatas antara area pejalan kaki dan jalur kendaraan, serta elemen *street furniture* yang tidak hanya berfungsi praktis, tetapi juga menjadi elemen estetika dan daya tarik visual kawasan. Lampu penerangan jalan menggunakan desain antik yang memperkuat kesan historis, sementara keberadaan vegetasi hijau tersebar di beberapa sudut memberikan suasana yang lebih asri dan nyaman bagi pengunjung.



Selain pengembangan infrastruktur pedestrian, aspek pelestarian Bangunan Cagar Budaya (BCB) juga menjadi bagian penting dalam program revitalisasi ini. BCB di kawasan Kota Lama merupakan simbol dan saksi sejarah masa lalu Kota Semarang yang memiliki nilai historis, arsitektural, dan budaya yang tinggi. Keberadaannya menjadi pengingat identitas kota serta warisan penting yang harus dijaga untuk generasi mendatang (Bahari, 2024). Hasil identifikasi lapangan yang dilakukan dalam penelitian ini mencatat bahwa terdapat sebanyak 96 bangunan cagar budaya yang tersebar di dalam kawasan studi. Setiap BCB telah dilengkapi papan identitas yang berisi informasi dasar mengenai bangunan tersebut, seperti nama bangunan, tahun pembangunan, serta status pelestariannya.

Lebih lanjut, untuk mendukung keterbukaan informasi publik dan memperkuat edukasi kepada masyarakat, papan identitas tersebut dilengkapi dengan kode batang (*barcode*) yang dapat dipindai menggunakan perangkat gawai. *Barcode* tersebut akan mengarahkan pengguna ke laman resmi Dinas Tata Ruang (Distaru) Kota Semarang

di alamat <https://distaru.semarangkota.go.id/BCB>. Situs ini menyediakan informasi yang lebih rinci mengenai masing-masing BCB, mencakup latar belakang sejarah, kepemilikan, fungsi awal dan perubahan fungsi, hingga



bentuk pemanfaatan saat ini. Integrasi informasi digital ini menjadi salah satu bentuk inovasi pelayanan publik yang sejalan dengan upaya Kota Semarang dalam membangun kota berbasis *smart city*.

3.2 Usulan Penerapan Teknologi *Piezoelectric*

Penelitian ini mengusulkan penerapan teknologi *piezoelectric* sebagai bentuk inovasi dalam bidang energi terbarukan yang mampu mengonversi energi mekanik dari langkah kaki pejalan kaki menjadi energi listrik yang dapat dimanfaatkan secara langsung. Energi kinetik dari aktivitas berjalan kaki selama ini belum dimaksimalkan sebagai sumber daya, padahal potensinya cukup besar, terutama di kawasan ruang publik dengan intensitas mobilitas tinggi. Teknologi *piezoelectric* memungkinkan pemanfaatan energi yang sebelumnya belum dimanfaatkan, menjadi alternatif yang bersih, tidak menimbulkan emisi, dan berkelanjutan. Dengan demikian, teknologi ini dapat mengurangi ketergantungan pada energi berbasis bahan bakar fosil, sekaligus mendukung tujuan pembangunan berkelanjutan, khususnya dalam konteks efisiensi energi di wilayah perkotaan (Karmakar et al., 2022).

Situs Kota Lama Semarang yang ditetapkan sebagai *pilot project* pengembangan *smart city* oleh Pemerintah Kota Semarang merupakan kawasan yang sangat strategis untuk menguji coba implementasi teknologi berbasis energi terbarukan, seperti *piezoelectric*. Berdasarkan hasil evaluasi terhadap 25 indikator *smart city* yang digunakan sebagai acuan pembangunan, kawasan Kota Lama baru memenuhi 8 indikator, sebagaimana ditampilkan pada Tabel 1 (Nooringsih & Susanti, 2022).

Tabel 1. Capaian infrastruktur *smart city* Kota Lama Semarang

No	Variabel	Indikator	Keterangan
1	Smart Governance	Legal Framework	(belum tersedia)
		Public Service	Jaringan Wi-fi gratis di area Taman Srigunting
		Integrated Management	(belum tersedia)
		Participation	(belum tersedia)

2	Smart Environment	Management	Kolam penampungan air
		Infrastructure	Perbaikan jalan, pedestrian, saluran air
		Material	(belum tersedia)
		Energy	(belum tersedia)
		Water	(belum tersedia)
		Waste	(belum tersedia)
		Pollution	(belum tersedia)
		Planning & Design	(belum tersedia)
		Innovation	(belum tersedia)
		Entrepreneurship	(belum tersedia)
		City Image	Revitalisasi Kota Lama Semarang
3	Smart Economy	Productivity	(belum tersedia)
		Tourism	Aplikasi Semarang Kota Lama, aplikasi Wisemar, aplikasi Gowes
		Finance	Sistem keuangan digital
		Interconnectechness	(belum tersedia)
		Cultural Facility	(belum tersedia)
4	Smart Living	Safety	CCTV
		Walfare/Social Cohesion	(belum tersedia)
5	Smart People	Education	(belum tersedia)
6	Smart Mobility	Transportation Management	(belum tersedia)
		Integrated ICT	Aplikasi Moovit, aplikasi Transbus

Integrasi teknologi modern di kawasan heritage seperti Kota Lama perlu dilaksanakan secara hati-hati. Menurut Xu (2024), proyek teknologi di kawasan bersejarah harus mempertimbangkan pelestarian visual, sejarah, dan karakter lingkungan. Pendekatan yang disarankan oleh Popovych (2023) meliputi tiga strategi utama:

1. Analisis Konteks Sejarah. Sebelum memulai proyek, penting untuk melakukan analisis mendalam terhadap kawasan bersejarah. Ini mencakup studi tentang arsitektur, sejarah, dan budaya lokal. Identifikasi elemen-elemen kunci yang memberikan karakter pada kawasan tersebut, seperti gaya bangunan, material yang digunakan, dan tata ruang. Dengan pemahaman yang baik tentang konteks ini, pengembang dapat merancang infrastruktur yang lebih sensitif terhadap lingkungan sekitarnya.
2. Desain yang Harmonis. Infrastruktur modern harus dirancang dengan mempertimbangkan elemen-elemen yang mencerminkan karakteristik historis. Misalnya, penggunaan material yang serupa dengan bangunan bersejarah, seperti batu bata atau kayu, dapat membantu menciptakan keselarasan visual. Selain itu, pengulangan elemen desain, seperti jendela, pintu, dan ornamen, dapat memberikan nuansa yang lebih akrab dan terintegrasi dengan lingkungan. Desain yang mempertimbangkan skala dan proporsi juga penting agar bangunan baru tidak mendominasi atau merusak pemandangan kawasan.
3. Keterlibatan Komunitas. Melibatkan masyarakat dan pemangku kepentingan dalam proses perencanaan sangat penting. Diskusi terbuka dan forum publik dapat membantu mengumpulkan masukan dari warga lokal mengenai apa yang mereka anggap penting untuk dilestarikan. Keterlibatan ini tidak hanya meningkatkan rasa memiliki, tetapi juga memastikan bahwa proyek infrastruktur baru memenuhi kebutuhan dan harapan masyarakat.

Dengan pendekatan ini, teknologi *piezoelectric* tidak hanya menjadi solusi teknis, tetapi juga dapat memperkuat identitas kawasan Kota Lama sebagai ujung tombak konsep *smart city* Kota Semarang yang adaptif dan progresif.

Dari sisi ekonomi, investasi pada ubin *piezoelectric* menunjukkan prospek yang cukup menjanjikan, terutama jika ditempatkan pada kawasan publik dengan lalu lintas pejalan kaki yang tinggi. Berdasarkan penelitian Arias-Pacheco et al. (2023), biaya yang diperlukan untuk pemasangan 50 unit ubin *piezoelectric* adalah sekitar 10.000

PEN atau setara dengan Rp 4.532.940. Ubin tersebut memiliki masa pakai yang cukup panjang, yakni mencapai 10 tahun, menjadikannya sebagai investasi jangka menengah yang layak dipertimbangkan oleh pemerintah daerah maupun pihak swasta. Selain itu, teknologi ini memiliki rasio biaya-manfaat (*benefit-cost ratio*) sebesar 1,3. Artinya, setiap satuan dana yang diinvestasikan akan menghasilkan manfaat ekonomi sebesar 1,3 kali lipat selama siklus hidupnya. Rasio ini menunjukkan bahwa proyek bersifat layak secara finansial, dengan potensi pengembalian investasi yang positif.

Dalam konteks Kota Lama Semarang, penerapan awal di titik-titik strategis seperti Jalan Letjen Suprpto di kawasan Taman Srigunting akan menjadi langkah efisien dalam menguji kelayakan teknologi ini dalam skala terbatas. Lokasi tersebut memiliki intensitas aktivitas pejalan kaki yang tinggi, sehingga meningkatkan peluang ubin menghasilkan energi dalam jumlah optimal. Dengan tingkat keramaian yang stabil setiap hari, energi yang dikumpulkan dari ribuan langkah kaki dapat mengurangi beban konsumsi listrik konvensional untuk fasilitas publik.

Pemanfaatan energi berdasarkan pada website resmi pavegen <https://info.pavegen.com/smart-cities/> dapat digunakan untuk:

1. Penerangan Jalur Pedestrian – Menggunakan energi untuk menyalakan lampu-lampu jalan pada malam hari, meningkatkan keamanan dan estetika.
2. Sistem Informasi Digital – Memfasilitasi papan informasi interaktif yang terintegrasi dengan data wisata dan sejarah bangunan.
3. Stasiun Pengisian Daya – Menyediakan *charging station* di titik tertentu bagi pengunjung yang ingin mengisi ulang perangkat seluler.

Dari sisi teknis, implementasi teknologi *piezoelectric* terbukti mampu menghasilkan energi yang cukup signifikan. Berdasarkan penelitian Arias-Pacheco et al. (2023), ubin *piezoelectric* dapat menghasilkan energi sebesar 147 volt untuk 70 ubin per satu pejalan kaki. Dalam konteks Kota Lama Semarang, dengan jumlah rata-rata pengunjung harian mencapai 14.638 orang (Dinas Kebudayaan dan Pariwisata Kota Semarang, 2023), potensi total energi yang dapat dihasilkan besar dan dapat diintegrasikan ke dalam sistem listrik mikro di kawasan tersebut.

Dalam melakukan estimasi potensi energi yang dapat dihasilkan oleh ubin *piezoelectric* di kawasan Kota Lama Semarang, digunakan pendekatan konservatif dengan mengasumsikan hanya 50% dari total pengunjung harian yang benar-benar melangkah pada area yang dilengkapi ubin *piezoelectric*. Berdasarkan data dari Dinas Kebudayaan dan Pariwisata Kota Semarang, jumlah rata-rata pengunjung harian di kawasan ini mencapai 14.638 orang. Dengan demikian, hanya sekitar 7.319 orang per hari yang diasumsikan aktif melintasi jalur dengan ubin *piezoelectric*. Setiap individu diasumsikan menghasilkan energi listrik melalui 100 langkah selama melintasi area tersebut, dengan setiap langkah menghasilkan sekitar 0,0014 watt-jam (Wh), atau setara dengan 0,14 Wh per orang. Dari perhitungan tersebut, total energi yang dihasilkan dalam satu hari diperkirakan mencapai 1.024,66 Wh atau sekitar 1,02 kWh per hari. Dalam skala tahunan, energi yang dipanen dari sistem ini dapat mencapai sekitar 373,99 kWh. Energi ini dapat dimanfaatkan untuk berbagai kebutuhan listrik skala kecil, seperti penerangan jalur pedestrian menggunakan lampu LED hemat energi, pengoperasian papan informasi digital interaktif, serta stasiun pengisian daya perangkat seluler. Walaupun kapasitas energinya masih terbatas, hasil ini menunjukkan potensi penghematan energi konvensional secara nyata, khususnya bila penerapannya dilakukan secara bertahap dan diperluas ke lokasi lain di masa depan.

Implementasi teknologi *piezoelectric* di Situs Kota Lama Semarang menawarkan kombinasi antara inovasi teknologi dan efisiensi energi, menjadikannya sebagai salah satu bentuk intervensi yang relevan, berkelanjutan, dan strategis dalam mendukung transformasi kawasan heritage menjadi bagian integral dari visi *smart city* Kota Lama Semarang. Lebih lanjut, jika proyek perintis ini terbukti efektif secara teknis dan ekonomis, maka model investasi serupa dapat direplikasi ke lokasi lain dalam kawasan Kota Lama maupun ruang publik lainnya di Kota Lama Semarang. Penerapan bertahap ini akan membantu mengurangi risiko investasi, sekaligus membuka peluang kemitraan dengan sektor swasta untuk memperluas skema pembiayaan pembangunan infrastruktur energi terbarukan berbasis partisipatif dan berorientasi keberlanjutan.

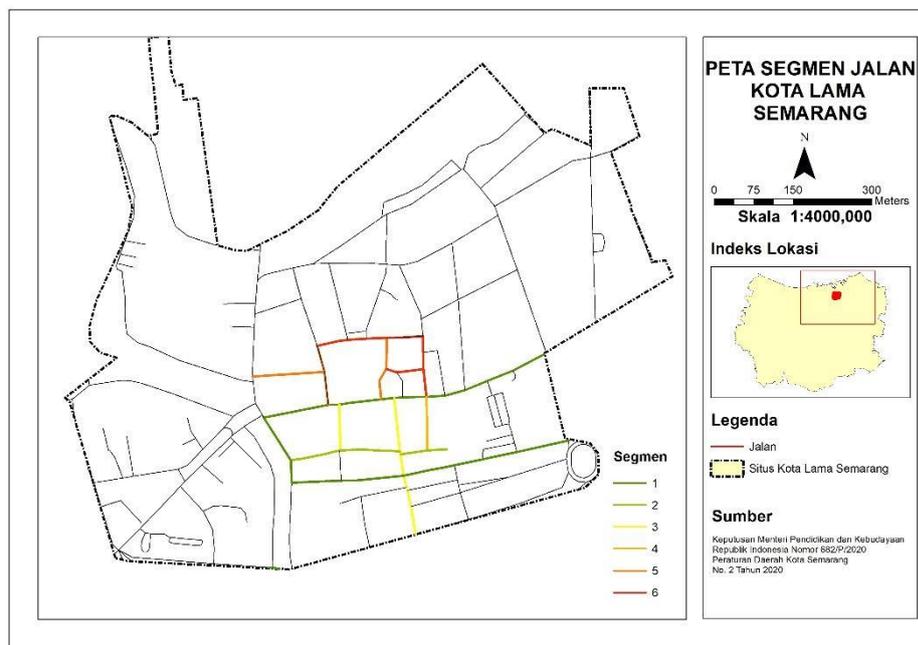
3.3 Rencana Penempatan

Penentuan lokasi strategis untuk penempatan ubin *piezoelectric* dalam penelitian ini dilakukan melalui pendekatan spasial menggunakan metode *kernel density analysis*. Analisis ini diterapkan terhadap sebaran titik Bangunan Cagar Budaya (BCB), fasilitas pedestrian, pusat kuliner, area perhotelan, serta titik-titik parkir yang tersebar di kawasan Situs Kota Lama Semarang. Untuk mempertajam hasil identifikasi spasial, digunakan juga analisis *buffer* sejauh 50 meter dari titik-titik daya tarik tersebut. Jarak ini disesuaikan dengan jarak pandang optimal terhadap bangunan bersejarah, sebagaimana direkomendasikan dalam studi visual perkotaan untuk kawasan cagar budaya (Santosa et al., 2023).

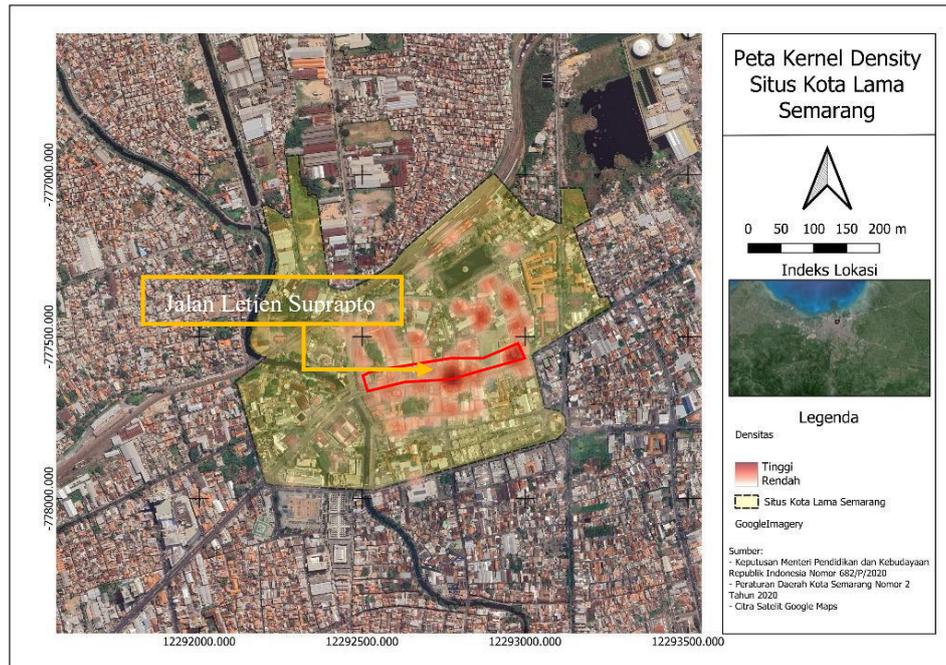
Data yang digunakan dalam analisis berasal dari hasil survei lapangan yang memetakan secara rinci persebaran BCB dan fasilitas pedestrian di kawasan studi. Hasil dari analisis *kernel density* menunjukkan bahwa kawasan dengan konsentrasi aktivitas tertinggi berada di sepanjang Jalan Letjen Suprpto, khususnya di sekitar Taman Srigunting. Kawasan ini memiliki intensitas pergerakan pejalan kaki yang tinggi, didukung oleh keberadaan fasilitas wisata, pusat kuliner, serta kedekatannya dengan berbagai titik BCB. Kondisi ini menjadikannya sebagai lokasi paling strategis untuk penempatan awal teknologi *piezoelectric*, karena jumlah langkah kaki yang tinggi akan berbanding lurus dengan besarnya energi yang dapat dihasilkan.

Menurut Kurnianingtyas & Dahnyanto (2023) terdapat enam segmen jalur pedestrian di Situs Kota Lama Semarang dengan volume pejalan kaki yang tinggi, yaitu:

1. Jalan Letjen Suprpto, Jalan Sendowo, dan Jalan Mpu Tantular berada di segmen 1.
2. Jalan Kepodang berada di segmen 2
3. Jalan Suari dan Jalan Roda II berada di segmen 3
4. Jalan Gelatik berada di segmen 4
5. Jalan Kutilang dan Jalan Branjangan berada di segmen 5
6. Jalan Garuda dan Jalan Taman Srigunting berada di segmen 6.



Temuan ini sejalan dengan hasil penelitian Kurnianingtyas & Dahnyanto (2023), yang mengidentifikasi jalur-jalur tersebut sebagai zona dengan tingkat *walkability* dan kepadatan pedestrian yang tinggi. Oleh karena itu, pemasangan ubin *piezoelectric* di ruas-ruas jalan ini dianggap sangat potensial untuk memaksimalkan efektivitas teknologi dan mencapai output energi yang optimal.



Gambar 6. Peta Kernel Density

Dari sudut pandang perencanaan kota berbasis *smart city*, implementasi teknologi *piezoelectric* di jalur pedestrian kawasan Kota Lama Semarang memiliki nilai strategis yang signifikan. Teknologi ini tidak hanya berfungsi sebagai solusi untuk menghadirkan sumber energi alternatif yang ramah lingkungan, tetapi juga mampu secara langsung mendukung pencapaian indikator-indikator penting dalam kerangka pengembangan kota cerdas. Berdasarkan evaluasi indikator *smart city* yang telah diterapkan di Kota Semarang, kawasan Kota Lama masih menghadapi sejumlah tantangan, terutama dalam hal pemanfaatan teknologi inovatif dan efisiensi infrastruktur publik. Oleh karena itu, integrasi *piezoelectric* menjadi langkah konkret untuk mendorong kawasan ini menuju pemenuhan indikator-indikator tersebut secara bertahap dan berkelanjutan.

Pertama, pada aspek *Smart Environment*, teknologi *piezoelectric* berkontribusi terhadap pengurangan emisi karbon dengan menyediakan alternatif sumber daya listrik yang bersih dan terbarukan. Energi yang dihasilkan dari langkah kaki manusia tidak memerlukan bahan bakar fosil, sehingga teknologi ini dapat memperkuat strategi kota dalam menurunkan jejak karbon dan meningkatkan efisiensi penggunaan energi di ruang publik. Kedua, dari sisi *Smart Innovation*, *piezoelectric* merupakan teknologi yang masih relatif baru di Indonesia, khususnya dalam konteks ruang kota. Penerapannya di Kota Lama akan menjadi bentuk inovasi yang konkret dan dapat menjadi proyek percontohan nasional dalam menggabungkan solusi energi alternatif dengan aktivitas sosial masyarakat. Ketiga, pada aspek *Smart Infrastructure*, integrasi teknologi ini ke dalam jalur pedestrian menunjukkan pendekatan infrastruktur cerdas yang tidak hanya bersifat fungsional, tetapi juga responsif terhadap kebutuhan pengguna serta mendukung kenyamanan, keamanan, dan interaksi pengunjung secara aktif dengan lingkungan, sehingga memperkuat kualitas ruang publik kota. Penerapan ubin berteknologi *piezoelectric* mampu mempercepat transformasi kawasan Kota Lama menjadi bagian dari struktur dari sistem *smart city* Kota Semarang

Namun demikian, perlu dicermati bahwa energi yang dihasilkan oleh teknologi *piezoelectric* bersifat terbatas, yakni hanya mencukupi untuk perangkat elektronik berdaya rendah, sehingga teknologi ini tidak dimaksudkan untuk menggantikan sumber energi utama secara penuh, melainkan sebagai penunjang sistem kelistrikan Situs Kota Lama Semarang (Keliang et al., 2025).

4. Kesimpulan

Penelitian ini menyimpulkan bahwa teknologi *piezoelectric* memiliki potensi yang besar untuk diterapkan sebagai sumber energi alternatif di kawasan pedestrian yang memiliki volume pejalan kaki tinggi, seperti di Situs Kota Lama Semarang. Dengan memanfaatkan energi mekanik dari langkah kaki yang selama ini terbuang, ubin *piezoelectric* dapat menghasilkan energi listrik yang cukup untuk mendukung berbagai fasilitas publik, seperti penerangan jalan, sistem informasi digital, dan stasiun pengisian daya perangkat elektronik. Penerapan ini tidak hanya membantu mengurangi ketergantungan terhadap energi konvensional berbasis fosil, tetapi juga mendukung tercapainya pembangunan yang berkelanjutan di ruang kota.

Dari perspektif perencanaan kota berbasis *smart city*, implementasi teknologi ini memberikan kontribusi langsung terhadap peningkatan beberapa indikator penting yang belum terpenuhi di kawasan Kota Lama. Indikator yang diperkuat mencakup *Smart Environment*, karena teknologi *piezoelectric* mendukung efisiensi energi dan pengurangan emisi karbon; *Smart Innovation*, karena penggunaan teknologi baru ini memperkenalkan pendekatan energi terbarukan yang adaptif dan futuristik; serta *Smart Infrastructure*, karena teknologi ini berfungsi sebagai bagian dari sistem infrastruktur cerdas di ruang publik. Selain mendukung ketiga indikator tersebut, keberadaan teknologi ini juga memperkuat daya tarik Kota Lama sebagai destinasi wisata sejarah yang progresif dan interaktif.

Strategi implementasi teknologi ini dianalisis menggunakan pendekatan spasial berbasis GIS, dengan hasil menunjukkan bahwa lokasi paling strategis untuk pemasangan awal ubin *piezoelectric* berada pada jalur pedestrian dengan tingkat kepadatan pejalan kaki tertinggi, yaitu di sepanjang Jalan Letjen Suprpto di kawasan sekitar Taman Srigunting. Pemilihan lokasi ini secara khusus didasarkan pada hasil *kernel density analysis* yang menunjukkan konsentrasi aktivitas tertinggi di kawasan tersebut. Rencana ini dirancang sebagai proyek perintis atau uji coba penerapan teknologi *piezoelectric* di Kota Lama Semarang. Dengan memulai dari titik paling padat dan potensial, diharapkan teknologi ini dapat menunjukkan efektivitas dan manfaat yang optimal. Apabila hasil yang diperoleh terbukti positif dan mendapat respons yang baik dari masyarakat maupun pemangku kepentingan, maka penerapan ubin *piezoelectric* ini dapat diperluas ke ruas-ruas jalan lain di kawasan Kota Lama atau bahkan tempat lain di Kota Semarang yang juga memiliki potensi serupa.

Manfaat dari penerapan teknologi ini tidak hanya terbatas pada aspek teknis, tetapi juga berdampak secara sosial dan edukatif (Epp et al., 2011). Salah satu manfaat utama adalah peningkatan kesadaran masyarakat terhadap pentingnya penggunaan energi terbarukan. Dengan melihat secara langsung bagaimana langkah kaki mereka diubah menjadi energi listrik, pengunjung akan terdorong untuk lebih mendukung gerakan energi hijau yang tidak ramah lingkungan. Selain itu, teknologi ini menghasilkan energi yang berkelanjutan untuk digunakan dalam penerangan jalur pedestrian, sistem informasi digital, dan pengisian daya perangkat elektronik berdaya rendah lain (Arhun et al., 2019) (Islam et al., 2020) (Sun et al., 2024) (Karmakar et al., 2022). Manfaat lainnya adalah peningkatan kenyamanan dan keamanan kawasan pejalan kaki, terutama pada malam hari, serta peningkatan daya tarik wisata melalui integrasi teknologi inovatif dalam konteks ruang bersejarah. Lebih jauh, penerapan energi terbarukan di infrastruktur publik ini mendukung posisi Semarang sebagai smart city dan mendorong peningkatan kualitas hidup masyarakat secara keseluruhan (Karmanis & Sumarmo, 2023).

Namun, penerapan teknologi *piezoelectric* juga memiliki sejumlah tantangan yang perlu dipertimbangkan secara matang. Salah satu kendala utama adalah tingginya biaya awal instalasi, baik dari sisi material, teknologi, maupun kebutuhan integrasi dengan infrastruktur eksisting (Epp et al., 2011). Teknologi ini juga sangat bergantung pada intensitas arus pejalan kaki; oleh karena itu, pemilihan lokasi strategis menjadi aspek krusial agar investasi yang dilakukan dapat memberikan hasil yang maksimal (Epp et al., 2011) (Arhun et al., 2019). Selain itu, ubin *piezoelectric* memerlukan perawatan berkala selayaknya perangkat elektronik pada umumnya untuk menjaga agar kinerja ubin selalu optimal serta tidak mudah rusak (Arhun et al., 2019) (Karmakar et al., 2022). Dalam konteks lingkungan fisik Kota Lama yang rawan terhadap banjir rob, risiko penurunan kinerja teknologi perlu diantisipasi melalui pemilihan material yang tahan air. Studi Kazemi et al. (2021) bahkan menunjukkan bahwa pengembangan teknologi *Waterproof Piezoelectric Wave Energy Harvester* (WPWEH) telah memungkinkan pemanfaatan *piezoelectric* dalam lingkungan ekstrem seperti laut, sehingga dapat diadaptasi untuk kondisi iklim tropis dan wilayah dengan risiko genangan.

Secara keseluruhan, penerapan ubin *piezoelectric* di Situs Kota Lama Semarang menawarkan solusi strategis dalam mendukung transformasi kawasan menuju kota cerdas yang berkelanjutan. Teknologi ini memberikan alternatif energi terbarukan yang efisien, mendukung modernisasi infrastruktur publik, serta membuka peluang penerapan inovasi berkelanjutan di ruang-ruang kota yang aktif secara sosial dan ekonomi. Dengan potensi pemanfaatan energi yang terus meningkat seiring tingginya aktivitas pejalan kaki, penerapan teknologi ini diharapkan dapat menjadi langkah awal menuju sistem energi kota yang lebih adaptif, hemat, dan berorientasi pada masa depan.

Daftar Pustaka

- Arhun, S., Hnatov, A., Dziubenko, O., & Ponikarovska, S. (2019). A device for converting kinetic energy of press into electric power as a means of energy saving. *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 36(1), 105–110. <https://doi.org/10.7736/KSPE.2019.36.1.105>
- Arias-Pacheco, E., Lucho-Alvarez, C., & Quiroz-Flores, J. C. (2023). *Efficiency and Feasibility Analysis of a Renewable Energy Generation System based on Piezoelectric Principle* (Issue 2018). <https://doi.org/10.46254/au02.20230189>
- Bahari, N. (2024). Kebijakan Revitalisasi Cagar Budaya Kota Lama Semarang dalam Perspektif Tata Kelola Pemerintahan. *Journal of Politic and Government Studies*, 13(1), 369–375.
- Bima Bayu Aji, A. S. (2021). Implementasi Program Revitalisasi Di Kawasan Kota Lama Semarang. *Journal of Public Policy and Management Review*, 10(1). <https://doi.org/https://doi.org/10.14710/jppmr.v10i1.29704>
- Dewantara., G. A. H. (2017). Kajian Implementasi Program Revitalisasi Kawasan Kota Lama Sebagai Kawasan Pariwisata Di Kota Semarang. *Journal of Politic and Government Studies*, 6(4), 1–9.
- Dinas Kebudayaan dan Pariwisata Kota Semarang. (2023). *Laporan Akhir Analisis Pasar Wisata Kota Semarang Tahun 2023* (Issue Analisis Pasar Wisata Kota Semarang).
- Epp, R., Bal, G., & Bhogal, J. (2011). An investigation into Pavegen energy generating steps at the new Student Union Building.
- Isarakorn, D., Jayasvasti, S., Panthongsy, P., Janphuang, P., & Hamamoto, K. (2019). Design and evaluation of double-stage energy harvesting floor tile. *Sustainability (Switzerland)*, 11(20). <https://doi.org/10.3390/su11205582>
- Islam, E., Abdullah, A. M., Chowdhury, A. R., Tasnim, F., Martinez, M., Olivares, C., Lozano, K., & Uddin, M. J. (2020). Electromagnetic-triboelectric-hybrid energy tile for biomechanical green energy harvesting. *Nano Energy*, 77(August), 105250. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.105250>
- Karmakar, D., Majumdar, K., Pal, M., Roy, P. K., & Machavarapu, S. (2022). Energy harvesting from pedestrian movement using piezoelectric material. *Materials Today: Proceedings*, 57, 391–397. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.250>
- Karmanis, Sumarmo, S. (2023). Tourism Object Development Policy in the Old City of Semarang. *International Journal of Social Science and Human Research*, 06(02), 856–860. <https://doi.org/10.47191/ijsshr/v6-i2-12>
- Kazemi, S., Nili-Ahmadabadi, M., Tavakoli, M. R., & Tikani, R. (2021). Energy harvesting from longitudinal and transverse motions of sea waves particles using a new waterproof piezoelectric waves energy harvester. *Renewable Energy*, 179, 528–536. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.07.042>
- Keliang Mou, Xiaoping Ji, Jie Liu, Haoyu Zhou, Haochen Tian, Xiaojuan Li, H. L. (2025). Using Piezoelectric Technology to Harvest Energy From Pavement. *Science Direct*, 12(1), 68–86.
- Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan Republik Indonesia. (2020). *Keputusan Menteri Pendidikan dan Kebudayaan Republik Indonesia Nomor 682/P/2020 tentang Kawasan Cagar Budaya Kota Lama Semarang sebagai Kawasan Cagar Budaya Peringkat Nasional*.
- Kurnianingtyas, A. P., & Dahnyanto, M. F. L. (2023). Penilaian Walkability Index Jalur Pejalan Kaki di Kawasan Kota Lama Semarang. *Reka Ruang*, 6(2), 85–100. <https://journal.itny.ac.id/index.php/rekaruang/article/view/4003%0Ahttps://journal.itny.ac.id/index.php/rekaruang/article/view/4003/1838>
- Nooringsih, K., & Susanti, R. (2022). Implementation of Smart City Concept for Sustainable Development in Semarang Old Town Area. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1082(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1082/1/012034>
- Panthongsy, P., Isarakorn, D., Janphuang, P., & Hamamoto, K. (2018). Fabrication and evaluation of energy harvesting floor using piezoelectric frequency up-converting mechanism. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 279, 321–330. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2018.06.035>
- Pemerintah Kota Semarang. (2003). *Peraturan Daerah Kota Semarang Nomor 8 Tahun 2003 Tentang Rencana Tata Bangunan Dan Lingkungan (RTBL) Kawasan Kota Lama*.
- Popovych, D. (2023). Comparison of the features of the harmonization of volume and spatial architecture of modern public and residential buildings in the historical building of cities. *Сучасні Проблеми Архітектури Та Містобудування*, 66, 214–226. <https://doi.org/https://doi.org/10.32347/2077-3455.2023.66.214-226>
- Sun, L., He, L., Li, Z., Zhong, F., Yu, B., & Lin, J. (2024). An inclined pedal type piezoelectric energy harvester for pedestrian flow and vehicle

safety monitoring. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 63(October 2023), 103646. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2024.103646>

Wulanningrum, S. D. (2014). Elemen-elemen Pembentuk Kota yang Berpengaruh terhadap Citra Kota (Studi Kasus: Kota Lama Semarang). *Jurnal Pembangunan Wilayah & Kota*, 10(2), 197. <https://doi.org/10.14710/pwk.v10i2.7650>

Xu, M. (2024). Bridging traditions: The synergy of historical wisdom and modern sustainable practices in architecture. *Applied and Computational Engineering*, 66(1), 160–165. <https://doi.org/10.54254/2755-2721/66/20240942>

Yingyong, P., Thainirarnit, P., Jayasvasti, S., Thanach-Issarasak, N., & Isarakorn, D. (2021). Evaluation of harvesting energy from pedestrians using piezoelectric floor tile energy harvester. *Sensors and Actuators A: Physical*, 331, 113035. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2021.113035>