

METODE-METODE HARVESTING ENERGY MEKANIK PADA SEPEDA MOTOR LISTRIK UNTUK MENINGKATKAN EFISIENSI BATERAI

Luthfi Dirsy Nugraha^{1*}, Moh Rosyid², Sigit Firgo³, Haikal Amri Simamoara⁴, Iskandar D'last Prince. R⁵, Cahyaning Nur Karimah⁶

^{1,2,3,4,5,6} Politeknik Negeri Jember; Jl. Mastrip PO BOX 164 Kec. Sumbersari, Kabupaten Jember, Jawa Timur 68101, Indonesia; Telp/Fax: +62 331 333533

Keywords:

Kinetic Energy; Energy Harvesting; Electric Motorbikes; Energy Efficiency

Correspondent Email:

h42220761@student.polije.ac.id

Abstrak. Sepeda motor listrik semakin banyak digunakan karena dianggap mampu menjawab kebutuhan transportasi ramah lingkungan. Meski demikian, daya tahan baterai masih menjadi kendala utama dalam pengembangannya. Penelitian ini berfokus pada kajian efektivitas berbagai metode pemanenan energi mekanik sebagai upaya meningkatkan efisiensi energi dan memperpanjang usia pakai baterai. Kajian dilakukan menggunakan Systematic Literature Review (SLR) dengan model PRISMA-SLR. Dari 542 artikel yang dihimpun melalui Google Scholar, disaring menjadi 22 artikel yang relevan dan dianalisis lebih mendalam. Hasil kajian menunjukkan bahwa sistem pengereman regeneratif mampu meningkatkan jarak tempuh hingga 17,1%. Selain itu, penggunaan generator berbasis roda dan turbin angin dinilai cukup efektif sebagai sumber energi tambahan, walaupun kinerjanya sangat dipengaruhi oleh kondisi kecepatan. Metode Vibration Energy Harvesting berbasis piezoelektrik menghasilkan energi tambahan dalam jumlah kecil, namun tetap bermanfaat pada kondisi tertentu. Sementara itu, Kinetic Energy Recovery System (KERS) menunjukkan efisiensi paling tinggi, dengan potensi pemulihan energi hingga 88,2%. Secara keseluruhan, kombinasi beberapa metode pemanenan energi dalam satu sistem yang terintegrasi diyakini mampu mendukung efisiensi penggunaan energi dan mempercepat pengembangan sepeda motor listrik berkelanjutan.

Abstract. Electric motorcycles are increasingly adopted as a promising solution for sustainable transportation. Nevertheless, battery endurance remains one of the main challenges in their development. This study explores the effectiveness of different mechanical energy harvesting methods in improving energy efficiency and extending battery lifespan. The research was conducted through a Systematic Literature Review (SLR) using the PRISMA-SLR approach. A total of 542 articles were collected from Google Scholar, which were filtered down to 22 relevant papers for further analysis. The results indicate that regenerative braking systems can extend travel range by up to 17.1%. In addition, wheel-driven generators and wind turbines provide supplementary energy, although their performance largely depends on riding speed. Piezoelectric-based Vibration Energy Harvesting contributes smaller amounts of additional energy but remains useful under certain conditions. Meanwhile, the Kinetic Energy Recovery System (KERS) demonstrates the highest efficiency, with energy recovery potential reaching 88.2%. Overall, integrating multiple harvesting methods into a single coordinated system shows strong potential for enhancing energy utilization, reducing reliance on external charging, and supporting the development of more sustainable electric motorcycles. This approach underscores the importance of practical innovation in addressing the energy challenges of modern mobility.



Copyright © [JITET](http://www.jitet.org) (Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan). This article is an open access article distributed under terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC)

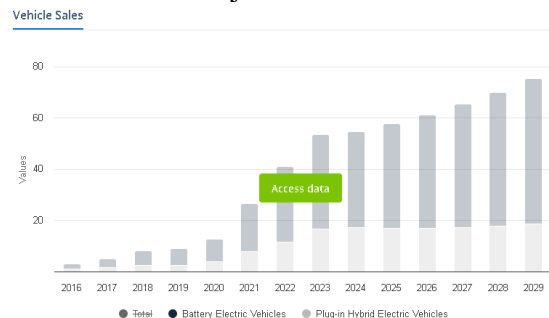
1. PENDAHULUAN

Penggunaan kendaraan listrik, termasuk sepeda motor listrik telah meningkat secara signifikan dalam beberapa tahun terakhir sebagai upaya global untuk mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil dan menekan emisi gas rumah kaca [1]. Pasar kendaraan listrik (EV) saat ini menunjukkan pertumbuhan yang sangat pesat, dipicu oleh beberapa faktor utama yaitu kemajuan teknologi baterai yang berperan penting dalam meningkatkan efisiensi serta daya tahan kendaraan listrik, sehingga menjadikannya pilihan yang lebih menarik bagi konsumen yang memiliki kekhawatiran mengenai jarak tempuh dan durasi pengisian. Selain itu, berbagai insentif pemerintah seperti potongan pajak dan subsidi, memberikan dorongan finansial yang signifikan kepada konsumen untuk beralih dari kendaraan bermesin pembakaran internal ke kendaraan listrik. Langkah ini tidak hanya menguntungkan individu, tetapi juga mendukung tujuan lingkungan yang lebih luas.

Minat konsumen yang semakin meningkat terhadap transportasi berkelanjutan telah mempercepat peralihan menuju kendaraan listrik (EV) dengan signifikan. Pendapatan global di sektor ini diperkirakan akan mencapai US\$828,6 miliar pada tahun 2025, dengan pertumbuhan tahunan gabungan (CAGR) sebesar 6,94% hingga tahun 2029. Hal tersebut menunjukkan potensi pasar yang bisa melampaui US\$1,1 triliun [2]. Proyeksi penjualan unit mencapai 18,84 juta kendaraan pada tahun 2029, mencerminkan permintaan yang tinggi terhadap EV. Masyarakat kini tidak hanya mencari alternatif yang ramah lingkungan, tetapi juga kendaraan yang lebih efisien dan ekonomis. Investasi yang berkelanjutan dalam infrastruktur pengisian daya, ditambah dengan regulasi lingkungan yang ketat, mendorong produsen mobil untuk mempercepat pengembangan model-model EV baru. Hal ini menciptakan kompetisi produk yang sehat dan mendorong inovasi dalam teknologi baterai, yang berkontribusi pada pengurangan biaya produksi serta harga jual. Faktor tersebut membuat pertumbuhan pasar kendaraan listrik bukanlah sekadar kecenderungan sementara, melainkan langkah penting menuju masa depan yang lebih berkelanjutan yang berdampak positif pada

lingkungan, kesehatan masyarakat, dan perekonomian global.

China memimpin pasar EV sebagai kekuatan dominan, dengan pendapatan yang diantisipasi sebesar US\$ 378 miliar pada tahun 2025. Sebagai pasar mobil listrik terbesar di dunia, China mendapatkan keuntungan dari dukungan pemerintah dan produsen lokal seperti BYD dan NIO, serta rantai pasokan yang sangat berkembang untuk baterai dan komponen penting mobil listrik. Sementara itu, negara-negara Eropa seperti Norwegia terus memimpin dalam pangsa pasar EV per kapita, didorong oleh kebijakan agresif yang mendukung mobilitas listrik, termasuk insentif pajak dan perluasan jaringan pengisian daya. Harga rata-rata tertimbang volume kendaraan listrik pada tahun 2025 diproyeksikan sekitar US\$57,4 ribu, yang menunjukkan adanya pertumbuhan pasar untuk kendaraan listrik premium dan kelas menengah [2]. Seiring dengan percepatan adopsi global, produsen mobil dan pembuat kebijakan di seluruh dunia berfokus untuk mengurangi biaya, meningkatkan daya tahan baterai, dan memastikan integrasi kendaraan listrik ke dalam kehidupan sehari-hari, sehingga membuka jalan bagi masa depan yang lebih bersih dan berkelanjutan di industri otomotif.



Gambar 1. Data Penjualan Kendaraan Listrik [2]

Data penjualan kendaraan listrik di Indonesia mengalami peningkatan, dengan total mencapai 133.225 unit sejak 2019 hingga April 2024, sebagaimana diungkapkan oleh Menteri Koordinator Bidang Perekonomian, Airlangga Hartarto [3]. Kenaikan yang signifikan upaya keberhasilan berbagai kebijakan pemerintah dalam mendorong penggunaan kendaraan listrik, termasuk insentif pajak, subsidi pembelian, dan pengembangan infrastruktur pendukung seperti stasiun pengisian kendaraan listrik umum (SPKLU) [3]. Selain itu,

meningkatnya kesadaran masyarakat akan pentingnya kendaraan ramah lingkungan juga berperan dalam mempercepat pergeseran dari kendaraan berbahan bakar fosil ke kendaraan listrik. Dengan semakin beragamnya pilihan model dan harga yang lebih bersaing, kendaraan listrik kini menjadi alternatif yang lebih menarik bagi konsumen di Indonesia, baik untuk keperluan pribadi maupun sebagai sarana transportasi umum, seperti taksi dan ojek online.

Hal ini menunjukkan bahwa transisi menuju kendaraan listrik merupakan langkah strategis untuk menciptakan masa depan yang lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan. Sepeda motor listrik dapat meningkatkan efisiensi energi, biaya operasional yang lebih rendah, dan dampak lingkungan yang lebih kecil. Dengan kemajuan teknologi baterai, motor listrik dapat melakukan jarak yang lebih jauh hanya dengan satu pengisian daya. Dengan demikian, mereka dapat mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil yang semakin mahal dan terbatas [4]. Sepeda motor listrik juga lebih murah untuk dirawat karena memiliki lebih sedikit komponen bergerak, mengurangi risiko kerusakan dan perbaikan. Motor listrik adalah pilihan transportasi kota yang lebih ramah lingkungan karena tidak menghasilkan emisi gas buang yang menyebabkan polusi udara. Sepeda motor listrik akan menjadi opsi transportasi masa depan yang lebih ramah lingkungan dan hemat biaya [5].

Namun, keterbatasan daya tahan baterai dan efektivitas penggunaan energi tetap menjadi salah satu masalah utama yang masih dihadapi. Baterai sepeda motor listrik memiliki umur pakai dan kapasitas penyimpanan energi yang terbatas. Baterai rusak seiring waktu, yang meningkatkan waktu pengisian ulang dan kapasitas penyimpanan [5]. Faktor lain yang menghambat adopsi sepeda motor listrik lebih luas adalah jarak tempuh yang terbatas, terutama di negara-negara dengan infrastruktur pengisian daya yang masih berkembang. Akibatnya, solusi kreatif diperlukan untuk meningkatkan kinerja baterai dan memperpanjang masa pakai kendaraan listrik tanpa bergantung pada kapasitas baterai yang lebih besar.

Metode Harvesting Energy Mekanik adalah cara yang dapat digunakan untuk meningkatkan

efisiensi energi sepeda motor listrik. Metode ini bertujuan untuk mengumpulkan dan mengubah energi mekanik yang dihasilkan oleh kendaraan saat beroperasi menjadi energi listrik tambahan, yang dapat digunakan untuk mengisi ulang baterai atau mengurangi konsumsi daya utama. Beberapa sumber energi mekanik yang berpotensi dimanfaatkan dalam sistem Harvesting Energy pada sepeda motor listrik meliputi energi kinetik dari pengereman regeneratif, getaran yang dihasilkan oleh kontur jalan dan energi dari suspensi kendaraan [6].

Metode Harvesting Energy ini dapat meningkatkan efisiensi penggunaan energi dan mengurangi jumlah daya yang digunakan baterai. Sehingga, memungkinkan masa pakai baterai yang lebih lama dan mengurangi frekuensi penggantian baterai, yang berdampak pada biaya operasional dan tingkat limbah elektronik [7]. Penggunaan pengereman regeneratif, yang telah lama digunakan pada mobil listrik dan sekarang ditambahkan ke sepeda motor listrik, adalah salah satu contoh penelitian yang telah dilakukan untuk mengembangkan teknologi Harvesting Energy pada kendaraan listrik. Beberapa metode juga sedang dikembangkan, seperti penggunaan piezoelektrik untuk mengambil energi dari getaran dan penggunaan sistem suspensi aktif [8]. Oleh karena itu, review ini dilakukan bertujuan untuk mengkaji berbagai metode Harvesting Energy mekanik yang dapat diterapkan pada sepeda motor listrik guna meningkatkan efisiensi baterai.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Harvesting Energy*

Harvesting Energy atau panen energi adalah proses menangkap dan mengonversi energi dari lingkungan sekitar menjadi energi yang dapat digunakan. Teknologi ini berkembang pesat dalam beberapa dekade terakhir karena meningkatnya kebutuhan akan sumber energi berkelanjutan dan independen dari sumber daya fosil. Salah satu bentuk utama Harvesting Energy adalah Harvesting Energy mekanik, yang memanfaatkan energi dari gerakan atau getaran mekanis untuk dikonversi menjadi listrik [9]. Secara umum, Harvesting Energy melibatkan tiga komponen utama yang bekerja secara sinergis untuk menangkap, mengubah, dan memanfaatkan energi dari lingkungan sekitar.

Sumber energi dapat berasal dari berbagai bentuk, seperti panas dari mesin atau tubuh manusia, cahaya matahari, gelombang elektromagnetik dari sinyal radio, serta energi mekanik dari getaran atau gerakan. Energi ini kemudian dikonversi oleh transduser energi, seperti piezoelektrik untuk menangkap getaran, sel fotovoltaik untuk mengubah cahaya menjadi listrik, atau antena untuk menangkap gelombang radio. Setelah diubah menjadi listrik, energi tersebut disimpan dan dikelola oleh sistem penyimpanan dan pemanfaatan, yang biasanya menggunakan baterai atau superkapasitor agar dapat digunakan secara efisien sesuai kebutuhan [10]. Teknologi Harvesting Energy memiliki peran penting dalam berbagai aplikasi modern, termasuk sensor nirkabel yang dapat beroperasi tanpa baterai, perangkat medis seperti alat pacu jantung yang mengambil energi dari pergerakan tubuh, sistem pemantauan industri untuk mendukung otomatisasi, serta Internet of Things (IoT) yang membutuhkan sumber daya energi yang berkelanjutan untuk meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan perangkat pintar.

2.2 Harvesting Energy Mekanik

Harvesting Energy mekanik berfokus pada pemanfaatan energi kinetik atau potensial dari gerakan mekanik, seperti getaran, tekanan, atau gaya yang dihasilkan oleh aktivitas manusia, kendaraan, atau mesin industri [11]. Prinsip dasarnya adalah mengubah energi mekanik menjadi energi listrik melalui beberapa mekanisme, antara lain sebagai berikut.

- a. Piezoelektrik - Menghasilkan listrik ketika material mengalami deformasi mekanik. Umumnya digunakan pada sensor tekanan, pemanen energi dari langkah kaki, serta pemantau struktur bangunan.
- b. Elektromagnetik - Berdasarkan hukum induksi Faraday, gerakan relatif antara medan magnet dan kumparan menghasilkan tegangan listrik. Mekanisme ini cocok untuk memanen energi dari getaran mekanis atau aliran fluida.
- c. Elektrostatik - Memanfaatkan perubahan kapasitansi antara dua elektroda yang bergerak. Banyak diterapkan pada sensor getaran miniatur dan perangkat pemanen energi skala mikro.

- d. Termoelektrik - Menghasilkan listrik dari perbedaan suhu yang timbul akibat gesekan atau getaran. Mekanisme ini sering dikombinasikan dengan energi mekanik untuk meningkatkan efisiensi konversi energi.

Harvesting Energy mekanik merupakan solusi inovatif dalam pemanfaatan energi kinetik dan potensial dari berbagai sumber gerakan, seperti aktivitas manusia, getaran mesin, dan lalu lintas kendaraan. Dengan berbagai mekanisme konversi, seperti piezoelektrik, elektromagnetik, elektrostatik, dan termoelektrik, teknologi ini memungkinkan pengubahan energi mekanik menjadi listrik secara efisien tanpa ketergantungan pada sumber daya eksternal [12]. Implementasinya dalam perangkat wearable, sensor jaringan nirkabel, infrastruktur transportasi, dan peralatan medis menunjukkan potensi besar dalam meningkatkan efisiensi energi dan mendukung sistem yang lebih berkelanjutan. Namun, tantangan seperti efisiensi konversi yang masih terbatas, ketahanan material, serta integrasi dengan sistem penyimpanan energi perlu diatasi untuk meningkatkan efektivitasnya dalam aplikasi yang lebih luas.

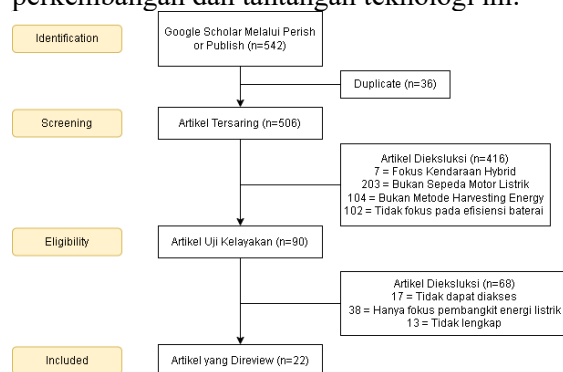
2.3. Jenis-jenis sumber energi mekanik pada sepeda motor listrik yang dapat dipanen

Harvesting Energy atau panen energi merupakan konsep yang semakin penting dalam pengembangan teknologi kendaraan listrik, termasuk sepeda motor listrik. Dengan memanfaatkan berbagai sumber energi mekanik yang dihasilkan selama berkendara, teknologi ini dapat meningkatkan efisiensi daya dan memperpanjang jangkauan perjalanan tanpa memerlukan baterai tambahan [13]. Beberapa metode yang dapat diterapkan untuk Harvesting Energy pada sepeda motor listrik meliputi Regenerative Braking System, penggunaan generator dari putaran roda, wind generator, vibration energy harvesting dengan piezoelektrik, serta Kinetic Energy Recovery System (KERS).

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode kualitatif dengan pendekatan Systematic Literature Review (SLR) untuk menganalisis berbagai penelitian yang relevan mengenai Harvesting Energy mekanik pada sepeda motor listrik. Proses identifikasi artikel dilakukan

menggunakan model PRISMA-SLR, dengan pencarian literatur melalui Google Scholar serta bantuan aplikasi Perish or Publish. Kata kunci yang digunakan dalam pencarian meliputi "Harvesting Energy mekanik" dan "sepeda motor listrik", yang menghasilkan 542 jurnal awal. Untuk memastikan relevansi penelitian, jurnal-jurnal tersebut diseleksi berdasarkan rentang waktu 2020 hingga 2025, dengan beberapa jurnal yang lebih lama (hingga 10 tahun ke belakang) tetap dipertimbangkan jika memiliki keterkaitan kuat dengan topik penelitian. Artikel yang tidak memenuhi kriteria inklusi dieksklusi melalui tahap penyaringan yang ketat, sehingga diperoleh 22 jurnal yang dapat direview secara mendalam. Literatur yang dipilih mencakup aspek teori, metode, serta implementasi Harvesting Energy mekanik dalam kendaraan listrik, guna memberikan wawasan komprehensif tentang perkembangan dan tantangan teknologi ini.



Gambar 2. Metode Prisma-SLR

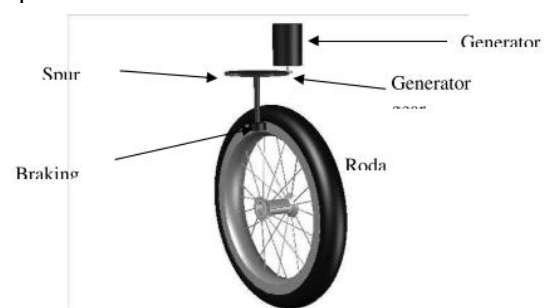
4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Regenerative Braking System

Pengereman konvensional umumnya hanya mengandalkan sistem mekanik yang menyebabkan energi kinetik terbuang sebagai panas, hal itu diungkapkan oleh Daniel (2023)[14] pada penelitiannya terkait motor listrik. Untuk meningkatkan efisiensi, energi yang biasanya hilang saat pengereman dapat dimanfaatkan kembali melalui sistem pengereman regeneratif. Sistem ini berfungsi untuk mengisi daya baterai dan memperpanjang jarak tempuh kendaraan. Berdasarkan hasil penelitian, pada kecepatan 10 km/jam, sistem ini dapat mengisi baterai dengan rata-rata 7,15 Ampere. Ketika kecepatan meningkat menjadi 20 km/jam, rata-rata pengisian juga meningkat menjadi 12,84 Ampere. Dengan demikian, jarak tempuh tambahan yang dapat diperoleh adalah

1,06 km pada kecepatan 10 km/jam dan 1,13 km pada kecepatan 20 km/jam. Efisiensi dari pengereman regeneratif tercatat sebesar 1,41% pada 10 km/jam dan 1,47% pada 20 km/jam. Secara keseluruhan, kendaraan yang tidak dilengkapi dengan sistem regeneratif memiliki jarak tempuh sekitar 5,12 km, sedangkan dengan sistem ini, jarak tempuhnya meningkat menjadi 6,18 km. Hal ini menunjukkan peningkatan efisiensi sebesar 17,1%.

Penelitian yang dilakukan oleh Pratama dkk., (2021) [15] berfokus pada pengembangan model dinamis untuk sistem pengereman regeneratif. Model ini menjadi landasan penting dalam upaya membangun dan mengoptimalkan model fisik di masa mendatang. Model ini disimulasikan menggunakan Simulink untuk menganalisis efisiensi pengereman berdasarkan kecepatan awal sepeda, serta mengevaluasi pengaruh rasio Spur Gear terhadap efisiensi sistem. Hasil simulasi menunjukkan bahwa rugi torka yang terjadi selama pengereman berbanding lurus dengan kecepatan awal pengereman, tetapi peningkatan efisiensi pengereman tidak bersifat linear terhadap peningkatan kecepatan awal. Selain itu, rasio Spur Gear yang lebih tinggi meningkatkan torka pengereman, sehingga efisiensi sistem bertambah seiring dengan peningkatan rasio Spur Gear.



Gambar 3. Konsep sistem pengereman [15]

Sistem pengereman regeneratif memiliki peran yang krusial dalam pengumpulan energi pada sepeda motor listrik, dengan memanfaatkan energi kinetik yang biasanya hilang selama proses pengereman untuk dikonversi menjadi energi listrik yang dapat digunakan. Penelitian yang dilakukan oleh Furqan dan Sutantra (2021) [16] menunjukkan bahwa teknologi regenerative brake-by-wire dapat beroperasi sepenuhnya tanpa memerlukan rem mekanis, bahkan pada variasi perlambatan antara 0 hingga 0,5 j/g, dengan gaya

pengereman maksimum yang tercatat mencapai 1002,71 N. Kontribusi sistem ini terhadap kebutuhan daya kendaraan dalam siklus berkendara WMTC kelas 1 dan 2 masing-masing mencapai 38,48% dan 33,55%, dengan efisiensi yang diperoleh sebesar 54,89% dan 54,31% pada sepeda motor hybrid. Hasil penelitian ini sejalan dengan konsep pengumpulan energi mekanik, di mana penerapan teknologi pengereman regeneratif tidak hanya berfungsi untuk meningkatkan efisiensi energi, tetapi juga berpotensi memperpanjang umur baterai serta jarak tempuh kendaraan listrik. Lebih lanjut, integrasi optimasi sistem pengereman regeneratif dengan pendekatan pengumpulan energi lainnya, seperti penggunaan teknologi piezoelektrik atau elektromagnetik, dapat lebih meningkatkan pemanfaatan energi dari proses pengereman. Dengan demikian, sistem pengereman regeneratif dapat dianggap sebagai solusi yang berkelanjutan dan inovatif dalam konteks transportasi listrik, di mana efisiensi dan keberlanjutan menjadi semakin penting.

Pemanfaatan energi kinetik pada sepeda motor listrik menjadi fokus utama dalam meningkatkan efisiensi energi dan memperpanjang daya tahan baterai. Beberapa metode harvesting energi kinetik telah dikembangkan, seperti sistem pengereman regeneratif ini mengkonversi energi kinetik yang biasanya terbuang saat pengereman menjadi energi listrik untuk mengisi baterai. Penelitian Daniel (2023) menunjukkan bahwa sistem ini mampu meningkatkan jarak tempuh sepeda motor listrik hingga 17,1% dibandingkan dengan sistem pengereman konvensional. Selain itu, penelitian oleh Pratama dkk. (2021) menegaskan bahwa efisiensi sistem ini bergantung pada rasio Spur Gear dan kecepatan awal pengereman. Melalui optimalisasi yang tepat, sistem ini dapat memberikan kontribusi signifikan terhadap efisiensi energi kendaraan listrik.

4.2. Generator Dengan Memanfaatkan Putaran Roda

Salah satu inovasi yang dapat dikembangkan untuk meningkatkan efisiensi energi kendaraan listrik dengan memanfaatkan energi mekanik dari generator dan diputar dengan roda sebagai harvesting energi untuk mengisi daya baterai. Beberapa penelitian telah dilakukan untuk

mempelajari potensi dan efisiensi sistem ini dalam hal daya yang dihasilkan.

Pada penelitian yang dilakukan oleh Umarella (2020) [17] tentang pemanfaatan putaran mesin ke roda belakang sepeda motor diperlukan untuk mengisi baterai 12volt dengan kapasitas 5 Ah (Ampere hour). Pengujian dan pengambilan data dilakukan selama 75 menit pada berbagai kecepatan kendaraan, yaitu 40, 50, 60, dan 70 km/jam. Hasil pengujian rata-rata di tunjukkan pada tabel 3 berikut:

Tabel 1. Hasil pengujian yang dilakukan oleh Umarella (2020) [17]

No	Kecepatan (km/jam)	Daya yang dihasilkan (Watt)	Lama waktu pengisian (Jam)
1	40	0,788	83,33
2	50	3,346	25
3	60	6,487	9,25
4	70	9,903	5,76

Dari penelitian Umarella (2020) pada tabel 3 diatas mencatat bahwa daya yang dihasilkan meningkat dan lama waktu pengisian semakin cepat seiring bertambahnya kecepatan kendaraan, dengan efisiensi tertinggi tercapai pada 70 km/jam. Hal ini dapat kita jelaskan dengan rumus persamaan prinsip dasar fisika $E_k = 1/2 mv^2$. Dari persamaan tersebut bahwa v atau kecepatan sangat berpengaruh terhadap peningkatan energi yang dihasilkan (Pratama, 2021).

Selain rumus persamaan prinsip dasar fisika juga dapat dijelaskan dengan hukum faraday. Menurut Umarella (2020) mengatakan bahwa Hukum faraday, dimana tingginya tegangan dihasilkan dari banyak lilitan dan kecepatan dari rotor akan mempengaruhi perubahan fliks magnetik tiap satuan waktu. Sehingga pada kecepatan 70 km/jam, rotor generator berputar lebih cepat, yang menghasilkan laju perubahan fluks yang lebih besar dan tegangan induksi yang lebih besar.

Sementara pada penelitian Dewadi (2021) [18] menyebutkan jika optimasi penelitian dengan menambahkan dinamo sepeda sebagai generator mampu menghemat daya hingga 0,05 Wh dalam perjalanan sejauh 300 meter. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada jarak yang sama konsumsi daya listrik untuk *E-Bike menggunakan* dinamo tercatat sebesar 271,59

W, sementara pada *E-Bike* yang menggunakan trafo step-down mencapai 295,02 W. Dalam penelitian ini, nilai efisiensi tidak dihitung akan tetapi dari data yang ada dapat dianalisis tentang efisiensi konsumsi energi dengan membandingkan penggunaan daya pada sistem *E-Bike* yang menggunakan trafo step-down dengan *E-Bike* menggunakan dinamo sepeda sebagai generator. Untuk mendapatkan nilai efisiensi dapat digunakan rumus persamaan efisiensi konsumsi energi sebagai berikut yaitu:

$$\eta = \frac{P_{trafo} - P_{dinamo}}{P_{trafo}} \times 100\%$$

Dimana:

η = Efisiensi konsumsi energi (%)

P_{trafo} = Daya yang dikonsumsi *E-Bike* menggunakan trafo step-down (W)

P_{dinamo} = Daya yang dikonsumsi *E-Bike* menggunakan dinamo (W)

Maka dari rumus diatas dapat dihitung efisiensi konsumsi energi seperti dibawah ini:

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{P_{trafo} - P_{dinamo}}{P_{trafo}} \times 100\% \\ &= \frac{295,02 - 271,95}{295,02} \times 100\% \\ \eta &= 7,95 \% \end{aligned}$$

Dari hasil diatas menunjukkan bahwa dinamo sepeda terbukti lebih efisien sebanyak 7,95% dalam mengkonsumsi energi listrik dibandingkan dengan trafo.

Putra (2019)[19] juga mengungkapkan jika dalam penelitiannya sepeda listrik ini menggunakan motor DC seri 24V, 350W, 14.4A, 3000 rpm sebagai sistem penggerakannya. Untuk mengonversi energi kinetik roda menjadi listrik, digunakan generator DC magnet permanen 24V dengan daya 29W. Energi listrik yang dihasilkan disimpan dalam empat aki 12V – 7.1Ah. Berdasarkan pengujian, daya output untuk menggerakkan sepeda listrik bervariasi sesuai beban: 80.6 kg = 316.7W, 85.6 kg = 303.8W, dan 90.6 kg = 294.6W. Kecepatan maksimum tanpa beban mencapai 78.53 m/s, sedangkan kecepatan rata-rata dengan beban 80.6 kg = 5.68 m/s, 85.6 kg = 5.13 m/s, dan 90.6 kg = 4.70 m/s.

Dari beberapa penelitian yang sudah ada seperti diatas, pada penelitian Umarella (2020) mencatat bahwa daya yang dihasilkan meningkat seiring bertambahnya kecepatan

kendaraan, dengan efisiensi tertinggi tercapai pada 70 km/jam. Dewadi (2021) membuktikan bahwa penggunaan dinamo sepeda lebih hemat energi dibandingkan dengan trafo step-down, sedangkan studi Putra (2019) menunjukkan bahwa generator DC magnet permanen mampu menghasilkan daya output yang bervariasi sesuai dengan beban kendaraan. Meskipun efisiensi sistem ini bergantung pada kecepatan dan kondisi jalan, metode ini memberikan solusi hemat energi dalam skenario tertentu.

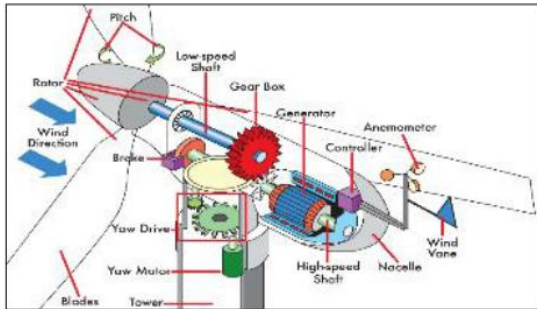
4.3. Wind Generator

Penerapan wind generator pada sepeda motor listrik merupakan salah satu metode energy harvesting yang memanfaatkan aliran udara ketika kendaraan bergerak. Meskipun daya listrik yang dihasilkan relatif kecil dibandingkan dengan regenerative braking atau KERS, Teknologi ini memiliki keunggulan sebagai sumber energi kontinu selama kendaraan melaju dengan kecepatan tertentu. Ini meskipun menghasilkan jumlah daya listrik yang lebih kecil dibandingkan dengan regenerative braking (KERS). Ini membuatnya pilihan yang sempurna untuk mendukung sistem kelistrikan tambahan, seperti sensor IoT, lampu LED, dan perangkat komunikasi kendaraan.

Menurut penelitian saat ini, desain aerodinamika turbin dan posisi pemasangannya pada bodi kendaraan sangat memengaruhi efisiensi wind generator. Jika tidak diatur dengan baik, turbin dapat meningkatkan drag, atau hambatan udara. Akibatnya, motor listrik akan mengkonsumsi lebih banyak energi. Oleh karena itu, pendekatan aerodinamika harus dimasukkan ke dalam desain wind generator.

Pada penelitian Biswas & Das (2024) [20] menunjukkan performa generator angin portabel pada berbagai kecepatan kendaraan. Hasilnya menunjukkan bahwa pada kecepatan 30 km/jam, 40 km/jam, 50 km/jam, dan 60 km/jam, tegangan arus bolak-balik (AC) yang dihasilkan secara berturut-turut mencapai 20V, 35V, 50V, 70V, dan 105V. Arus yang dihasilkan juga menunjukkan kestabilan dengan nilai masing-masing sebesar 3mA, 5,35mA, 7mA, 11mA, dan 15,5mA. Kombinasi antara tegangan dan arus ini menghasilkan daya listrik sebesar 0,06W hingga 1,63W. Pada kondisi ekstrem, yakni kecepatan 60 km/jam, tercatat tegangan puncak sebesar 113V dengan arus

16,43mA, menghasilkan daya maksimum mencapai 1,86W. Hasil ini menunjukkan bahwa generator angin portabel memiliki potensi signifikan dalam menghasilkan daya listrik yang layak dimanfaatkan, khususnya pada kecepatan kendaraan yang tinggi.



Gambar 4. Konversi Energi Generator Angin [20]

Dalam penelitian Lain, Khan dkk. (2021) [21], melakukan pemanfaatan energi angin yang ditimbulkan dari pergerakan kendaraan sebagai sumber daya tambahan untuk sistem komunikasi kendaraan listrik, terutama dalam ekosistem Internet of Vehicles (IoV). Energi tersebut diolah menggunakan rangkaian pengatur daya agar dapat disesuaikan dengan kebutuhan perangkat akhir seperti baterai dan superkapasitor. Untuk mencapai efisiensi konversi yang maksimal, dilakukan analisis aerodinamika menggunakan perangkat lunak ANSYS. Hasil pengujian menunjukkan bahwa generator DC mampu menghasilkan tegangan sebesar 35V pada kondisi tanpa beban. Namun, saat diberi beban penuh tegangan menurun. Kondisi ini terjadi secara stabil pada kecepatan 90 km/jam, menjadikannya ideal untuk mendukung pengisian daya baterai kendaraan.

Tabel 2. Hasil dari penelitian yang dilakukan Khan dkk (2021) [21]

Kecepatan (km/jam)	Air Velocity (m/s)	Wind Power (W)	Turbine Power (W)	Mechanical Power (W)
10	2.90	1.4	0.4	0.4
20	4.30	4.6	1.4	1.3
30	5.40	9.1	2.7	2.7
40	7.70	26.4	8.0	7.8
50	9.80	54.6	16.6	16.1
60	13.3	133.5	41.5	40.3
70	15.7	224.4	68.3	66.4

80	18.2	343.8	106.4	103.4
90	20.5	499.3	152.4	147.7

Sehingga dapat dihitung efisiensi yang diperoleh dengan rumus:

$$\eta_{total} = \frac{P_{elektrik}}{P_{angin}} \times 100\%$$

$$\eta_{total} = \frac{143,4 \text{ W}}{499,3 \text{ W}} \times 100\%$$

$$= 28,7\%$$

Sementara itu, Subhashini dkk. (2018) [22] mengembangkan sistem penyimpanan energi berbasis superkapasitor yang dikombinasikan dengan mikrokontroler Arduino. Sistem ini dirancang untuk menyimpan energi listrik yang dihasilkan dari generator angin dan menampilkan data tegangan serta kapasitas penyimpanan secara real-time. Generator DC yang digunakan dilengkapi roda gigi dan mampu berputar hingga 1297 rpm, menghasilkan tegangan maksimal sebesar 17V, cukup untuk mengoperasikan sistem bertegangan 5,3V. Keseluruhan perangkat dirakit di atas papan akrilik agar kompatibel dengan kendaraan roda dua. Inovasi ini terbukti mampu menjalankan sistem sesuai spesifikasi dan juga mengatasi berbagai kekurangan yang ditemukan pada penelitian sebelumnya.

Berdasarkan hal tersebut, memungkinkan bahwa energi angin yang dihasilkan dari pergerakan kendaraan menyimpan potensi besar untuk dimanfaatkan sebagai sumber energi terbarukan, khususnya dalam konteks kendaraan listrik. Generator angin portabel terbukti efektif dalam menghasilkan daya pada kecepatan tinggi, sementara penambahan teknologi seperti superkapasitor dan mikrokontroler meningkatkan efisiensi penyimpanan dan pemanfaatan energi. Selain itu, dengan pengoptimalan desain aerodinamis, sistem ini juga dapat mendukung aplikasi IoV secara optimal dan berkelanjutan.

4.4. Vibration Energy Harvesting (Piezoelektrik)

Metode klasik dalam harvesting energi pasif umumnya didasarkan pada efek resonansi, tetapi sensitivitas tinggi daya keluaran terhadap frekuensi eksitasi eksternal menyebabkan kinerja yang kurang optimal ketika terdapat spektrum eksitasi yang luas. Sementara itu,

pemanen energi semi-aktif biasanya menggunakan hukum kontrol empiris. Dalam penelitian Pepe dkk. (2023) [23], Variational Feedback Control (VFC) diperkenalkan sebagai mekanisme adaptif cerdas yang dirancang secara eksplisit untuk memaksimalkan daya keluaran. Getaran yang dihasilkan dari jalan bergelombang, guncangan akibat polisi tidur, lubang jalan, serta mesin pembakaran internal dapat menjadi sumber energi potensial, yang kemudian dikonversi menjadi listrik menggunakan susunan pemanen energi piezoelektrik bergetar.

Sementara itu, Ridwan dkk. (2024) [24] menjelaskan jika dua piezoelektrik yang disusun secara seri mampu menghasilkan daya rata-rata 0,9 watt, sedangkan konfigurasi paralel menghasilkan daya rata-rata 0,5 watt. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa konversi getaran mekanik pada kendaraan menjadi energi listrik memiliki potensi sebagai sumber daya tambahan untuk mengisi ulang baterai kendaraan listrik saat berkendara, sehingga dapat memperpanjang jarak tempuh kendaraan. Hal ini dipertegas oleh penelitian yang dilakukan oleh Kiswantono, 2024 [25] Rata-rata tegangan output rangkaian seri lebih tinggi, sebesar 4,766 V, dibandingkan dengan rangkaian paralel, sebesar 4,612 V, memberikan gambaran efisiensi dan kinerja kedua konfigurasi rangkaian dalam mengumpulkan energi dari getaran kendaraan. Untuk mendapatkan nilai efisiensi dapat digunakan rumus persamaan berikut :

- Selisih persentase daya

$$\Delta P\% = ((V_{\text{seri}}^2 / V_{\text{paralel}}^2) - 1) \times 100\%$$
- Persentase kenaikan tegangan

$$\Delta V\% = ((V_{\text{seri}} - V_{\text{paralel}}) / V_{\text{paralel}}) \times 100\%$$

Maka dari rumus diatas dapat dihitung selisih persentase daya dan persentase kenaikan tegangan dari rangkaian seri dan paralel seperti dibawah ini :

- Selisih persentase daya

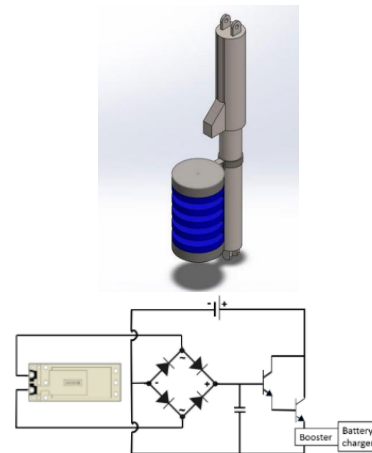
$$\Delta P\% = ((4.766^2 / 4.612^2) - 1) \times 100\%$$

$$\Delta P\% = 6.79\%$$
- Persentase kenaikan tegangan

$$\Delta V\% = ((4.766 - 4.612) / 4.612) \times 100\%$$

$$\Delta V\% = 3.35\%$$

Perhitungan efisiensi diatas menunjukkan bahwa rangkaian seri memiliki peningkatan tegangan sekitar 3,34% dan daya sekitar 6,79% lebih besar dibandingkan paralel.



Gambar 5. Tabung Nilon dengan Piezoelektrik dan Wiring Diagramnya [24]

Doria dkk. (2020) [26] mengutarakan hasilnya jika uji jalan dalam domain frekuensi menunjukkan perlunya perangkat tuning khusus agar piezoelektrik komersial dapat selaras dengan getaran sepeda. Model matematis dan pengujian eksperimental mengungkap bahwa osilator tambahan yang terdiri dari pegas kantilever dan massa beban efektif dalam menyesuaikan piezoelektrik dengan getaran sepeda. Osilator dengan massa kecil (5 g) menghasilkan efek serupa dengan massa ujung yang lebih besar (17 g) dalam hal tegangan listrik dan tekanan pada material piezoelektrik. Sementara itu, osilator dengan massa lebih besar (16 g) menghasilkan tegangan lebih tinggi tetapi juga meningkatkan tekanan dalam material piezoelektrik. Daya listrik yang dihasilkan oleh harvester yang telah disesuaikan dihitung berdasarkan spektra kepadatan daya (PSD) getaran sepeda yang diukur di jalan serta fungsi respons frekuensi (FRF) harvester yang diuji di laboratorium. Meskipun daya yang dihasilkan oleh satu harvester relatif kecil (sekitar 1 mW), pemasangan beberapa harvester yang telah disetel dapat meningkatkan jumlah energi yang dipanen. Hal ini dimungkinkan karena perangkat tuning tidak terlalu menambah ukuran harvester, dan pengujian menunjukkan getaran signifikan di berbagai bagian sepeda, baik dalam arah vertikal maupun longitudinal.

Namun, pada penelitian Andriansyah dkk. (2024) [27] mengutarakan pada hasilnya jika mesin piston 4-langkah memiliki berbagai pola mode getaran. Perangkat harvesting energi yang digunakan dalam penelitian ini berbasis elektromagnetik. Hasil penelitian menunjukkan

bahwa masih diperlukan pengembangan lebih lanjut untuk meningkatkan efisiensi dalam memanfaatkan getaran mesin piston 4-langkah sebagai sumber energi listrik. Meskipun mesin ini memiliki pola mode getaran yang bervariasi pada kecepatan rotasi yang berbeda, jumlah energi listrik yang dihasilkan oleh perangkat harvesting elektromagnetik masih tergolong rendah.

Berbagai peneliti mengungkap, tantangan utama dalam pemanenan energi getaran terletak pada pencocokan frekuensi eksitasi dan optimalisasi desain sistem harvester. Penelitian Ridwan dkk. (2024), menunjukkan bahwa konfigurasi seri piezoelektrik lebih efisien dibandingkan konfigurasi paralel, sementara Doria dkk. (2020) menekankan pentingnya tuning khusus untuk menyelaraskan piezoelektrik dengan getaran spesifik seperti pada mesin sepeda motor. Andriansyah dkk. (2024) mencatat bahwa metode harvesting elektromagnetik masih memerlukan pengembangan lebih lanjut, namun potensi teknologi ini tetap menjanjikan. Meskipun daya yang dihasilkan relatif kecil, penerapan sistem piezoelektrik dapat menjadi sumber daya tambahan yang inovatif bagi kendaraan listrik dan sistem elektronik portabel.

4.5. Kinetic Energy Recovery System (KERS)

Kinetic Energy Recovery System (KERS) merupakan sistem yang efisien digunakan dalam mobil balap sebagai perangkat pemulihan energi atau konsep pengereman regeneratif. Konsep serupa dapat diterapkan pada sepeda sebagai perangkat ramah lingkungan dengan tujuan mengurangi tenaga yang diperlukan oleh pengendara. Energi yang biasanya terbuang saat pengereman dapat disimpan dan dimanfaatkan kembali untuk membantu pergerakan sepeda, sehingga meningkatkan efisiensi dan kenyamanan dalam berkendara [28]. Kendaraan yang dilengkapi dengan KERS dapat menangkap sebagian energi kinetik saat deselerasi. Sistem pengereman ini secara efektif menyimpan energi dalam suatu mekanisme, daripada membiarkannya hilang begitu saja [29].



Gambar 6. Contoh Implementasi KERS [28]

Sistem ini menyimpan energi kinetik dalam bentuk energi potensial dan mengubahnya kembali menjadi energi kinetik saat diperlukan. Saat mengendarai sepeda, pengendara sering merasa lelah karena harus mengayuh kembali setelah pengereman. Adanya sistem pemulihan energi kinetik (KERS), pengendara memiliki dua sumber tenaga yang dapat digunakan sesuai kebutuhan. Saat pengereman, energi kinetik biasanya terbuang sebagai panas akibat gesekan, yang kemudian dilepaskan ke atmosfer melalui radiasi termal. Namun, kendaraan yang dilengkapi KERS dapat menyimpan sebagian energi ini, sehingga tidak terbuang sia-sia dan dapat digunakan kembali untuk meningkatkan efisiensi energi [30].

Khan dkk. (2016) [31] membuktikan pada risetnya bahwa energi yang dipulihkan sepenuhnya berasal dari sepeda motor itu sendiri tanpa memerlukan sumber energi tambahan. Pengujian dilakukan pada berbagai kecepatan dan beban untuk membandingkan performa sepeda motor yang dilengkapi Kinetic Energy Recovery System (KERS) dengan sepeda motor konvensional tanpa KERS. Armenta-Déu & Cortés (2023) [32] menganalisis perbandingan tingkat pemulihan energi kinetik (KERS) pada kendaraan listrik BMW i3 dalam kondisi berkendara tertentu menunjukkan bahwa konversi energi potensial dapat memulihkan hingga 88.2%, sedangkan sistem pengereman regeneratif mencapai efisiensi maksimum 60.1%. Penelitian ini menyimpulkan bahwa dalam kondisi lalu lintas perkotaan yang ditandai dengan perubahan kecepatan mendadak dan sering, sistem pengereman regeneratif lebih efektif untuk KERS. Sebaliknya, pada rute antar kota dengan kondisi berkendara yang lebih stabil, konversi

energi potensial menjadi sistem utama yang lebih optimal untuk pemulihan energi.

Berdasarkan data yang dikemukakan oleh Khan dkk. (2016), penerapan Kinetic Energy Recovery System (KERS) pada kendaraan terbukti mampu memulihkan energi signifikan, sehingga menjadikannya solusi yang efisien dan mandiri dalam konteks pemanfaatan energi kinetik. Pengujian yang dilakukan pada berbagai variasi kecepatan dan beban menunjukkan bahwa kendaraan yang dilengkapi dengan KERS memiliki performa yang lebih baik dibandingkan dengan kendaraan konvensional, khususnya dalam hal efisiensi energi. Sementara penelitian Armenta-Déu & Cortés (2023) memperkuat temuan ini dengan menunjukkan bahwa sistem KERS pada kendaraan listrik BMW i3 mampu mencapai tingkat pemulihan energi hingga 88,2% dalam kondisi konversi energi potensial, sementara sistem pengereman regeneratif mencatat efisiensi maksimum sebesar 60,1%. Temuan ini mengindikasikan bahwa pemilihan mekanisme pemulihan energi perlu disesuaikan dengan karakteristik rute berkendara; di mana sistem pengereman regeneratif lebih efektif pada lalu lintas perkotaan yang fluktuatif, sedangkan konversi energi potensial lebih optimal pada kondisi berkendara stabil seperti rute antar kota. Data ini mendukung potensi implementasi KERS tidak hanya pada kendaraan bermotor, tetapi juga pada sepeda, dengan mempertimbangkan adaptasi teknologi dan konteks penggunaan yang relevan.

Tabel 3. Perbandingan Metode Harvesting Energi Kinetik

Metode	Efektivitas	Kelebihan	Kelemahan
Sistem Pengereman Regeneratif	Efisiensi hingga 17,1% peningkatan jarak tempuh	Memanfaatkan energi pengereman, mengisi ulang baterai	Bergantung pada kecepatan dan rasio gear
Generator dengan Putaran Roda	dinamo sepeda lebih efisien sebanyak	Sumber energi tambahan yang	Efisien rendahnya pada

	7,95% dalam mengkonsumsi energi listrik dibandingkan dengan trafo.	hemat biaya	kecepatan rendah
Wind Generator	Mengubah energi angin menjadi listrik dengan efisiensi total sebesar 28,7%	Menghasilkan daya dari angin, mendukung IoV	Membantu optimisasi aerodinamika
Vibration Energy Harvesting	Efisiensi peningkatan tegangan sebesar 3,34% (konfigurasi seri)	Mengubah getaran menjadi listrik, kompatibel dengan berbagai kendaraan	Daya yang dihasilkan masih rendah
KERS	Pemulihan energi potensial hingga 88,2%	Sangat efektif pada rute antar kota	Kurang optimal dalam lalu lintas perkotaan

Dari beberapa energi harvesting kinetik yang ada pada tabel 4 diatas, bahwa pemilihan metode harvesting energi kinetik harus disesuaikan dengan kondisi operasional kendaraan. Sistem pengereman regeneratif dan KERS sangat efektif dalam meningkatkan efisiensi energi, sementara wind generator dan vibration energy harvesting dapat menjadi sumber energi tambahan yang mendukung keberlanjutan kendaraan listrik [33]. Optimasi

teknologi ini akan semakin meningkatkan performa sepeda motor listrik di masa depan. Seiring dengan perkembangan teknologi kendaraan listrik, metode harvesting energi kinetik dapat terus dikembangkan melalui integrasi dengan sistem kecerdasan buatan (AI) dan Internet of Things (IoT). Teknologi ini memungkinkan sistem pengereman regeneratif dan generator energi bekerja secara adaptif berdasarkan pola berkendara pengguna serta kondisi jalan secara real-time. Selain itu, penelitian lebih lanjut dapat berfokus pada peningkatan efisiensi konversi energi, seperti optimalisasi material piezoelektrik pada sistem Vibration Energy Harvesting dan peningkatan desain turbin angin mikro agar lebih efektif dalam menangkap aliran udara saat kendaraan bergerak.

Pengembangan baterai superkapasitor yang mampu menyimpan dan mendistribusikan energi secara lebih cepat juga menjadi kunci dalam meningkatkan efektivitas sistem Kinetic Energy Recovery System (KERS). Dengan inovasi ini, sepeda motor listrik dapat memperoleh daya tambahan dalam waktu singkat tanpa membebani sistem utama. Selain itu, penelitian terkait pemanfaatan material ramah lingkungan dan ringan untuk komponen sistem harvesting energi kinetik juga perlu diperhatikan guna mengurangi bobot kendaraan serta meningkatkan efisiensi energi secara keseluruhan. Integrasi beberapa metode pemanenan energi dalam satu sistem yang terkoordinasi juga dapat menjadi solusi terbaik dalam memaksimalkan potensi energi yang tersedia.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil kajian yang dilakukan melalui pendekatan *Systematic Literature Review (SLR)* terhadap 22 artikel relevan, dapat disimpulkan bahwa penerapan metode *harvesting energy* mekanik pada sepeda motor listrik memiliki kontribusi nyata dalam meningkatkan efisiensi energi serta memperpanjang usia pakai baterai.

Pengereman Regeneratif terbukti mampu meningkatkan efisiensi hingga 17,1% dengan mengonversi energi kinetik yang biasanya hilang saat pengereman menjadi energi listrik untuk mengisi baterai. Teknologi ini memberikan tambahan jarak

tempuh serta berpotensi memperpanjang umur baterai kendaraan.

Generator dengan Putaran Roda menghasilkan energi tambahan dengan efisiensi optimal pada kecepatan tinggi. Penggunaan dinamo sepeda sebagai generator bahkan lebih efisien $\pm 7,95\%$ dibandingkan dengan trafo step-down, sehingga dapat mengurangi konsumsi energi secara signifikan. Sedangkan Wind Generator memanfaatkan aliran udara ketika kendaraan melaju untuk menghasilkan listrik. Walaupun daya yang dihasilkan relatif kecil, sistem ini efektif untuk mendukung perangkat tambahan seperti sensor IoT, lampu, maupun sistem komunikasi kendaraan, dengan efisiensi total hingga $\pm 28,7\%$.

Vibration Energy Harvesting (VEH) berbasis piezoelektrik memungkinkan pemanfaatan getaran dari suspensi dan kondisi jalan menjadi energi listrik. Hasil pengujian menunjukkan konfigurasi seri menghasilkan daya dan tegangan lebih tinggi dibandingkan paralel, dengan peningkatan daya sekitar 6,79% dan tegangan 3,34%. Meskipun daya yang dihasilkan masih rendah, teknologi ini menjanjikan sebagai energi tambahan yang berkelanjutan. Kinetic Energy Recovery System (KERS) merupakan metode paling efisien, dengan tingkat pemulihan energi potensial hingga 88,2%. Sistem ini sangat efektif pada kondisi rute berkendara stabil (misalnya antar kota), meskipun kurang optimal pada lalu lintas perkotaan yang fluktuatif.

Secara keseluruhan, masing-masing dari kelima pendekatan memiliki kelebihan dan kekurangan. Oleh karena itu, dianggap sebagai solusi terbaik untuk memaksimalkan pemanfaatan energi adalah menggabungkan berbagai metode ke dalam satu sistem yang terkoordinasi. Integrasi dengan teknologi *Internet Of Things (IoT)* dan *Artificial Intelligence (AI)* untuk membuat sistem bekerja adaptif secara real-time, Sistem pengelolaan energi hybrid dapat mengimbangi efisiensi energi, daya tambahan, dan keandalan operasional kendaraan listrik. Untuk mempercepat penggunaan teknologi ini, kebijakan dan regulasi pemerintah harus

mendukung dengan insentif dan subsidi, serta mendorong riset dan produksi lokal.

UCAPAN TERIMA KASIH

Kami mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Belmawa dan Politeknik Negeri Jember (Polije) atas dukungan dan fasilitasi yang telah diberikan kepada kami dalam melaksanakan penelitian ini. Melalui Program Kreativitas Mahasiswa, kami mendapatkan kesempatan berharga untuk mengembangkan ide dan inovasi kami. Bantuan dan bimbingan yang diberikan sangat berarti dalam menunjang keberhasilan penelitian ini. Semoga kerja sama yang baik ini dapat terus terjalin dan memberikan manfaat bagi kemajuan ilmu pengetahuan dan teknologi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] G. Musyahr, I. Lutfi Mubarak, and T. Elektro Politeknin Muhammadiyah Pekalongan Jl Raya Pahlawan No Gejlig -Kajen Kab Pekalongan, "MODIFIKASI SEPEDA LISTRIK MENJADI SEPEDA LISTRIK HYBRID PADA SUPPLAI ENERGI LISTRIK," 2017. [Online]. Available: <http://ejournal.politeknikmuhpkl.ac.id/index.php/>
- [2] Statista, "Electric Vehicles - Worldwide | Statista Market Forecast." Accessed: May 05, 2025. [Online]. Available: <https://www.statista.com/outlook/mmo/electric-vehicles/worldwide>
- [3] Can, "Populasi Kendaraan Listrik Tembus 133 Ribu di Indonesia." Accessed: May 05, 2025. [Online]. Available: <https://www.cnnindonesia.com/otomotif/20240924191025-603-1147893/populasi-kendaraan-listrik-tembus-133-ribu-di-indonesia>
- [4] L. Malihah, "Tantangan Dalam Upaya Mengatasi Dampak Perubahan Iklim Dan Mendukung Pembangunan Ekonomi Berkelanjutan: Sebuah Tinjauan," *Jurnal Kebijakan Pembangunan*, vol. 17, no. 2, pp. 219–232, Dec. 2022, doi: 10.47441/jkp.v17i2.272.
- [5] M. A. M. Lallmamode and A. S. M. Al-Obaidi, "Harvesting energy from vehicle transportation on highways using piezoelectric and thermoelectric technologies," in *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing Ltd, Dec. 2021. doi: 10.1088/1742-6596/2120/1/012016.
- [6] A. Surendran, A. Baig, and R. K. Acharya, "Smart Energy Harvesting in Electric Vehicles: Integrating Automation for Enhanced Sustainability," *International Journal of Research Publication and Reviews*, vol. 4, no. 11, pp. 1650–1662, Nov. 2023, doi: 10.55248/gengpi.4.1123.113140.
- [7] S. M. Hosseini, M. Soleymani, S. Kelouwani, and A. A. Amamou, "Energy Recovery and Energy Harvesting in Electric and Fuel Cell Vehicles, a Review of Recent Advances," 2023, *Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.* doi: 10.1109/ACCESS.2023.3301329.
- [8] S. H. Awla and S. P. Philbin, "Harvesting Renewable Energy to Supply Power for Electric Buses," *Clean Technologies*, vol. 6, no. 4, pp. 1625–1652, Dec. 2024, doi: 10.3390/cleantechnol6040079.
- [9] S. Bai and C. Liu, "Overview of energy harvesting and emission reduction technologies in hybrid electric vehicles," Sep. 01, 2021, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.rser.2021.111188.
- [10] A. S. Mhatre and P. Shukla, "A comprehensive review of energy harvesting technologies for sustainable electric vehicles," *Environmental Science and Pollution Research*, 2024, doi: 10.1007/s11356-024-34865-8.
- [11] J. G. Parada-Salado, L. F. Gaona-Cárdenas, M. A. Rodríguez-Licea, and F. J. Perez-Pinal, "Harvesting in electric vehicles: Combining multiple power tracking and fuel-cells," *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 10, no. 5, pp. 5058–5073, Oct. 2020, doi: 10.11591/IJECE.V10I5.PP5058-5073.
- [12] S. Bentouba, N. Zioui, P. Breuhaus, and M. Bourouis, "Overview of the Potential of Energy Harvesting Sources in Electric Vehicles," Jul. 01, 2023, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/en16135193.
- [13] M. D. Kobbi, H. Alombah, and M. N. Ngwa, "Energy Harvesting Technologies in Electric Vehicles and Applications in Sustainable Agricultural Transportation: A Review," *Journal Renewable Energy & Mechanics (REM)*, vol. 07, no. 02, 2024, doi: 10.25299/rem.2024.vol7(02).17798.
- [14] L. Daniel, *STUDI PENERAPAN REGENERATIF UNTUK PENGISIAN BATERAI PADA MOBIL LISTRIK*. Universitas Lancang Kuning, 2023.
- [15] R. P. Putra, "Desain Sistem Pengereman Regeneratif Pada Sepeda Listrik Ringkas," *ENERGI & KELISTRIKAN*, vol. 13, no. 1, pp. 11–19, Jun. 2021, doi: 10.33322/energi.v13i1.1058.
- [16] F. Al Furqan and I. N. Sutantra, "Studi Analisis Kinerja Regenerative Brake-by-wire System pada Sepeda Motor Hybrid dengan Konfigurasi Seri," *Jurnal Teknik ITS*, vol. 10, no. 1, pp.

- E100–E104, Aug. 2021, doi: 10.12962/j23373539.v10i1.61767.
- [17] I. Umarella, “DESAIN PEMBANGKIT LISRIK DENGAN MEMANFAATKAN PUTARAN MESIN KE RODA BELAKANG SEPEDA MOTOR,” *Mechonversio: Mechanical Engineering Journal*, vol. 2, no. 1, pp. 1–8, 2019.
- [18] F. M. Dewadi, “Efisiensi Pada Sepeda Listrik Dengan Dinamo Sepeda Sebagai Generator,” 2021.
- [19] H. Putra, “Perancangan Sepeda Listrik Dengan Menggunakan Motor DC Seri,” Kendari, 2019. [Online]. Available: <http://ojs.uho.ac.id/index.php/jfe/>
- [20] Joyeshree Biswas and Suman Das, “Investigating the effectiveness of a mobile wind turbine generating electricity from vehicle air movement,” *World Journal of Advanced Research and Reviews*, vol. 22, no. 1, pp. 210–218, Apr. 2024, doi: 10.30574/wjarr.2024.22.1.0992.
- [21] Z. A. Khan, H. H. R. Sherazi, M. Ali, M. A. Imran, I. Ur Rehman, and P. Chakrabarti, “Designing a wind energy harvester for connected vehicles in green cities,” *Energies (Basel)*, vol. 14, no. 17, Sep. 2021, doi: 10.3390/en14175408.
- [22] G. Subhashini, R. Abdulla, and T. R. R. Mohan, “Wind turbine mounted on a motorcycle for portable charger,” *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, vol. 9, no. 4, pp. 1814–1822, 2018, doi: 10.11591/ijpeds.v9.i4.pp1814-1822.
- [23] G. Pepe, A. Doria, N. Roveri, and A. Carcaterra, “Vibration energy harvesting for cars: semi-active piezo controllers,” *Archive of Applied Mechanics*, vol. 93, no. 2, pp. 663–685, Feb. 2023, doi: 10.1007/s00419-022-02292-1.
- [24] R. Irawan, A. Fadillah, D. Tri Wijaya Putra, J. Jeremi Badar, and R. Agung Pratama, “POTENSI PEMANFAATAN GETARAN MEKANIK PADA SHOCKBREAKER MOBIL SEBAGAI PENUNJANG PENGHASIL LISTRIK MENGGUNAKAN PIEZOELEKTRIK,” depok, Mar. 2024. [Online]. Available: <http://ejournal2.uika-bogor.ac.id/index.php/ame/index>
- [25] A. Kiswantono, “INOVASI ENERGI HIJAU: PIEZOELEKTRIK UNTUK MENGUBAH GETARAN KENDARAAN MENJADI LISTRIK,” *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*, vol. 12, no. 3, Aug. 2024, doi: 10.23960/jitet.v12i3.4452.
- [26] A. Doria, E. Marconi, and F. Moro, “Energy harvesting from bicycle vibrations by means of tuned piezoelectric generators,” *Electronics (Switzerland)*, vol. 9, no. 9, pp. 1–19, Sep. 2020, doi: 10.3390/electronics9091377.
- [27] Farezi Andriansyah, Nur Indah, and Subekti Subekti, “Harvesting energy vibration derived from the rotational speed of a A 4-stroke engine,” *JTTM: Jurnal Terapan Teknik Mesin*, vol. 5, no. 1, pp. 67–74, Apr. 2024, doi: 10.37373/jttm.v5i1.872.
- [28] N. Kumbhojkar, K. Mohite, A. Kulkarni, and S. Patil, “DESIGN AND IMPLEMENTATION OF KINETIC ENERGY RECOVERY SYSTEM (KERS) IN BICYCLE,” 2015. [Online]. Available: www.jifactor.com
- [29] A. Dombale, O. Rahade, O. Pore, S. Pote, A. Punde, and A. Powar, “Kinetic energy recovery system (KERS) In bikes,” in *Challenges in Information, Communication and Computing Technology*, London: CRC Press, 2024, pp. 554–558. doi: 10.1201/9781003559092-95.
- [30] M. Bhoir, A. Shirke, P. Yadav, D. Shaikh, and J. Pandey, “KERS Bicycle,” Mumbai, May 2020. [Online]. Available: www.ijert.org
- [31] R. Khan, D. S. Nagsingh, R. V. Nirav, S. U. Mohammad Rizwan, S. Mangesh, and S. Professor, “Kinetic Energy Recovery System in Two Wheeler Motorcycle,” 2016. [Online]. Available: <http://www.epa.gov/otaq/technology/research/research>
- [32] C. Armenta-Déu and H. Cortés, “Analysis of Kinetic Energy Recovery Systems in Electric Vehicles,” *Vehicles*, vol. 5, no. 2, pp. 387–403, Jun. 2023, doi: 10.3390/vehicles5020022.
- [33] S. Zishan *et al.*, “Comprehensive Analysis of Kinetic Energy Recovery Systems for Efficient Energy Harnessing from Unnaturally Generated Wind Sources,” *Sustainability (Switzerland)*, vol. 15, no. 21, Nov. 2023, doi: 10.3390/su152115345.