

Analisis Pengaruh Gap Medan Magnet dengan Variasi Diameter Penampang dan Lilitan Kumputan Terhadap Performa yang dihasilkan pada *Energy Harvesting* Linier Elektromagnetik

Ahmad Faishal Mufadhol^{1*}, Budhi Muliawan Suyitno¹, Dwi Rahmalina¹

¹Teknik Mesin, Universitas Pancasila, Jakarta, Indonesia

*Email Corresponding Author: ahmad.faishalm25@gmail.com

ABSTRAK

Perkembangan teknologi *Energy Harvesting* kini kian berkembang pesat dengan beragam variasi mekanisme, salah satunya adalah linier elektromagnetik *generator*. Mekanisme ini memiliki keunggulan dari segi mekanisme yang sederhana, namun secara desain masih perlu dikaji lebih lanjut dikarenakan banyak parameter yang mempengaruhi energi listrik yang dihasilkan. Secara teoritis linier elektromagnetik *generator* dipengaruhi oleh medan magnet, jumlah lilitan kumparan dan penampang kumparan yang dilewati medan magnet. Dalam studi ini uji eksperimental akan dilakukan untuk mengetahui seberapa besar pengaruh medan magnet melalui gap magnet ke variasi jumlah kumparan dan luas penampang kawat lilitan. Magnet yang digunakan adalah *neodymium* N40 dengan variasi jarak 28,5mm dan 30,5mm, lalu variasi kumparan 50 lilitan dan 100 lilitan dengan variasi diameter penampang 0,3mm, 0,5mm, dan 0,7mm. Pengujian menemukan performa tertinggi berdasarkan tegangan tercapai di 423,63mV dengan variabel jarak medan magnet 28.5mm, diameter penampang 0,3mm, dan jumlah lilitan kumparan 100 lilitan. Namun berdasarkan perhitungan daya, performa tertinggi tercapai di 0,127Watt dengan variabel jarak medan magnet 28.5mm, diameter penampang 0,7mm, dan jumlah lilitan kumparan 100 lilitan. Setiap variabel memiliki peran penting dalam meningkatkan performa linier elektromagnetik.

Kata kunci: Energy Harvesting, Linier elektromagnetik *Energy Harvester*, Medan Magnet

ABSTRACT

The development of *Energy Harvesting* technology is now growing rapidly with a variety of mechanisms, one of which is the linear electromagnetic generator. This mechanism has the advantage of being a simple mechanism, but the design still needs to be studied further because there are many parameters that influence the electrical energy produced. Theoretically, linear electromagnetic generators are influenced by the magnetic field, the number of coils turned and the cross-section of the coil through which the magnetic field passes. In this study, experimental tests will be carried out to determine how much influence the magnetic field through the magnetic gap has on variations in the number of coils and the cross-sectional area of the winding wire. The magnet used is *neodymium* N40 with distance variations of 28.5mm and 30.5mm, then coil variations of 50 turns and 100 turns with variations in cross-sectional diameters of 0.3mm, 0.5mm and 0.7mm. Tests found that the highest performance based on the voltage was achieved at 423.63mV with a variable magnetic field distance of 28.5mm, cross-sectional diameter of 0.3mm, and number of coils turns of 100 turns. However, based on power calculations, the highest performance was achieved at 0.127Watt with a variable magnetic field distance of 28.5mm, cross-sectional diameter of 0.7mm, and number of coils turns of 100 turns. Each variable has an important role in increasing linear electromagnetic performance.

Keywords: Energy Harvesting, Linear Electromagnetic Generator, Magnetic Field

PENDAHULUAN

Perkembangan penelitian teknologi *Energy Harvesting* telah berkembang pesat dengan bermacam penerapan yang memperluas pemanfaatan pada teknologi nirkabel. Teknologi ini menangkap sejumlah kecil energi yang akan hilang dalam bentuk panas, cahaya, suara, getaran, atau gerakan [1]. Perkembangan teknologi ini dapat di aplikasikan dalam menghasilkan energi

secara mandiri dengan memanfaatkan gerakan, termal atau biokimia. Bahkan dalam jangka panjang, sistem *nano* yang terintegrasi penuh dapat memungkinkan segala macam aplikasi yang belum terpikirkan [2]. Salah satu pemanfaatan teknologi *Energy Harvesting* yang sangat efektif adalah penerapan teknologi ini pada kendaraan listrik (*Electric Vehicle*) dengan memanfaatkan energi getaran terbuang pada suspensi kendaraan, sehingga energi getaran diubah menjadi energi

listrik yang dapat langsung dimanfaatkan untuk meningkatkan efisiensi kendaraan listrik [3]. Banyak penelitian yang mengkaji desain mekanisme *vibration Energy Harvesting*, setidaknya ada tiga jenis mekanisme berdasarkan karakteristiknya, yaitu *piezoelectric energy harvesters*, *electromagnetic energy harvesters*, dan *electrostatic energy harvesters* [4]. Studi mengenai fenomena resonansi pada transformator dengan melakukan penelitian linier *elektromagnetik energy harvester* yang di desain untuk menghasilkan listrik sebagai pengganti baterai pada sistem pemantauan beban nirkabel untuk transformator [5]. Studi mengenai pengembangan *low-cost electromagnetic energy harvester* yang dapat menghasilkan *micro-energy* sebagai alternatif baterai dengan kemampuan efektivitas 55,5% dimana menghasilkan 500Ω beban dengan 422μW [6].

Teknologi linier elektromagnetik *energy harvesters* menggunakan prinsip elektromagnetik dalam memanfaatkan energi kinetic (vibrasi) untuk menghasilkan listrik. Gradien hubungan fluks sebagian besar tergantung pada magnet yang digunakan untuk menghasilkan medan, susunan magnet ini, dan luas serta jumlah lilitan untuk kumparan [7]. Berdasarkan uraian penelitian sebelumnya, frekuensi vertikal yang besar sangat penting, hal ini juga berhubungan dengan fluks magnet dan jumlah lilitan kumparan dalam menghasilkan energi listrik. Studi eksperimental dengan melakukan pengujian terhadap desain suspensi untuk menghasilkan energi dimana dilakukan pembuatan prototipe suspensi pada kendaraan roda dua dengan hasil yang terbaca pada multimeter berada pada *range* 100 mV sampai 350 mV, pada peningkatan kecepatan tercapai 700 mV [8]. Penelitian mengenai pengaruh variasi diameter dan jumlah lilitan tembaga terhadap tegangan listrik yang dihasilkan pada linier elektromagnetik menemukan bahwa besar diameter penampang kawat dan banyak lilitan kumparan mempengaruhi energi listrik yang dihasilkan, dimana dengan memperbesar diameter penampang dan memperbanyak lilitan akan mempengaruhi banyaknya energi listrik [9].

Pada Eksperimen penelitian mengenai *rotary Energy Harvesting* dengan konfigurasi *rack-pinion* telah dilakukan dengan memanfaatkan *dynamic force* pada langkah manusia saat berjalan. Gerakan berjalan manusia menghasilkan *Vertical Ground Reaction Force* (VGRF) pada permukaan jalanan. Gaya tersebut dapat dimanfaatkan untuk membentuk energi potensial dengan menerapkan sistem *spring-damper* [10]. Dan juga dengan konfigurasi *Ball-Screw Mechanism* telah

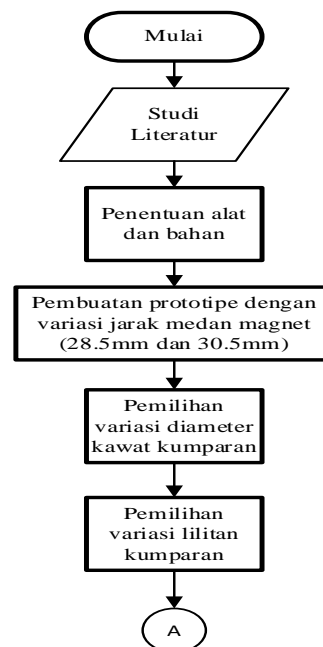
dilakukan dengan memanfaatkan energi yang hilang dari peredam regeneratif yang diubah menjadi gerakan memutar generator [11], sebagai mekanisme konversi gerakan linier menjadi rotasi telah dilakukan dengan memanfaatkan energi yang hilang dari peredam regeneratif [12].

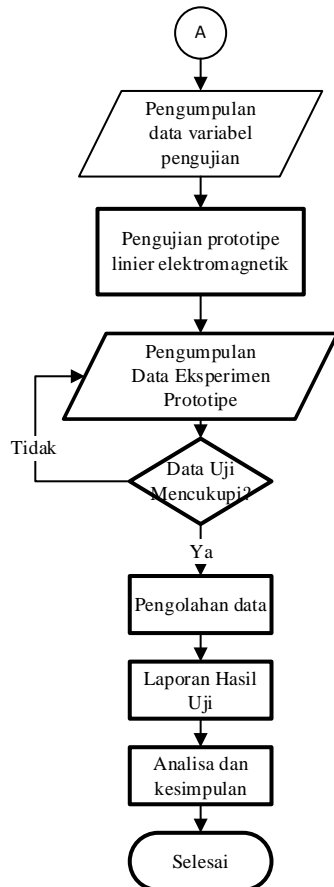
Berdasarkan pembahasan mengenai penelitian terdahulu, mekanisme konversi energi yang dipilih pada penelitian ini adalah linier elektromagnetik dengan aspek-aspek yang dikaji:

- Bagaimana pengaruh gap medan magnet dengan variasi luas diameter dan jumlah lilitan kumparan terhadap performa dari tegangan listrik yang di hasilkan?
- Bagaimana pengaruh gap medan magnet dengan variasi luas diameter dan jumlah lilitan kumparan terhadap performa daya yang di hasilkan?
- Berdasarkan performa tertinggi yang dapat dicapai, bagaimana konsep aplikatif yang dapat diterapkan?

Penelitian ini bertujuan menganalisis linier elektromagnetik dengan menguji 3 variabel (gap medan magnet, diameter penampang kawat, dan jumlah lilitan kawat kumparan) untuk menemukan performa tertinggi berdasarkan tegangan dan daya yang dapat dicapai dari 3 variabel tersebut.

METODE PENELITIAN





Gambar 1 Diagram Alur Penelitian

Pengolahan Data Dan Kesimpulan Laporan Hasil Uji

1. Permodelan matematis

Berdasarkan variabel yang diuji pada penelitian ini dimana berkaitan dengan Persamaan dasar elektromagnetik untuk menghitung fluks magnetik yang terhubung dengan kumparan dan tegangan yang diinduksi pada kumparan tersebut. Untuk menyesuaikan Persamaan dasar elektromagnetik dengan nilai variabel yang diuji, permodelan matematis ditulis pada Persamaan berikut:

$$emf = N \cdot A \cdot \frac{dB}{dt}$$

Dimana:

emf = Electromotive Force (Tegangan induksi)

N = Banyak lilitan kumparan

A = Luas penampang kumparan

B = Medan magnet

2. Pengolahan data

Proses pengujian prototipe linier elektromagnetik dengan variasi dari masing-masing variabel uji akan menghasilkan tegangan induksi yang bervariasi. Data-data yang terkumpul

akan disusun dan diolah agar dapat menghasilkan kesimpulan yang kuat. Pendekatan model melalui Persamaan matematis juga akan dibentuk dengan bantuan software minitab.

3. Laporan hasil uji

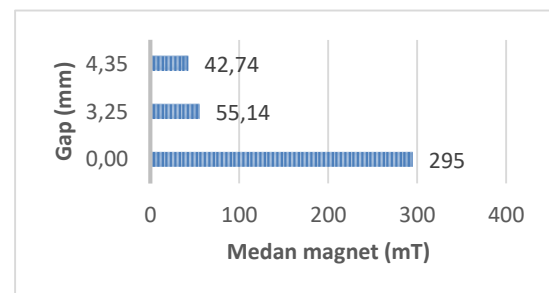
Laporan hasil pengujian akan menampilkan grafik yang memperjelas perbandingan setiap variabel terhadap tegangan induksi yang dihasilkan. Hasil pengolahan data untuk menghasilkan pendekatan model Persamaan matematis akan dilaporkan.

4. Analisa dan kesimpulan

Melalui hasil pengolahan data dan laporan hasil pengujian, fenomena yang terjadi pada penelitian akan dikaji melalui analisa dan menghasilkan kesimpulan yang kredibel. Analisa dari fenomena yang terjadi akan dijelaskan pada pembahasan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

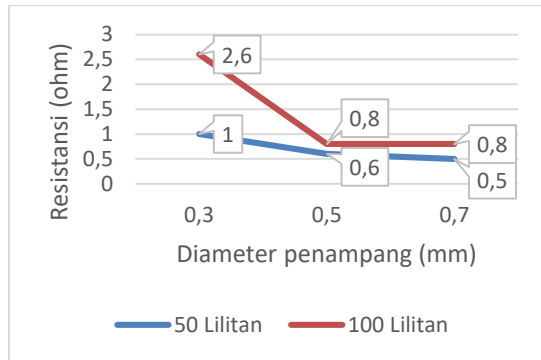
Hasil Pengujian Medan Magnet



Gambar 2 Grafik Perbandingan Variasi Gap Terhadap Medan Magnet

Terdapat selisih nilai medan magnet yang cukup jauh jika dibandingkan dengan antar masing-masing variasi gap. Sehingga dapat jarak pembacaan terhadap sumber medan magnet sangat mempengaruhi nilai medan magnet yang dihasilkan.

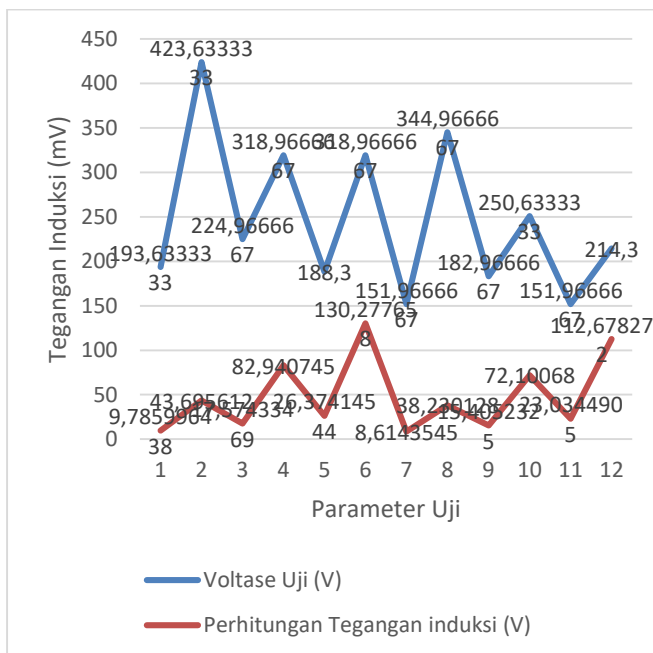
Hasil Pengujian Kawat Kumparan



Gambar 3 Perbandingan Resistansi Kawat Kumparan

Diameter penampang dan jumlah lilitan kumparan berpengaruh pada resistansi dimana semakin panjang kawat kumparan maka akan semakin besar resistansinya, dan semakin besar diameter penampang kawat maka akan semakin kecil resistansinya.

Analisis Perhitungan Teoritis dengan Uji Eksperimental Terhadap Tegangan Induksi

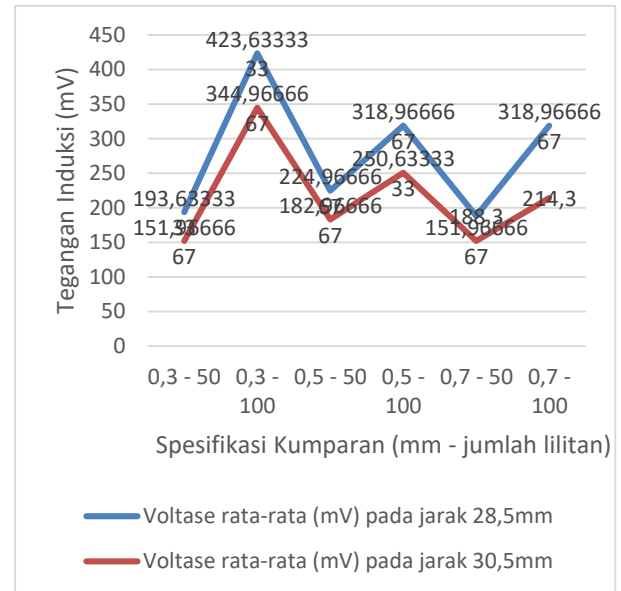


Gambar 4 Perbandingan Nilai Perhitungan Teoritis Tegangan Induksi Terhadap Pengujian

Pada Gambar 4 ditemukan selisih nilai tegangan induksi yang sangat signifikan dan perbedaan yang sangat berlawanan pada perbandingan tegangan induksi yang dihasilkan antara pengujian dan perhitungan tegangan induksi secara teoritis. Pola yang ditunjukkan pada Gambar 4 sesuai dengan hukum faraday dimana nilai medan magnet, jumlah lilitan kumparan, dan luas penampang

lilitan kumparan berbanding lurus dengan nilai tegangan induksi yang dihasilkan, sehingga semakin banyak nilai dari masing-masing parameter tersebut akan meningkatkan nilai tegangan induksi yang dihasilkan.

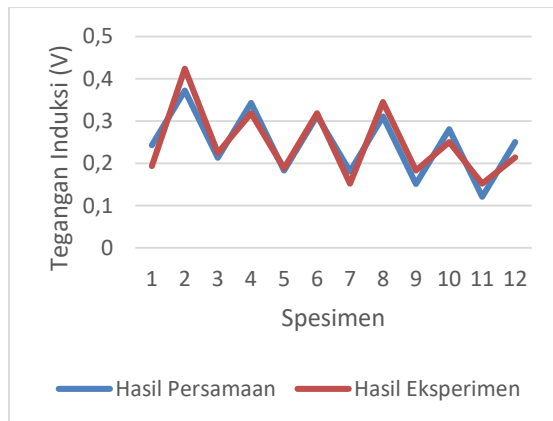
Analisis Pengaruh Variabel Uji Terhadap Tegangan Listrik



Gambar 5 Pengaruh Gap Medan Magnet Terhadap Variasi Kumparan

Pengujian terhadap masing-masing variabel terkait menunjukkan gap medan magnet sangat berpengaruh pada tegangan listrik yang dihasilkan. Selain itu, diameter penampang kawat dan jumlah lilitan kawat kumparan juga mempengaruhi tegangan listrik yang dihasilkan. Sehingga untuk memaksimalkan hasil tegangan listrik, perlu dirancang desain linier elektromagnetik yang bisa meminimalisir gap medan magnet dengan kumparan, serta memperbesar diameter penampang dan memperbanyak lilitan kumparan. Sesuai dengan grafik pada Gambar 5, kondisi variabel gap medan magnet 28,5mm atau setara dengan 3,25mm, dengan diameter penampang kawat kumparan 0,3mm dan jumlah lilitan 100 dapat menghasilkan tegangan tertinggi yaitu 423,6mV. Dilihat dari selisih tegangan yang dihasilkan berdasarkan perbandingan gap medan magnet, pada variasi kumparan yang sama terdapat selisih sekitar 40mV sampai 80mV. Maka, gap medan magnet memiliki peran penting pada prinsip kerja linier elektromagnetik.

Pendekatan Model Melalui Persamaan Matematis



Gambar 6 Perbandingan Nilai Permodelan Matematis dan Hasil Pengujian

Analisa varian (ANOVA) mengkonfirmasi sebagian besar varian, dimana "Medan Magnet" dan "Lilitan Kumputan" secara statistik mempunyai pengaruh yang signifikan terhadap "Tegangan Induksi." "Diameter Penampang" mungkin juga berpengaruh, namun penyelidikan lebih lanjut mungkin diperlukan.

Konsep Penerapan Linier Elektromagnetik Secara Teoritis

Linier elektromagnetik secara umum bisa diaplikasikan pada suspensi kendaraan [11], [13], [14], [15], direl kereta, dan struktur yang memungkinkan terjadi getaran [4]. Berdasarkan data pengujian, hasil maksimal yang didapatkan adalah 318mV (0,318V) dengan jenis tegangan AC pada variabel gap medan magnet sejarak 3,25mm (diameter lilitan kumparan 28.5mm), diameter kawat kumparan sebesar 0,5mm, dan jumlah lilitan sebanyak 100 lilitan. Berdasarkan data resistansi kawat kumparan, diameter lilitan kumparan 28,5mm dengan diameter kawat kumparan 0,5mm dengan panjang kawat 10,2m adalah 0,8 Ω . Berdasarkan tegangan induksi yang didapatkan melalui eksperimen dan resistansi kumparan, maka dengan Persamaan hukum ohm [16] didapatkan arus listrik sebesar 0,398A. Melalui perhitungan daya listrik [17] yang didapatkan dari satu linier elektromagnetik adalah sebesar 0,127Watt.

Namun masalah yang ditemui adalah voltase yang dihasilkan adalah 1VAC. Hal ini tidak memungkinkan untuk digunakan ke pengisian energy storage karena umumnya energy storage memiliki tegangan yang dihasilkan lebih dari 1V dimana beda potensial menyebabkan linier elektromagnetik tidak dapat mengisi ke energy storage, sehingga perlu lebih dari 1 perangkat

linier elektromagnetik dengan rangkaian paralel untuk masing-masing perangkat.

Pada rangkaian tersebut, listrik AC yang dihasilkan oleh linier elektromagnetik akan melewati *full bridge rectifier* agar mengubah tegangan AC menjadi DC namun voltase dan arus listriknya masih sama dari sumbernya. Setelah melewati *full bridge rectifier*, tegangan DC di rangkai secara paralel sehingga tegangan akan tetap sama, namun arus listrik akan terakumulasi. Rangkain paralel tersebut akan masuk ke *DC to DC Step Up Converter* untuk dinaikan tegangan listriknya dan diturunkan arus listriknya, tujuannya agar terdapat beda potensial ke baterai. Terakhir, listrik yang dihasilkan *DC to DC Step Up Converter* akan di alirkan ke *Battery Charging Module* yang berfungsi sebagai regulator pengisian baterai sehingga dapat melakukan pengisian ke *energy storage*.

Tabel 1 Konversi energi dari 12 perangkat linier elektromagnetik secara paralel

Urutan	Proses	Spesifikasi	Nilai	Satuan
1	12 perangkat Linier elektromagnetik dan <i>Full Bridge Rectifier</i> dirangkai paralel	Tegangan	0,318	VDC
		Arus listrik	4,776	A
		Daya	1,518	Watt
2	<i>DC to DC Step Up Converter</i> untuk menaikan 1,01 VDC ke 13,5 VDC	Tegangan	13,5	VDC
		Arus listrik	0,112	A
		Daya	1,518	Watt
3	<i>Battery Charging Module</i> ke <i>Energy Storage (battery)</i>	Tegangan	13,5	VDC
		Arus listrik	0,112	A
		Daya	1,518	Watt

Berdasarkan uraian pada Tabel 1, diketahui 12 perangkat linier elektromagnetik dengan rangkaian paralel sesuai Gambar 6 secara teori mampu menghasilkan daya sebesar 1,518watt dengan tegangan 13,5VDC dan arus listrik 0,112A. Dengan beda potensial *energy storage* yang dalam hal ini digunakan baterai 12 VDC akan dapat terisi arus listrik dari rangkaian 12 perangkat linier elektromagnetik .Pengujian ini juga sudah melakukan percobaan dengan 1 prototipe untuk menyalakan beban lampu LED dengan spesifikasi voltase di 1.8V yang hasilnya prototipe ini belum mampu untuk menyalakan beban lampu LED.

KESIMPULAN

Berdasarkan pembahasan maka dapat disimpulkan, sebagai berikut:

1. Gap medan magnet terhadap lilitan kumparan memiliki nilai medan magnet yang cenderung berkurang, dimana semakin jauh jarak medan magnet terhadap sumher magnet. Ditemukan

magnet *neodymium* N40 diukur pada gap 3,25mm adalah 55,14mT dan pada gap 4,25mm adalah 42,74mT.

2. Diameter penampang kawat dan jumlah lilitan kawat berpengaruh pada resistansi kawat. Dimana semakin besar diameter penampang kawat akan semakin kecil resistansi kawat dan semakin banyak jumlah lilitan kawat yang berimbas ke panjang kawat akan semakin besar resistansi kawat.
3. Kuat medan magnet, diameter penampang kawat, dan jumlah lilitan kawat penampang memiliki pengaruh yang signifikan terhadap tegangan listrik yang dihasilkan oleh linier elektromagnetik. Tercapai tegangan 318mV AC dengan variabel gap medan magnet 3,25mm (diameter kumparan lilitan 28,5mm), diameter penampang kawat 0,5mm, dan jumlah lilitan kumparan 100 lilitan.
4. Model Persamaan matematis untuk memperhitungkan tegangan induksi berdasarkan variabel medan magnet, diameter penampang kawat, dan jumlah lilitan telah didapatkan. Variabel jumlah lilitan dan medan magnet secara signifikan mempengaruhi tegangan induksi yang dihasilkan.
5. Secara perhitungan teoritis, 12 perangkat linier elektromagnetik yang dirangkai secara paralel bersamaan dengan *Full Bridge Rectifier* dan *DC to DC Step Up Converter* mampu menghasilkan daya 1,518Watt dengan tegangan 13,5VDC dan arus listrik 0,112A.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] H. Akinaga, "Recent advances and future prospects in *Energy Harvesting* technologies," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 59, no. 11, 2020, doi: 10.35848/1347-4065/abbfa0.
- [2] R. Bogue, "*Energy Harvesting*: A review of recent developments," *Sens. Rev.*, vol. 35, no. 1, pp. 1–5, 2015, doi: 10.1108/SR-05-2014-652.
- [3] N. Tulsian and S. Dewangan, "A discussion on *Energy Harvesting* through suspension system," *Mater. Today Proc.*, no. xxxx, pp. 52–55, 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2022.10.052.
- [4] C. Wei and X. Jing, "A comprehensive review on vibration *Energy Harvesting*: Modelling and realization," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 74, no. December 2016, pp. 1–18, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.01.073.
- [5] S. J. Cho and J. H. Kim, "Linier elektromagnetik electric generator for harvesting vibration energy at frequencies more than 50 Hz," *Adv. Mech. Eng.*, vol. 9, no. 10, pp. 1–9, 2017, doi: 10.1177/1687814017719001.
- [6] E. Bouendeu, A. Greiner, P. J. Smith, and J. G. Korvink, "A low-cost electromagnetic generator for vibration *Energy Harvesting*," *IEEE Sens. J.*, vol. 11, no. 1, pp. 107–113, 2011, doi: 10.1109/JSEN.2010.2050310.
- [7] S. Priya and D. J. Inman, *Energy Harvesting technologies*. 2009.
- [8] R. Shashank *et al.*, "Design and development of suspension system for power generation," *Mater. Today Proc.*, vol. 42, pp. 758–763, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.11.164.
- [9] S. Absorber, S. Susilo, Y. Yusuf, S. Ula, B. A. Hermawan, and M. Reza, "J-Proteksion: Jurnal Kajian Ilmiah dan Teknologi Teknik Mesin," vol. 5, no. 2, pp. 25–31, 2021.
- [10] M. Liu *et al.*, "Design , simulation and experiment of a novel high e ffi ciency *Energy Harvesting* paver," *Appl. Energy*, vol. 212, no. November 2017, pp. 966–975, 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.12.123.
- [11] G. O. H. K. I. M. Hoo, "Investigation of direct-current brushed motor based energy regenerative automotive damper Investigation of direct-current brushed motor based energy regenerative automotive damper," *a Thesis Submitt. Degree Master Eng.*, 2013.
- [12] C. Li and P. W. Tse, "Fabrication and testing of an energy-harvesting hydraulic damper," *Smart Mater. Struct.*, vol. 22, no. 6, 2013, doi: 10.1088/0964-1726/22/6/065024.
- [13] L. Zuo, B. Scully, J. Shestani, and Y. Zhou, "Design and characterization of an electromagnetic energy harvester for vehicle suspensions," *Smart Mater. Struct.*, vol. 19, no. 4, 2010, doi: 10.1088/0964-1726/19/4/045003.
- [14] M. A. A. Abdelkareem *et al.*, "Vibration *Energy Harvesting* in automotive suspension system: A detailed review," *Appl. Energy*, vol. 229, no. July, pp. 672–699, 2018, doi:

- 10.1016/j.apenergy.2018.08.030.
- [15] Jean-Pierre Joosting, "Audi suspension captures energy from road bumps," *Technology News*, 2016. <https://www.eenewseurope.com/en/audi-suspension-captures-energy-from-road-bumps/> (accessed Feb. 13, 2023).
- [16] B. Crowell, *Electricity and Magnetism*. Fullerton, California: Light and Matter, 2009.
- [17] P. A. Tipler and G. Mosca, *PHYSICS FOR SCIENTISTS AND ENGINEERS WITH MODERN PHYSICS*. New York: W. H. Freeman and Company, 2008.