

PEMANFAATAN HUKUM FARADAY UNTUK PEMBANGKITAN LISTRIK PADA SISTEM SUSPensi KENDARAAN

Affan Nabihan Farzan¹, Aditya Seto Nugroho², Mohammad Ikhsan Ramadhan³, Dimas Bagja Islami Sundana⁴, Musa Barich Arbiansyah⁵, Achmad Rabbany Arsy Winata⁶, Nanda Irawan⁷

SMA Sekolah Alam Insan Mulia^{1,2,3,4,5,6,7}

e-mail: affannabihan@saim.sch.id¹, aditya.seto@saim.sch.id²,
mohammad.ikhsan@saim.sch.id³, dimasbagja@saim.sch.id⁴, musa.barich@saim.sch.id⁵,
achmadrabbany@saim.sch.id⁶, nanda.iriawan.ramadhan@saim.sch.id⁷

Diterima: 21/1/2026; Direvisi: 24/1/2026; Diterbitkan: 28/1/2026

ABSTRAK

Telah dilakukan penelitian mengenai pemanfaatan Hukum gaya gerak listrik (GGL) Faraday untuk mengkonversi energi kinetik akibat getaran pada suspensi kendaraan menjadi energi listrik melalui perangkat energy harvester berbasis induksi elektromagnetik. Perangkat ini dipasang secara eksternal pada komponen suspensi, seperti *shock breaker*, sehingga gerakan naik-turun suspensi dapat dimanfaatkan tanpa mengubah karakteristik atau kinerja sistem suspensi asli. Penelitian ini bertujuan mengidentifikasi karakteristik keluaran listrik yang dihasilkan serta mengevaluasi potensi mekanisme induksi terhadap getaran suspensi kendaraan. Perangkat prototipe ini dirancang dengan konfigurasi magnet permanen dan kumparan yang bergerak relatif mengikuti dinamika suspensi, kemudian diuji menggunakan variasi amplitudo dan frekuensi getaran. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa perangkat menghasilkan sinyal listrik dengan tegangan pada kisaran 0,06–0,11 V dan arus pada kisaran 0,22–0,33 mikroampere. Nilai keluaran tersebut masih berada di bawah batas minimal untuk menyalakan beban sederhana, seperti LED, maupun untuk terdeteksi oleh regulator pengisian. Analisis menunjukkan bahwa rendahnya keluaran dipengaruhi oleh kecilnya kekuatan medan magnet, kurangnya jumlah lilitan kumparan, redaman mekanis sistem, dan terbatasnya amplitudo getaran suspensi pada kondisi pengujian. Dari hasil penelitian yang telah dilakukan, maka dapat disimpulkan bahwa energi listrik dapat dihasilkan dari gerakan vertikal suspensi kendaraan. Besar kecilnya energi listrik yang dihasilkan dipengaruhi oleh beberapa faktor, diantaranya adalah besarnya fluks magnet, nilai tegangan dan arus AC yang masih relatif kecil, ketiadaan komponen penyimpan energi seperti kapasitor atau superkapasitor, serta batas minimum tegangan kerja pada regulator.

Kata Kunci: *Hukum Faraday, induksi elektromagnetik, energy harvesting, suspensi kendaraan, getaran.*

ABSTRACT

A study has been conducted on the use of Faraday's electromotive force (EMF) to convert kinetic energy due to vibrations in vehicle suspensions into electrical energy through an electromagnetic induction-based Energy Harvester device. This device is mounted externally on suspension components, such as shock absorbers, so that the up-and-down movement of the suspension can be utilized without changing the characteristics or performance of the original suspension system. This study aims to identify the characteristics of the electrical output produced and emit potential induction mechanisms against vehicle suspension vibrations. This prototype device is designed with a permanent magnet configuration and coils that move

relative to the dynamics of the suspension, then tested using variations in vibration amplitude and frequency. The measurement results show that the device produces an electrical signal with a voltage in the range of 0.06–0.11 V and a current in the range of 0.22–0.33 microamperes. These output values are still below the minimum limit for powering simple loads, such as LEDs, or for detection by charging regulators. Analysis shows that the low output is influenced by the small magnetic field strength, the insufficient number of coil turns, the damping of the mechanical system, and the limited amplitude of suspension vibrations under test conditions. From the results of the research that has been conducted, it can be concluded that electrical energy can be generated from the vertical movement of the vehicle suspension. The amount of electrical energy generated is influenced by several factors, including the magnitude of the magnetic flux, the relatively low AC voltage and current values, the absence of energy storage components such as capacitors or supercapacitors, and the minimum operating voltage limit of the regulator.

Keywords: *Faraday's Law, electromagnetic induction, energy harvesting, vehicle suspension, vibration.*

PENDAHULUAN

Krisis energi global saat ini telah menjadi tantangan paling krusial dalam perumusan agenda pembangunan berkelanjutan di seluruh dunia. Berdasarkan laporan terkini dari *International Energy Agency* (IEA, 2023), tercatat bahwa lebih dari 80% konsumsi energi global masih sangat bergantung pada penggunaan bahan bakar fosil yang tidak terbarukan. Pertumbuhan populasi yang pesat serta masifnya industrialisasi menjadi pemicu utama meningkatnya permintaan energi secara signifikan setiap tahunnya. Ketergantungan yang terlampau tinggi terhadap sumber energi fosil ini tidak hanya mengancam ketersediaan cadangan energi masa depan, tetapi juga memperburuk kondisi lingkungan melalui peningkatan emisi karbon dan pemanasan global (Badan Pusat Statistik [BPS], 2022). Di sisi lain, implementasi teknologi hijau yang dipadukan dengan berbagai inovasi berkelanjutan terbukti mampu menurunkan tingkat emisi pada beberapa negara anggota OECD secara cukup efektif (Baz & Zhu, 2025). Kondisi mendesak ini menuntut adanya langkah inovatif dalam penemuan sumber energi alternatif yang bersih serta mampu diintegrasikan ke dalam sistem transportasi modern yang hemat energi. Upaya pencarian solusi ramah lingkungan ini harus terus dilakukan demi keberlangsungan ekosistem global yang sehat bagi seluruh umat manusia.

Salah satu pendekatan teknologi yang sedang berkembang dengan sangat pesat saat ini adalah *energy harvesting*, yaitu sebuah proses pemanenan energi dari berbagai sumber energi skala kecil yang sebelumnya sering kali terabaikan atau tidak dimanfaatkan sama sekali. Dalam bidang teknik otomotif, sejumlah hasil penelitian terdahulu secara konsisten menunjukkan bahwa kendaraan bermotor mampu menghasilkan energi mekanis dalam jumlah yang sangat besar selama beroperasi secara aktif di jalanan, terutama melalui getaran, deformasi struktur, serta osilasi komponen mekanis (Xu et al., 2020). Sistem suspensi pada kendaraan merupakan salah satu komponen vital yang memiliki intensitas gerakan vertikal sangat tinggi saat merespons kondisi permukaan jalan. Secara konvensional, seluruh energi kinetik yang dihasilkan dari gerakan suspensi tersebut akan sepenuhnya diubah menjadi energi panas melalui mekanisme peredam hidrolik yang terpasang. Padahal, potensi energi yang terbuang secara cuma-cuma ini sebenarnya dapat dikonversi menjadi energi listrik fungsional jika diproses menggunakan integrasi teknologi pemanenan energi yang tepat dan efisien. Optimalisasi sisa tenaga mekanis ini merupakan peluang besar dalam pengembangan sistem energi terbarukan mandiri yang dapat diimplementasikan langsung.

Mekanisme konversi energi getaran dari suspensi menjadi energi listrik dapat dijelaskan secara ilmiah melalui prinsip induksi elektromagnetik yang sangat fundamental. Proses fisik ini melibatkan fenomena perubahan fluks magnet terhadap satuan waktu yang kemudian memicu timbulnya gaya gerak listrik atau GGL, sebagaimana telah dirumuskan secara akurat dalam Hukum Faraday (Faraday, 1831). Dalam teorinya, Faraday menegaskan bahwa besaran tegangan listrik yang dihasilkan dalam sebuah kumparan akan sebanding dengan laju perubahan fluks magnetik, jumlah lilitan kawat kumparan, serta kekuatan intensitas medan magnet yang tersedia. Prinsip dasar elektromagnetik ini kini menjadi basis utama bagi pengembangan berbagai macam teknologi generator linier, termasuk purwarupa *regenerative shock absorber* yang mulai banyak dikembangkan dalam industri otomotif global. Efisiensi perubahan fluks magnetik tersebut sangat dipengaruhi oleh tingkat kekasaran permukaan jalan, kecepatan laju kendaraan, nilai kekakuan suspensi, serta kemampuan redaman komponen peredam kejut itu sendiri. Analisis mendalam terhadap variabel mekanis tersebut sangat krusial guna menentukan total daya listrik yang dapat diekstraksi secara stabil dari sistem suspensi selama kendaraan sedang bergerak aktif melintasi berbagai macam medan jalan.

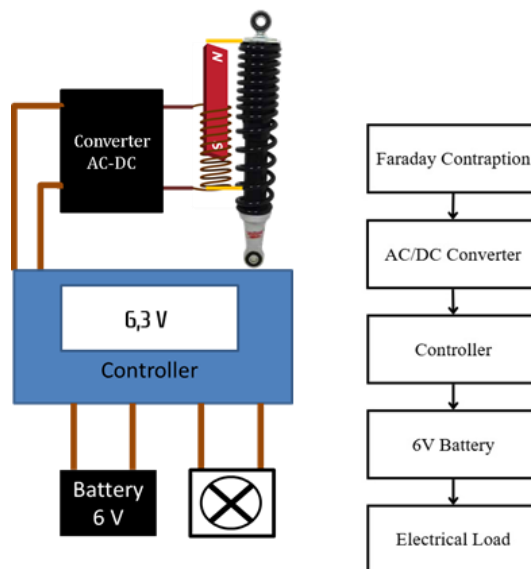
Berbagai kajian eksperimental sebelumnya menunjukkan bahwa penggunaan mekanisme magnetik pada peredam kejut mampu menghasilkan suplai daya listrik untuk kebutuhan sistem elektronik kendaraan. Studi terbaru turut mengonfirmasi bahwa karakteristik vibrasi pada suspensi memiliki rentang amplitudo serta frekuensi yang cukup memadai untuk membangkitkan energi listrik secara terus-menerus melalui generator linier berbasis kumparan magnet (Wang et al., 2021). Vibrasi kendaraan dipandang sebagai bentuk pembuangan energi kinetik yang memiliki potensi sangat besar untuk dikembangkan menjadi sumber tenaga alternatif tambahan bagi kendaraan listrik masa kini (Wang & Li, 2020). Selain itu, terdapat pula inovasi pemanenan energi angin menggunakan mekanisme *crank-slider* yang memanfaatkan prinsip induksi elektromagnetik serupa guna menghasilkan tegangan listrik yang stabil melalui pergerakan silinder translasi (Farzidayeri et al., 2023; Libao & Jenicca, 2025). Eksplorasi mengenai momen magnetik pada sistem *nanomagnet* juga memberikan wawasan baru terkait pengendalian muatan magnetik dalam struktur yang kompleks (Hurben et al., 2025). Seluruh temuan ilmiah ini membuka peluang lebar bagi integrasi sistem pemanen energi mandiri yang lebih ramah lingkungan dan kompatibel dengan desain kendaraan yang ada.

Meskipun telah banyak dikembangkan, mayoritas penelitian terdahulu masih cenderung berfokus pada analisis simulasi numerik atau penggunaan komponen industri yang sangat kompleks, sehingga evaluasi eksperimental dengan desain sistem yang fungsional masih sangat terbatas. Hingga saat ini, belum banyak kajian yang secara spesifik menguji pemanfaatan Hukum Faraday untuk mengubah gerakan osilasi vertikal suspensi menjadi energi listrik yang siap digunakan kembali secara efisien. Berangkat dari kesenjangan tersebut, penelitian ini bertujuan mengembangkan sistem pemanen energi berbasis induksi elektromagnetik yang diintegrasikan langsung ke dalam mekanisme peredam kejut kendaraan bermotor. Tujuan utama studi ini adalah untuk mengevaluasi sejauh mana potensi riil pemanfaatan gerakan osilasi suspensi sebagai sumber tenaga listrik alternatif melalui pengujian fisik yang akurat. Selain itu, penelitian ini juga akan menganalisis berbagai macam faktor teknis yang memengaruhi performa keluaran daya listrik, seperti tingkat kekuatan medan magnet, jumlah lilitan kawat kumparan, serta variasi kecepatan gerakan relatif antar komponen. Inovasi ini diharapkan mampu memberikan solusi praktis dalam upaya diversifikasi sumber energi terbarukan yang dapat diimplementasikan secara luas pada teknologi otomotif modern demi efisiensi masa depan bangsa Indonesia.

METODE PENELITIAN

Jenis dan Design Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian eksperimental laboratorium yang bertujuan menguji potensi pembangkitan listrik dari gerakan suspensi kendaraan menggunakan prinsip induksi elektromagnetik berdasarkan Hukum Faraday. Pemilihan desain eksperimental ini didasarkan pada kebutuhan untuk mengendalikan variabel-variabel pengujian agar hubungan sebab-akibat (gerakan suspensi ke pembangkitan listrik) dapat diukur secara akurat. Adapun variabel yang berpotensi untuk memberikan pengaruh pada penelitian ini adalah kekuatan medan magnet, perubahan fluks medan magnet, jumlah lilitan kumparan, redaman mekanis sistem, dan terbatasnya amplitudo getaran suspensi pada kondisi pengujian. Sebagaimana yang ditunjukkan pada gambar 1.



Gambar 1. Rancangan *prototipe* untuk *energy harvest*

Gambar 1 menunjukkan sistem pembangkit listrik pada suspensi kendaraan yang bekerja berdasarkan Hukum GGL Induksi Faraday. Ketika suspensi bergerak naik-turun akibat getaran kendaraan, magnet dan kumparan dalam “*Faraday contraption*” bergerak relatif sehingga menghasilkan tegangan listrik AC. Tegangan listrik tersebut menyebabkan adanya aliran arus listrik AC yang kemudian masuk ke AC/DC converter untuk diubah menjadi arus DC yang stabil.

Menurut (Sugiyono, 2018) penelitian eksperimen adalah metode yang digunakan untuk mencari pengaruh perlakuan tertentu terhadap yang lain dalam kondisi yang sangat terkontrol. Dalam hal ini, perlakuan yang diberikan adalah intensitas dan kecepatan gerakan mekanik pada prototipe, sementara yang diamati adalah output energi listrik yang dihasilkan. Penelitian ini dilakukan secara spesifik melalui perancangan dan pengujian prototipe generator elektromagnetik sederhana, dengan fokus utama pada pembuktian konsep dasar (*proof of concept*) bahwa Hukum GGL Induksi Faraday dapat diaplikasikan secara efektif dalam mekanisme suspensi kendaraan. Penelitian dilakukan melalui perancangan dan pengujian prototipe generator elektromagnetik sederhana untuk membuktikan konsep dasar.

Alat dan Bahan

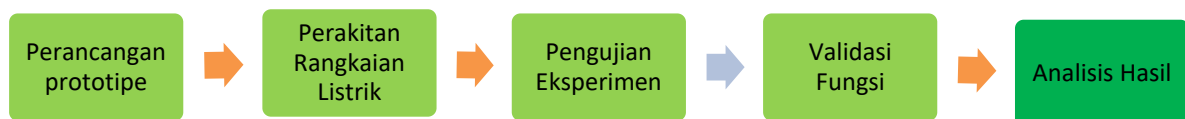
Adapun alat dan bahan yang dibutuhkan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Kumparan tembaga (250 lilitan)
2. Magnet batang permanen

3. Shock absorber sebagai sumber suspensi
4. Konverter arus listrik AC–DC
5. Modul regulator arus-tegangan (controller)
6. Baterai isi ulang 6V
7. Lampu indikator
8. Kabel listrik dan kabel tis
9. Kawat timah dan solder
10. Multimeter (voltmeter dan amperemeter)
11. Dudukan mekanik untuk prototipe

Prosedur Penelitian

Penelitian ini dilakukan melalui lima tahapan diantaranya adalah perancangan prototipe, perakitan rangkaian listrik, pengujian eksperimen, validasi fungsi, dan analisis hasil sebagaimana yang dapat dijelaskan pada gambar 2.



Gambar 2. Langkah Penelitian

Berdasarkan diagram alir pada gambar 1, penelitian dimulai dengan perancangan prototipe generator elektromagnetik, di mana sebuah magnet batang permanen diposisikan di dalam sebuah kumparan tembaga. Magnet dirancang untuk bergerak secara vertikal mengikuti gerakan suspensi kendaraan. Setelah perancangan, dilakukan perakitan rangkaian listrik yang berfungsi mengalirkan arus induksi dari kumparan menuju *converter* AC–DC, kemudian ke *controller*, dan diteruskan ke baterai 6V serta lampu indikator sebagai beban akhir. Selanjutnya adalah pengujian eksperimen yang dilaksanakan dengan menggerakkan suspensi secara manual, menyerupai gerakan vertikal kendaraan di jalan bergelombang. Selama pengujian, tegangan (V) dan arus (μ A) yang dihasilkan dari pengukuran multimeter pada berbagai kecepatan dan intensitas gerakan. Output listrik diuji pada kondisi terhubung langsung ke controller dan saat tidak terhubung untuk membandingkan rugi daya (*power loss*). Efektivitas pengisian daya ke baterai 6 V dianalisis dari respons indikator controller. Kemudian, validasi fungsi dilakukan melalui pengujian berulang untuk memastikan konsistensi data, sekaligus mencatat kendala teknis seperti ketidakstabilan tegangan, pengaruh konverter, dan degradasi kekuatan magnet. Yang terakhir adalah analisis hasil di mana nilai tegangan dan arus yang dihasilkan dianalisis untuk menentukan efektivitas sistem dalam memproduksi energi listrik. Selain itu, dilakukan analisis mendalam terhadap faktor-faktor pembatas seperti kekuatan magnet, jumlah lilitan kumparan, dan efektivitas konversi daya. Semua temuan ini kemudian digunakan untuk menilai kelayakan teknis dan kemungkinan pengembangan sistem pembangkit listrik suspensi lebih lanjut.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Pengujian Ekseperimen Prototipe

Hasil pengujian eksperimental pada prototipe generator elektromagnetik suspensi berhasil menghasilkan arus induksi, namun dengan output yang relatif kecil. Hasil pengukuran tersebut dilakukan dengan kecepatan yang berbeda pada jumlah lilitan kumparan yang sama. Hanya saja, kecepatan mekanik magnet secara berulang masih belum stabil karena menggunakan

gerakan maju mundur tangan. Namun secara kualitatif, dapat dipastikan bahwa semakin lambat gerakan maju mundur tangan, semakin kecil nilai tegangan listrik yang dihasilkan. Sebaliknya, semakin cepat gerakan maju mundur tangan untuk menggerakkan magnet terhadap kumparan, semakin besar nilai tegangan listrik yang dihasilkan.

Saat diukur dengan menggunakan multimeter, hambatan kabel dan perangkat lainnya sebesar 1,3 ohm. Perlu diketahui bahwa hambatan ini merupakan hambatan pada sistem sebelum sampai pada *converter*. Tabel 3.2 menunjukkan nilai daya yang dihasilkan dari uji coba yang dilakukan. Besaran nilai I, V, dan W didapatkan dengan melakukan perhitungan Hukum Ohm yang dapat dijelaskan seperti pada persamaan 3.1

$$V = I \cdot R \quad (3.1)$$

Tabel 1. Data tegangan, arus, hambatan dan daya listrik yang dihasilkan oleh prototipe

No.	Tegangan (V)	Arus (A)	Hambatan (Ohm)	Daya (W)
1.	0,06	0,046	1,3	0,003
2.	0,08	0,062	1,3	0,005
3.	0,11	0,085	1,3	0,009
4.	0,286	0,220	1,3	0,063
6.	0,338	0,260	1,3	0,088
7.	0,429	0,330	1,3	0,142

Data yang disajikan pada tabel 1 menunjukkan bahwa pengujian eksperimental pada prototipe generator elektromagnetik suspensi berhasil menghasilkan tegangan GGL induksi, namun dengan output yang cukup kecil. Tegangan yang dihasilkan tergolong kecil, di bawah 1 V.

Analisis Faktor-faktor yang Memengaruhi Besarnya Energi Listrik yang Dihasilkan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, didapatkan bahwa muncul tegangan listrik. Sebagaimana hukum gaya gerak listrik (GGL) induksi Faraday, adanya perubahan fluks magnetik dalam kumparan dapat menghasilkan tegangan listrik, penelitian ini memiliki hasil yang selaras dengan prinsip tersebut. Namun demikian, saat dilakukan pengecekan melalui regulator rangkaian, aliran listrik yang muncul akibat tegangan tersebut tidak terbaca. Hal ini tidak lantas menunjukkan bahwa hukum GGL induksi Faraday tidak dapat diaplikasikan dalam penelitian. Ada beberapa hal yang perlu dibahas lebih lanjut dalam bab ini.

Pertama, perubahan fluks magnet per satuan waktu sangat kecil. Hal ini dikarenakan kecepatan naik-turun akibat suspensi yang diredam oleh sistemnya sendiri. Tidak hanya itu, pergerakan magnet yang terbatas menjadi salah satu faktor yang memengaruhi besarnya tegangan GGL listrik yang dihasilkan. Dengan demikian, kombinasi gerak lambat dan amplitudo kecil membuat perubahan fluks magnet sangat kecil sehingga GGL pun bernilai kecil. Sebagaimana yang dirumuskan oleh Faraday, bahwa perubahan fluks magnet memiliki pengaruh yang signifikan terhadap tegangan listrik internal yang dihasilkan.

Kedua, senada dengan sebab pertama di atas, karena tegangan dan arus AC yang dihasilkan sangat kecil, konversi arus menjadi arus searah secara langsung melalui bridge dan dioda yang ada di dalam current converter AC-DC kehilangan banyak tegangan (drop) dan hampir tidak ada energi tersisa. Ketiga, tidak adanya penyimpan energi kecil (supercap/kapasitor) sebelum regulator untuk mengumpulkan pulsa energi. Hal ini dikarenakan regulator pada umumnya memiliki ambang input tertentu agar dapat bekerja secara optimal. Banyak regulator yang tidak dapat bekerja dari sumber ultra-low voltage tanpa ada boost/PMIC khusus.

Pada umumnya, regulator butuh minimal tegangan input sebesar 1.5 V (LDO) dan 3.3–5 V (buck konvensional). Jika input dari kumparan hanya 0,06–0,22 V, maka regulator tidak aktif, semua energi “hilang” ke ground atau hanya bersilasi di rangkaian, dan tidak pernah mengisi

baterai. Regulator umum tidak dibuat untuk *energy harvesting* tegangan rendah. Tanpa adanya *power-path/charge controller*, arus bisa mengalir balik ke kumparan atau baterai, mengurangi efisiensi dan mengganggu pengukuran dan pembacaan data. Ketiga, daya yang tersedia secara fisik relatif kecil. Hal ini dikarenakan energi vibrasi dari *shock absorber* bukanlah energi besar. Konversi elektromagnetik memiliki efisiensi rendah pada skala kecil. Sedangkan, pada pemanfaatan konsep *energy harvester*, secara alami menghasilkan daya yang kecil dalam skala *mikro-miliWatt*, tegangan kecil, dan arus kecil.

Pembahasan

Analisis mendalam terhadap hasil pengujian eksperimental pada *prototype* generator elektromagnetik suspensi menunjukkan keberhasilan alat dalam menghasilkan arus induksi, meskipun *output* energi yang diperoleh masih berada pada skala yang relatif kecil. Berdasarkan data pengukuran yang tercatat pada tabel pengujian, tegangan listrik yang dihasilkan bergerak secara linier dengan kecepatan gerakan mekanik magnet, di mana rentang tegangan terendah tercatat sebesar 0,06 Volt dan nilai tertinggi mencapai 0,429 Volt. Variasi nilai ini sangat bergantung pada intensitas gerakan maju mundur yang diberikan pada kumparan, yang dalam percobaan ini masih dilakukan secara manual sehingga stabilitasnya belum optimal. Selain tegangan, parameter daya listrik yang dihasilkan juga menunjukkan angka yang minim, yakni berkisar antara 0,003 Watt hingga 0,142 Watt dengan beban hambatan sistem terukur sebesar 1,3 Ohm sebelum mencapai *converter*. Fenomena ini mengonfirmasi secara kualitatif bahwa kecepatan perubahan fluks magnetik berbanding lurus dengan besaran gaya gerak listrik yang timbul, namun keterbatasan metode penggerak manual menyebabkan fluktuasi data yang cukup signifikan dalam pengambilan sampel penelitian ini (Lee & Lee, 2020; Patero, 2023; Saodah et al., 2021).

Evaluasi terhadap fenomena kelistrikan yang terjadi selama penelitian memperlihatkan keselarasan dengan hukum induksi elektromagnetik Faraday, di mana pergerakan magnet di dalam kumparan terbukti mampu menciptakan beda potensial. Meskipun demikian, terdapat tantangan teknis yang substansial ketika aliran listrik tersebut tidak terdeteksi oleh *regulator* rangkaian pada tahap pengujian lanjutan. Kegagalan pembacaan ini bukan menandakan kegagalan prinsip fisika yang diterapkan, melainkan mengindikasikan adanya hambatan teknis pada efisiensi transfer energi. Analisis menunjukkan bahwa total hambatan sebesar 1,3 Ohm pada kabel dan perangkat pendukung memberikan kontribusi pada penurunan efisiensi sebelum arus mencapai sistem konversi. Kondisi ini menegaskan bahwa meskipun prinsip dasar pembangkitan energi telah terpenuhi, implementasi praktisnya memerlukan penyesuaian komponen yang lebih presisi. Kesenjangan antara teori pembentukan GGL induksi dan realitas pembacaan pada alat ukur menuntut adanya evaluasi mendalam terhadap kompatibilitas antar komponen elektronik yang digunakan dalam rangkaian *prototype* tersebut (Asri & Santoso, 2021; Dewi & Fikri, 2023; Ridlwan, 2022).

Faktor mekanik memainkan peran krusial dalam memengaruhi rendahnya tegangan listrik internal yang dihasilkan oleh sistem generator suspensi ini. Perubahan fluks magnet per satuan waktu dinilai sangat kecil, yang disebabkan oleh karakteristik alami sistem suspensi yang berfungsi meredam getaran. Mekanisme *shock absorber* secara inheren membatasi amplitudo gerakan magnet, sehingga kecepatan naik-turun magnet menjadi terhambat dan tidak mencapai kecepatan optimal yang dibutuhkan untuk memicu induksi elektromagnetik yang besar. Kombinasi antara gerak yang relatif lambat dan jarak tempuh magnet yang terbatas mengakibatkan laju perubahan fluks menjadi sangat rendah, yang secara langsung berdampak pada kecilnya nilai GGL induksi (Bahari et al., 2023; Hilal et al., 2021; Penagos, 2020). Hal ini menjadi paradoks dalam perancangan *energy harvesting* pada suspensi kendaraan, di mana

fungsi utama suspensi adalah meredam energi kinetik, sementara generator membutuhkan energi kinetik yang besar untuk dikonversi menjadi energi listrik. Keterbatasan mekanis ini menjadi variabel utama yang menekan efisiensi *output* daya pada sistem (Hajidavalloo et al., 2022; Shashank et al., 2021; Taghavifar, 2020).

Ditinjau dari aspek elektronika, hambatan terbesar terletak pada ketidaksesuaian spesifikasi komponen pengolahan daya dengan karakteristik energi yang dihasilkan. Tegangan *output* yang hanya berkisar antara 0,06 Volt hingga 0,22 Volt pada sebagian besar percobaan berada jauh di bawah ambang batas minimum *input* yang dibutuhkan oleh *regulator* standar. Pada umumnya, komponen seperti LDO memerlukan tegangan minimal 1,5 Volt, sedangkan *buck converter* konvensional membutuhkan 3,3 hingga 5 Volt untuk dapat beroperasi. Akibatnya, energi listrik yang dihasilkan tidak mampu mengaktifkan *regulator*, sehingga energi tersebut hilang sebagai panas atau hanya bersilasi di dalam rangkaian tanpa pernah mengisi baterai. Selain itu, proses penyearahan arus bolak-balik menjadi arus searah melalui *bridge* dan dioda pada *current converter* menyebabkan tegangan jatuh atau *voltage drop* yang signifikan. Kehilangan tegangan pada komponen dioda ini menghabiskan hampir seluruh energi yang sudah sangat kecil tersebut, menyisakan daya yang nyaris nol pada sisi *output* akhir (Anung et al., 2023; Kiswantonono, 2023; Lumentut & Shu, 2020).

Implikasi dari temuan ini menegaskan bahwa pengembangan teknologi *energy harvesting* berbasis suspensi elektromagnetik memerlukan pendekatan komponen yang spesifik untuk skala daya mikro. Ketiadaan media penyimpanan energi sementara seperti *supercapacitor* sebelum masuk ke *regulator* menyebabkan pulsa energi yang kecil dan terputus-putus gagal terakumulasi menjadi tegangan yang memadai. Sistem ini mutlak memerlukan komponen *power-path* atau *charge controller* yang didesain khusus untuk *ultra-low voltage* agar arus tidak mengalir balik ke kumparan yang justru akan mengurangi efisiensi sistem. Secara keseluruhan, penelitian ini menyimpulkan bahwa meskipun konversi energi vibrasi menjadi listrik dapat dibuktikan, efisiensinya pada skala kecil sangat rendah akibat hambatan mekanis dan *losses* pada komponen elektronik. Pemanfaatan energi dalam orde mikro-miliWatt menuntut penggunaan teknologi *boost converter* khusus yang mampu bekerja pada tegangan *input* di bawah 1 Volt untuk memastikan energi yang dipanen dapat dimanfaatkan secara nyata.

KESIMPULAN

Penelitian ini menyimpulkan bahwa mekanisme induksi elektromagnetik yang diintegrasikan pada sistem suspensi kendaraan terbukti mampu membangkitkan energi listrik dari konversi energi kinetik getaran, meskipun *output* yang dihasilkan masih dalam skala mikro. Berdasarkan pengujian eksperimental menggunakan prototipe generator linier sederhana, diperoleh data kuantitatif yang menunjukkan bahwa rentang tegangan keluaran bergerak antara 0,06 Volt hingga 0,429 Volt dengan arus induksi maksimum sebesar 0,33 ampere. Besaran daya listrik yang dihasilkan berkisar antara 0,003 Watt hingga 0,142 Watt, yang secara kualitatif berbanding lurus dengan kecepatan dan amplitudo gerakan relatif antara magnet permanen dan kumparan. Meskipun prinsip Hukum Faraday terkonfirmasi, nilai keluaran ini masih berada jauh di bawah ambang batas minimal tegangan kerja *regulator* standar (1,5–5 Volt), sehingga energi yang dihasilkan belum mampu dimanfaatkan secara efektif untuk pengisian baterai atau menyalakan beban listrik konvensional tanpa adanya komponen penyimpanan energi perantara.

Analisis mendalam terhadap faktor-faktor teknis mengungkapkan bahwa rendahnya efisiensi konversi energi disebabkan oleh kombinasi hambatan mekanis dan kerugian daya pada sistem elektronik. Keterbatasan amplitudo gerakan akibat fungsi redaman alami suspensi serta kecepatan perubahan fluks magnetik yang rendah menjadi kendala utama dalam

membangkitkan Gaya Gerak Listrik (GGL) yang besar. Selain itu, ketiadaan komponen superkapasitor sebagai penyangga energi sementara mengakibatkan pulsa listrik yang dihasilkan bersifat fluktuatif dan hilang sebagai panas atau *voltage drop* pada komponen penyearah dioda. Oleh karena itu, penelitian ini merekomendasikan penggunaan teknologi *boost converter* khusus *ultra-low voltage* serta optimalisasi desain mekanik untuk meningkatkan laju perubahan fluks magnetik, guna mentransformasi potensi energi getaran yang terbuang ini menjadi sumber daya alternatif yang fungsional dan efisien bagi kendaraan listrik masa depan.

DAFTAR PUSTAKA

- Anung, A., Ramady, G. D., Sungkar, M. S., Nuhgraha, Y. A., & Wirjawan, A. (2023). Reduksi rugi-rugi pensaklaran pada konverter DC-DC zeta dengan teknik zero voltage transition. *Power Elektronik: Jurnal Orang Elektro*, 12(1), 49–56. <https://doi.org/10.30591/polektro.v12i1.4378>
- Asri, Y. N., & Santoso, A. N. E. B. (2021). Prototype pendeteksi tegangan AC dengan IC 4017. *Power Elektronik: Jurnal Orang Elektro*, 10(1), 1–5. <https://doi.org/10.30591/polektro.v10i1.2325>
- Bahari, M. S., Firdaus, M., Mohamed, Z., & Ramli, M. H. M. (2023). Computational numerical analysis of a magnetic flux permanent magnet with different shape for the development of a hybrid generator. *Journal of Mechanical Engineering*, 20(1), 185–204. <https://doi.org/10.24191/jmeche.v20i1.21087>
- Baz, K., & Zhu, Z. (2025). Life cycle analysis of green technologies: Assessing the impact of environmental policies on carbon emissions and energy efficiency. *Geoscience Frontiers*, 16(2), 102004. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2025.102004>
- BP. (2022). *Statistical review of world energy 2022*. <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>
- Dewi, I. P., & Fikri, R. (2023). Optimalisasi keamanan rumah dengan implementasi sistem notifikasi gerbang cerdas berbasis Internet of Things (IoT). *Journal of Computer System and Informatics (JoSYC)*, 4(4), 816–825. <https://doi.org/10.47065/josyc.v4i4.4004>
- Faraday, M. (1832). Experimental researches in electricity. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 122, 125–162. <https://doi.org/10.1098/rstl.1832.0006>
- Farzidayeri, J., Taylor, R., & Bedekar, V. (2023). Design of a multicylinder crank-slider wind energy harvester utilizing Faraday's law of electromagnetic induction. *Applied Energy*, 351, 121808. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121808>
- Hajidavalloo, M. R., Cosner, J. A., Li, Z., Tai, W.-C., & Song, Z. (2022). Simultaneous suspension control and energy harvesting through novel design and control of a new nonlinear energy harvesting shock absorber. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 71(6), 6073–6088. <https://doi.org/10.1109/tvt.2022.3159734>
- Hilal, Y. N., Andromeda, T., & Handoko, S. (2021). Pengatur kecepatan prototipe mesin solenoid 4 induktor menggunakan metode kontrol frekuensi. *eLEKTRIKA*, 13(2), 59–64. <https://doi.org/10.26623/elektrika.v13i2.4258>
- Hurben, A. P., Hao, Y., & Leighton, C. (2024). Fractional magnetic charges and channeling of Faraday lines by disclinations in artificial spin ice. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 121(41), e2409027121. <https://doi.org/10.1073/pnas.2409027121>

- International Energy Agency. (2023). *World energy outlook 2023*. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>
- Kiswantono, A. (2023). Design of Atmega2560 charge controller battery using static bicycle. *JEEE-U (Journal of Electrical and Electronic Engineering-UMSIDA)*, 7(1), 79–88. <https://doi.org/10.21070/jeeeu.v7i1.1666>
- Lee, M. D., & Lee, P. S. (2020). *Design and development of a small-scale mechanical energy conversion device*. Research Square. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-71517/v1>
- Libao, J. (2025). *Induction and energy: The role of electromagnetic induction in modern technology*. SSRN. <https://doi.org/10.2139/ssrn.5256105>
- Lumentut, M. F., & Shu, Y.-C. (2020). Shunted optimal vibration energy harvesting control of discontinuous smart beams. *Composite Structures*, 242, 112126. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112126>
- Patro, J. L. (2023). Electromagnetic induction: Unraveling Faraday's laws and their applications in generators and transformers. *International Journal of Advanced Research in Science Communication and Technology*, 3(2), 814–818. <https://doi.org/10.48175/ijarsct-12376>
- Penagos, H. P. (2020). Electric power generation from a turnstile. *DYNA*, 87(215), 156–163. <https://doi.org/10.15446/dyna.v87n215.86789>
- Ridlwani, H. M. (2022). Implementasi perangkat keras sistem monitoring Internet of Things (IoT) pada pembangkit listrik tenaga mikro hidro. *Power Elektronik: Jurnal Orang Elektro*, 11(1), 57–62. <https://doi.org/10.30591/polektro.v11i1.3109>
- Saodah, S., Wiwit, I. M., Deni, A., Sodik, D., & Puguh, B. (2021). Pengaruh harmonisa penggerak kecepatan variabel terhadap kinerja motor DC fan test set. *ELKOMIKA: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik Elektronika*, 9(3), 505–519. <https://doi.org/10.26760/elkomika.v9i3.505>
- Shashank, R., Kashikar, S. S., Sriram, V. S., D'Souza, V., Srinivas, R., Ullegaddi, M. M., & Arun, R. (2021). Design and development of suspension system for power generation. *Materials Today: Proceedings*, 42, 758–763. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.164>
- Sugiyono. (2018). *Metode penelitian kualitatif: Untuk penelitian yang bersifat: Eksploratif, enterpretif, interaktif dan konstruktif*. Alfabeta. <https://books.google.co.id/books?id=GuqaDwAAQBAJ>
- Taghavifar, H. (2020). A novel energy harvesting approach for hybrid electromagnetic-based suspension system of off-road vehicles considering terrain deformability. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 146, 106988. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.106988>
- Wang, Q., & Li, S. (2020). Vehicle vibration energy harvesting systems. *Applied Energy*, 267, 114923. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114923>
- Wang, Z., Wang, J., Zhang, G., & Wang, Z. (2021). Evaluation of agricultural extension service for sustainable agricultural development using a hybrid entropy and TOPSIS method. *Sustainability*, 13(1), 347. <https://doi.org/10.3390/su13010347>
- Xu, H., Ma, J., Tan, P., Chen, B., Wu, Z., Zhang, Y., Wang, H., Xuan, J., & Ni, M. (2020). Towards online optimisation of solid oxide fuel cell performance: Combining deep learning with multi-physics simulation. *Energy and AI*, 1, 100003. <https://doi.org/10.1016/j.egyai.2020.100003>