

DESAIN KONSEPTUAL UNTUK SISTEM SUSPENSI REGENERATIF MELALUI PEMANFAATAN PERMANENT MAGNET LINEAR GENERATOR

Dino A. Adha *)

Program Studi Teknik Mesin, Politeknik Negeri Jakarta

Email: dinoagung@pnj.ac.id

ABSTRAK

Inovasi dan pengembangan berkelanjutan selalu dilakukan di bidang otomotif, terutama untuk kendaraan guna memaksimalkan efisiensi bahan bakar yang dikonsumsi. Inovasi ini juga digunakan untuk meningkatkan keselamatan dan kenyamanan saat mengemudi. Kondisi jalan yang tidak selalu rata menyebabkan kehilangan konsumsi bahan bakar yang terpisah karena pengemudi harus memperlambat kendaraan untuk menghindari getaran yang berlebihan. Inovasi penting yang dikembangkan adalah sistem suspensi regeneratif, yang berfungsi untuk menyerap energi getaran yang dihasilkan oleh sistem suspensi. Suspensi regeneratif mengubah energi getaran menjadi listrik melalui penempatan generator linier. Pengembangan teknologi *Permanent Magnet Linear Generator* (PMLG) masih sangat baru dan perlu dibuat dalam satu kerangka desain konseptual. Penelitian ini menggunakan kerangka desain VDI 2221 dan metode eksperimen untuk memvalidasi hasil dari desain PMLG. VDI 2221 dipilih karena sistem PMLG telah memasuki tahap pengembangan. Fokus desain adalah pada pemilihan ukuran kawat *stator*, dan ditemukan bahwa penggunaan kabel yang berbeda memberikan kinerja dengan karakteristik masing-masing. Hasil pengujian pada desain dipilih dengan variable ukuran kawat *stator* AWG 28, 27 dan 25 menunjukkan nilai konstanta *generator* tertinggi ada pada ukuran 27. Nilai konstanta *generator* menjadi indikator penting untuk mengetahui performa dari PMLG dan nilai ini dapat dijadikan sebagai rujukan awal untuk penerapan sistem PMLG pada suspensi *regenerative*.

Kata kunci: *Linear Generator, PMLG, VDI 2221, Regenerative Suspension*

ABSTRACT

Innovation and continuous development are always carried out in the automotive field, especially for vehicles to maximize the efficiency of fuel consumed. This innovation is also used to improve safety and comfort while driving. Road conditions that are not always flat cause separate fuel consumption losses because the driver must slow down the vehicle to avoid excessive vibration. An important innovation developed is the regenerative suspension system, which serves to absorb the vibrational energy produced by the suspension system. Regenerative suspension converts vibrational energy into electricity through the placement of a linear generator. The development of Permanent Magnet Linear Generator (PMLG) technology is still very new and needs to be made within a conceptual design framework. This study uses the VDI 2221 design framework and experimental methods to validate the results of the PMLG design. VDI 2221 was chosen because the PMLG system has entered the development stage. The focus of the design was on the selection of the size of the stator wire, and it was found that the use of different cables provides performance with each characteristic. The test results on the design chosen with the AWG 28, 27 and 25 stator wire size variables show the highest generator constant value is at size 27. The generator constant value is an important indicator to determine the performance of the PMLG and this value can be used as an initial reference for implementing the PMLG system on regenerative suspension.

Keywords: *Linear Generator, PMLG, VDI 2221, Regenerative Suspension*

1. PENDAHULUAN

Krisis energi menjadi motivasi penting dalam pengembangan model kendaraan dan sistem yang digunakan pada kendaraan tersebut. Terdapat banyak upaya dilakukan untuk meminimalisir energi *losses* dari kendaraan, salah satunya melalui pengembangan *regenerative suspension system*. Fungsi sistem suspensi pada

dasarnya digunakan untuk memberikan kenyamanan saat berkendara. Kondisi jalan yang beragam menyebabkan sistem suspensi bekerja secara osilasi untuk meredam getaran dari jalan, dan ini merupakan sebuah kerugian karena kecepatan mesin harus dikurangi untuk menghindari getaran berlebih yang ditimbulkan oleh jalanan ataupun *speed bumper*.

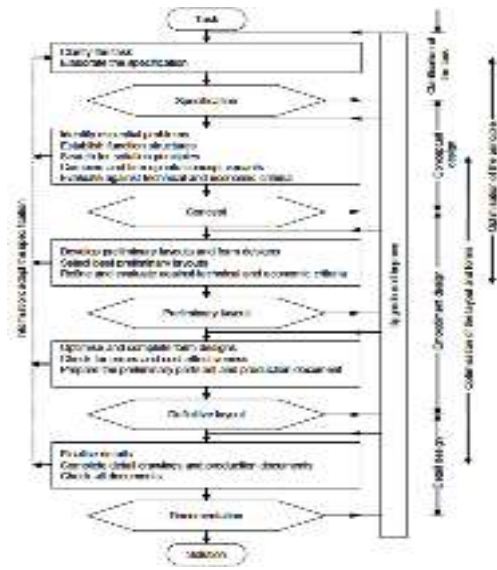
Konsep *regenerative suspension system* secara prinsip digunakan untuk memanfaatkan energi getaran yang ditimbulkan oleh sistem ketika bekerja [1-3]. Getaran ini digunakan untuk membangkitkan listrik melalui penggunaan *linear generator* [4-6]. Listrik yang dibangkitkan dapat digunakan untuk memenuhi kebutuhan listrik beberapa komponen kecil kendaraan dan juga dapat digunakan untuk kelengkapan *sensor* yang digunakan untuk mengetahui kondisi jalan [7].

Konsep *regenerative suspension system* banyak menarik perhatian peneliti untuk dikembangkan lebih lanjut pada aplikasi yang lebih luas. R. Zhang et al. [8] melakukan simulasi model mekanisme *direct* dan *indirect system* dan mendapatkan *indirect system* mampu menghasilkan *power output* yang lebih besar. A. V. Kireev et al. [9] fokus terhadap pengembangan model matematis dari sistem *regenerative suspension* dengan menggunakan *permanent magnet* untuk pembangkitan tegangan AC. W. Salman et al. [10] mengembangkan model *helical gear* yang digunakan untuk sistem *regenerative suspension* pada kendaraan listrik. Zhanwen Wang et al. [11] mengembangkan integrasi sistem mekanis dan elektrik untuk penyimpanan energi listrik yang dihasilkan dari *suspension system*. J. Zou et al. [12] fokus pada pemodelan kebiasaan berkendara untuk memaksimalkan desain dan penerapan dari sistem *regenerative suspension*.

Penerapan *permanent magnet linear generator* (PMLG) pada sistem suspensi sangat direkomendasikan karena desain yang sederhana serta densitas energi yang lebih baik [13,14]. Tantangan utama dari sistem PMLG adalah model konfigurasi magnet, model lilitan, model poros dan juga jarak *air gap* antara *stator* dan *rotor* [15-17]. Artikel ini secara khusus membahas tentang rekayasa desain dari sistem PMLG dengan fokus model konfigurasi yang digunakan dan juga tahapan desain yang dapat dijadikan sebagai referensi penting untuk pengembangan teknologi PMLG pada aplikasi *regenerative suspension system*.

2. METODE PENELITIAN

Proses rekayasa desain konsep diterapkan untuk menyusun beberapa solusi yang mungkin digunakan dan dibuat mengerucut untuk menentukan satu konsep terbaik [18,19]. Metode yang ideal digunakan untuk menjabarkan metodologi umum yang digunakan untuk mengembangkan sistem teknis untuk sistem yang sedang berkembang adalah metode VDI 2221 [20]. Gambar 1 menunjukkan alur umum dari proses desain VDI 2221.

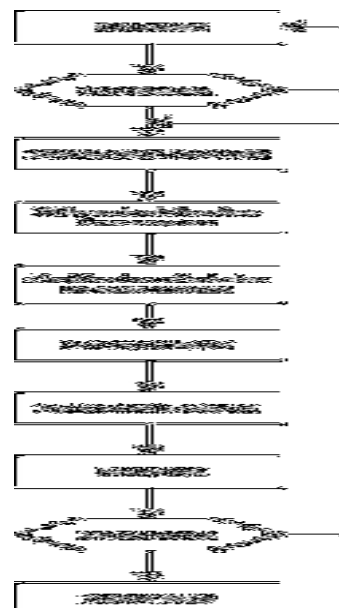


Gambar 1. Alur proses metode desain VDI 2221 [21]

Model yang dikembangkan untuk PMLG ini adalah pada tahap desain konseptual, poin penting yang harus dijabarkan:

- a. Fungsi dan struktur yang sudah ditetapkan
- b. Solusi prinsip dan struktur;
- c. Penjabaran dalam bentuk variasi yang mungkin direalisasikan.

Pada bagian ini, gambaran perancangan, model struktur dan fungsi, penelusuran prinsip solusi dan kombinasinya, dilanjutkan dengan pemilihan kombinasi yang sesuai harus dilakukan. Gambar 2 menunjukkan alur proses penentuan konseptual desain yang diperlukan untuk memperjelas alur proses yang dilakukan.



Gambar 2. Alur proses desain konseptual

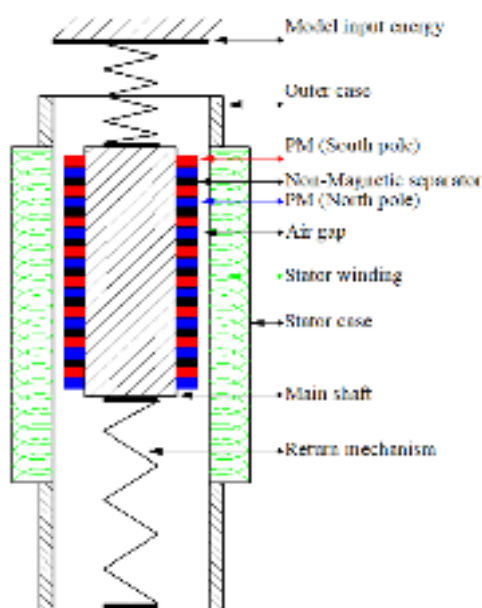
Hasil dari pemodelan pada Gambar 2 diurutkan sesuai dengan pilihan dari beberapa variabel yang ada. Mengacu kepada komponen utama dari desain PMLG [22], maka hal terpenting yang perlu dipertimbangkan dari desain PMLG adalah:

- Permanent magnet
- Lilitan stator
- Mekanisme pemalik

Tabel 1. Spesifikasi alat

No	Nama	Spesifikasi
1	Permanent magnet	NbFeB, grade N:50, $\varnothing_{out} = 25$ mm, $\varnothing_{in} = 20$ mm
2	Liner	Polytetrafluoroethylene (PTFE)
3	Push rod	Polytetrafluoroethylene (PTFE)
4	Stator coil	AWG 28, 27 and 25
5	Non-magnetic separator	Polytetrafluoroethylene (PTFE)
6	Main shaft	Polytetrafluoroethylene (PTFE)
7	Outer case	Poly Methyl methacrylate (acrylic)
8	Return spring	Stainless steel
9	Base plate	Polytetrafluoroethylene (PTFE)

Model desain berdasarkan Tabel 1. ditujukan pada Gambar 3. Terlihat pada Tabel 1 bahwa terdapat tiga ukuran kawat stator. Hal ini ditujukan untuk mengetahui model terbaik dari ukuran kawat stator yang digunakan.



Gambar 3. Desain skematik

Untuk memberikan energi masukan pada sistem, maka diperlukan peralatan yang dapat memberikan efek osilasi pada main shaft. Menyesuaikan terhadap ukuran dan pertimbangan untuk kemudahan dalam mengatur gerakan osilasi, maka perangkat motor DC yang dilengkapi mekanisme kontrol berbasis *Pulse Width Modulation* (PWM) digunakan. Motor DC yang digunakan dapat diatur kecepatannya untuk menyesuaikan terhadap *output* dari PMLG. Tabel 2. menunjukkan spesifikasi dari motor DC, PWM dan DC *supply* yang digunakan.

Tabel 2. Perlengkapan uji untuk eksperimen kerja PMLG

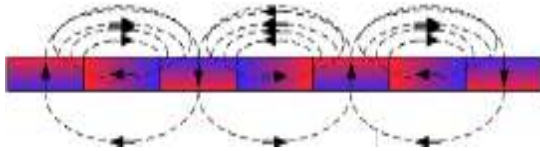
Part	Bagian	Spesifikasi
Motor	Tegangan kerja	12 – 24 VDC
	Kecepatan	6,500 RPM @12 VDC
	Arus	1,2 A @12 VDC
	Diameter shaft	5 mm
	Panjang shaft	17 mm
PWM	Tegangan masuk	9 – 50 VDC
	Tegangan keluar	12 – 40 VDC
	Rate power	0,01 – 400 W
	Frequency (max)	3 kHz
DC Supply	Tegangan input	100 – 240 VAC
	Tegangan keluar	15 VDC (konstan)
	Arus maksimal	5 Ampere

Pengaturan awal dilakukan untuk mengecek osiloskop pada tegangan masuk yang ditetapkan. Bentuk gelombang pada tegangan masuk standar dicek untuk melihat apakah hasil yang ditujukan pada layer osiloskop sama dengan tegangan yang masuk ke sistem [23]. Pengecekan awal osiloskop dilakukan pada tegangan masuk standar. Pengujian berikutnya adalah mengukur tegangan keluaran. Terdapat dua model pada pengujian ini yaitu pengujian tegangan tanpa beban (*no load test*) dan pengujian dengan beban (*load test*). Pengujian tegangan menggunakan *voltmeter* yang sudah dikalibrasi dengan baik. Pengujian awal menggunakan tegangan masuk yang sudah standar (dari baterai) untuk melihat kemampuan *voltmeter* dalam membaca tegangan masuk. Selanjutnya, *amperemeter analog* digunakan untuk membaca arus pada sistem. *Amperemeter* diuji terlebih dahulu untuk mengetahui kemampuan pembacaannya pada beban standar.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Model Susunan Magnet Permanent

Densitas *permanent magnet* tidak dapat diubah seperti *electromagnet*, sehingga hal ini perlu disiasati untuk memaksimalkan susunan magnet pada satu sisi saja. Susunan magnet yang digunakan mengacu kepada *Halbach Array* dimana *flux magnet* dapat dimaksimalkan pada satu sisi saja [24-26].



Gambar 4. Susunan magnet pada model *linear* dengan *magnet ring* [27]

Permanent magnet yang sudah disusun pada *main shaft* diperiksa menggunakan *magnetic flux viewer* untuk melihat model sebaran magnetnya. Gambar 5 menunjukkan model *flux magnet* pada *main shaft*.



Gambar 5. *Flux magnet* pada *main shaft*

Mekanisme Pegas

Pada sistem PMLG, pegas pembalik berperan untuk memberikan efek osilasi dan juga untuk mengembalikan posisi dari *main shaft* pada titik awalnya. Desain pegas pada PMLG memerlukan perhitungan yang mendalam sebelum masuk ke pembuatan pegas. Proses desain harus dimulai dengan memasukkan beberapa parameter kunci lalu berlanjut kepada perhitungan mekanis dari pegas yang akan dibuat [28].

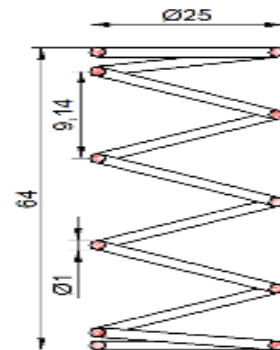
Posisi *equilibrium* (setimbang) pada *main shaft* di dalam silinder merupakan parameter awal yang diperlukan. Hal ini berkaitan dengan sistem

getaran mekanis dari desain PMLG yang dibuat [29]. Nilai k atau *spring constant* merupakan parameter penting dalam desain pegas [30]. Untuk mendapatkan nilai k pegas, maka diperlukan input dari sistem sebagai input nilai desain pegas yang digunakan. Tabel 3. menunjukkan parameter penting dari desain pegas yang direncanakan.

Tabel 3. Spesifikasi dan parameter desain pegas yang digunakan

No.	Bagian	Spesifikasi
1	Material pegas	<i>Stainless steel</i>
2	Massa <i>main shaft</i>	256.2 grams
3	Rencana osilasi	20 mm
4	Target frekuensi	50 Hz
5	Panjang bebas (L_f)	64 mm
6	Diameter pegas (D)	25 mm
7	Diameter kawat pegas (d)	1 mm
8	<i>Spring constant</i>	14 N/mm

Nilai parameter desain yang digunakan untuk pegas selanjutnya diperhitungkan secara matematis sehingga mendapatkan spesifikasi pegas seperti ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Spesifikasi pegas

Lilitan Stator

Lilitan *stator* pada sistem PMLG memiliki pengaruh yang tinggi berkaitan dengan besarnya induksi magnetik yang dihasilkan. Pendekatan lilitan *stator* pada PMLG tidak bisa disamakan dengan pendekatan pada lilitan *stator* untuk generator model konvensional [31]. Hal ini disebabkan oleh model gerak magnet pada *main shaft* yang bergerak osilasi sehingga membutuhkan pendekatan berbeda dari *stator* pada umumnya. Arah gerak osilasi membuat pergerakan *flux magnet* yang diserap oleh *stator* menjadi berbeda pada posisi yang ditentukan [32] [33].

Pendekatan persamaan untuk menentukan panjang *stator* dapat diperoleh dari langkah gerak *main shaft* yang dapat dilihat pada persamaan berikut [34]:

$$L_s = \left(\frac{L_r}{2} \times \frac{S_r}{2} \times N_p \right)^{0.765} \quad (1)$$

Panjang gerak *rotor* (L_r) atau panjang pergerakan *main shaft* sesuai dengan tabel 3 adalah 20 mm dengan jumlah *pole* yang direncanakan adalah 2 *pole* (1 phase, DC). Pada kasus PMLG, pendekatan jumlah kutub sepasang (*paired pole*) tidak dihitung sebagai dua kutub berbeda, namun dihitung sebagai satu *pole* [35] [36]. Hal ini disebabkan karena pergerakan linear dari *rotor* maka semua sisi dari *stator* menyerap medan magnet pada nilai yang sama. Hal ini dikarenakan *flux magnet* dari *rotor* pada tiap titik *stator* adalah sama dengan pertimbangan bahwa setiap sisi bagian *stator* menerima jumlah *flux* yang sama namun dengan panjang yang berbeda.

Selain panjang dari *stator*, jumlah lilitan yang digunakan pada lilitan *stator* juga tidak bisa disamakan dengan perhitungan jumlah lilitan pada generator umum. Sebagai hubungan antara panjang dari langkah *stator*, maka jumlah lilitan dapat diperoleh melalui pendekatan persamaan berikut [37]:

$$N_s = \frac{B}{\phi_{cyl}} \times n_{pm} \times N_p \times \aleph_i \quad (2)$$

Banyaknya jumlah *magnet* yang digunakan (n_{pm}) disesuaikan dengan panjang dari *main shaft* yang direncanakan, yakni 6 buah. Diameter *outer case* atau silinder (ϕ_{cyl}) adalah 30 mm. Nilai koreksi (\aleph_i) digunakan berdasarkan *grade* dari permanen magnet yang digunakan. Untuk permanen magnet dengan *grade* N50 nilai koreksi yang digunakan adalah 1,057 Tesla/m. Maka banyaknya lilitan *stator* yang digunakan adalah 301 *turns*.

Aspek terakhir yang perlu dimasukkan untuk *stator* adalah ukuran dari kawat yang digunakan. Ukuran kawat yang digunakan biasanya dijadikan variasi dari model PMLG yang dikembangkan [38]. Hal ini disebabkan masih berkembangnya model persamaan yang digunakan untuk hubungan antara *stator* dengan *rotor* pada PMLG. Menyesuaikan kepada ukuran *prototype* yang kecil, maka selanjutnya dipilih tiga ukuran kawat stator berdasarkan ukuran yang ada di pasaran. Ukuran yang dipilih adalah AWG 25, 27 dan 28.

Tes Awal

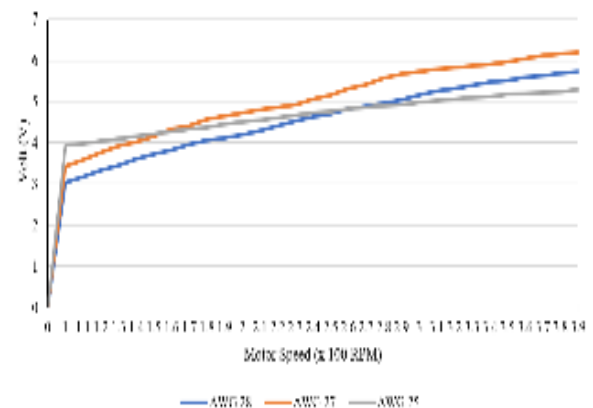
Lilitan *stator* dipasang pada *outer case* dengan ukuran kawat AWG 28. Selanjutnya, motor penggerak diatur pada tingkatan kecepatan maksimal yakni 390 RPM. Bentuk gelombang listrik pada osiloskop dari masing-masing ukuran *stator* ditujukan pada Gambar 7.



Gambar 7. Tegangan Keluaran berturut-turut untuk AWG 28, 27 dan 25

Tegangan pada AWG 25 menunjukkan model yang lebih rapat dengan *peak voltage* yang lebih tinggi dibandingkan dengan dua ukuran lainnya. Hal ini menunjukkan bukti pengaruh dari ukuran *stator* terhadap *output* dan kerapatan tegangan yang dibangkitkan.

Untuk mempelajari karakteristik *output* dari masing-masing PMLG, maka selanjutnya pengujian tegangan keluaran tanpa beban dilakukan dengan kecepatan yang berbeda pada *range* yang ditetapkan yakni dari 100–390 RPM. Pengujian yang dilakukan untuk semua jenis kawat *stator* menghasilkan tegangan yang berbeda. Gambar 8. menunjukkan grafik tegangan keluaran untuk *no load test* pada masing-masing PMLG.



Gambar 8. Tegangan keluaran untuk AWG 28, 27 dan 25 pada *no load test*

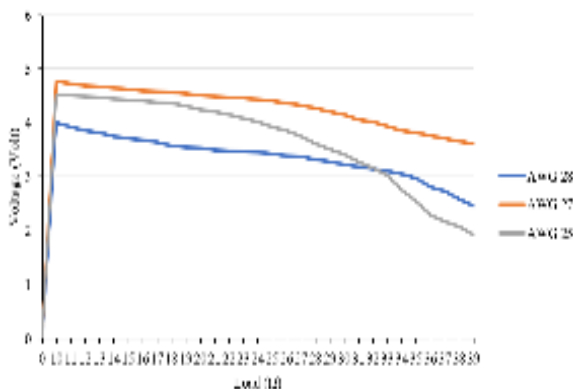
Dari Gambar 8 terlihat bahwa tegangan yang dibangkitkan pada kecepatan awal (100 RPM) berbeda-beda. *Stator* dengan ukuran AWG 25 menunjukkan tegangan awal yang dibangkitkan paling tinggi, sedangkan AWG 28 membangkitkan tegangan yang lebih rendah sementara AWG 27 berada di tengah kedua ukuran tersebut. Hasil yang berbeda ditujukan pada tegangan maksimal yang dibangkitkan yakni tegangan tertinggi yang dapat dibangkitkan pada kecepatan 390 RPM adalah pada *stator* dengan ukuran AWG 27, sedangkan ukuran AWG 25 membangkitkan tegangan paling rendah pada kecepatan tersebut.

Perbedaan antara tegangan awal dan tegangan akhir yang dibangkitkan terjadi dikarenakan adanya perbedaan tahanan *internal*

yang dipengaruhi oleh ukuran kawat. Tegangan awal yang dibangkitkan lebih rendah pada kawat dengan diameter lebih besar dikarenakan nilai tahanan *internal* yang ada pada kawat tersebut lebih tinggi. Pada ukuran kawat lebih kecil, nilai tahanan *internal* yang dimiliki juga lebih kecil sehingga memungkinkan untuk membangkitkan tegangan yang lebih tinggi pada kecepatan rendah. Namun, ukuran kawat berpengaruh juga terhadap besarnya tegangan yang dapat dibangkitkan pada kecepatan yang lebih tinggi.

Kawat dengan diameter lebih besar memungkinkan untuk membangkitkan tegangan yang lebih tinggi pada kecepatan tinggi dikarenakan mampu menjaga suhu kerja yang relatif lebih rendah dibandingkan dengan kawat ukuran kecil. Perbedaan suhu kerja dipengaruhi oleh arus yang mengalir pada kawat. Ketika suhu tinggi, maka nilai tahanan internal dari kawat akan berubah yang berdampak pada tegangan yang dibangkitkannya juga ikut terpengaruh.

Pengukuran berikutnya adalah pengukuran tegangan keluaran dengan beban bervariasi dari 10–39 Ω yang dilakukan dengan RPM tetap berdasarkan tegangan keluaran yang dijadikan acuan yakni yang mendekati nilai 5 volt. Hasil pengukuran ditunjukkan pada Gambar 9.

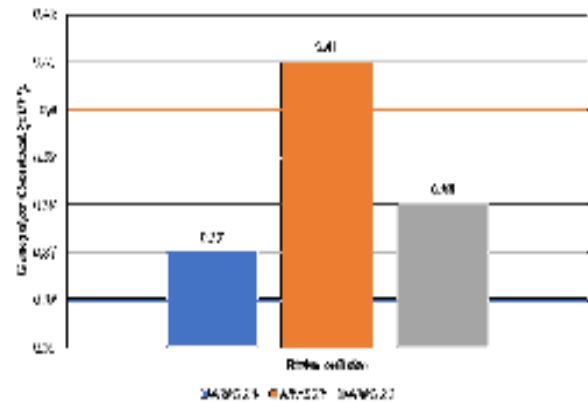


Gambar 9. Tegangan keluaran untuk AWG 28, 27 dan 25 pada *load test*

Konstanta Generator

Konstanta generator berhubungan terhadap gerakan dari *rotor* dengan tegangan yang dibangkitkan. Gambar 9 menunjukkan bahwa AWG 27 memiliki nilai konstanta yang paling tinggi. Nilai konstanta ini menjadi acuan penting untuk melihat kualitas dari generator yang digunakan karena ini menjadi suatu nilai yang menunjukkan seberapa efektif tegangan yang dibangkitkan pada kecepatan tertentu. Meskipun tegangan awal yang dibangkitkan pada kawat ukuran AWG 27 lebih rendah dari tegangan yang dibangkitkan pada AWG 28, namun nilai

konstanta pada AWG 27 tetap lebih tinggi dikarenakan rerata tegangan keluaran pada ukuran ini lebih stabil dan lebih tinggi dibandingkan pada dua ukuran lainnya.



Gambar 10. Konstanta generator untuk AWG 28, 27 dan 25

4. KESIMPULAN

Permanent Magnet Linear Generator dirancang berdasarkan dengan menggunakan VDI 2221 sebagai metode desain. Ditemukan bahwa belitan *stator* dan ukuran kumparan *stator* memiliki peran penting tidak hanya untuk daya yang dihasilkan oleh generator tetapi juga karakteristik dari tegangan yang diinduksi. Karakteristik dari PMLG tidak terbatas pada besarnya *voltage* yang dapat dibangkitkan namun juga bergantung terhadap karakteristik dari tegangan tersebut. Temuan tersebut dapat dijadikan landasan untuk menentukan aplikasi lanjut dan juga integrasi sistem yang dibutuhkan dalam pemanfaatan tegangan yang dibangkitkan. Pada aplikasi yang lebih kecil, hasil ini dapat dijadikan untuk sinyal yang diolah oleh *computer* (ECU) untuk menentukan karakteristik berkendaraan yang lebih luas. Pengembangan lebih lanjut dibutuhkan untuk membuat model yang dapat diuji secara langsung pada kendaraan dan juga metode perakitan yang lebih efektif.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] C. Wei and H. Taghavifar, "A novel approach to energy harvesting from vehicle suspension system: Half-vehicle model," *Energy*, vol. 134, pp. 279–288, 2017.
- [2] M. A. A. Abdelkareem *et al.*, "Vibration energy harvesting in automotive suspension system: A detailed review," *Appl. Energy*, vol. 229, no. April, pp. 672–699, 2018.
- [3] R. Tavares and M. Ruderman, "Energy harvesting using piezoelectric transducers

- for suspension systems,” *Mechatronics*, vol. 65, no. September 2019, p. 102294, 2020.
- [4] Z. Zhang, X. Zhang, Y. Rasim, C. Wang, B. Du, and Y. Yuan, “Design, modelling and practical tests on a high-voltage kinetic energy harvesting (EH) system for a renewable road tunnel based on linear alternators,” *Appl. Energy*, vol. 164, no. October 2015, pp. 152–161, 2016.
- [5] F. Rinderknecht, “The linear generator as integral component of an energy converter for electric vehicles.” pp. 35–42, 2019.
- [6] Y. Xu, X. Xue, Y. Wang, and M. Ai, “Performance characteristics of compressed air-driven free-piston linear generator (FPLG) system – A simulation study,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 160, no. June, p. 114013, 2019.
- [7] R. Zhang and X. Wang, “Parameter study and optimization of a half-vehicle suspension system model integrated with an arm-teeth regenerative shock absorber using Taguchi method,” *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 126, pp. 65–81, 2019.
- [8] R. Zhang, X. Wang, E. Al Shami, S. John, L. Zuo, and C. H. Wang, “A novel indirect-drive regenerative shock absorber for energy harvesting and comparison with a conventional direct-drive regenerative shock absorber,” *Appl. Energy*, vol. 229, no. April, pp. 111–127, 2018.
- [9] A. V. Kireev, N. M. Kozhemyaka, and N. V. Grebennikov, “Energy-regenerative Shock Absorber Mathematical Model,” *Procedia Eng.*, vol. 206, pp. 1741–1746, 2017.
- [10] W. Salman *et al.*, “A high-efficiency energy regenerative shock absorber using helical gears for powering low-wattage electrical device of electric vehicles,” *Energy*, vol. 159, pp. 361–372, 2018.
- [11] Z. Wang, T. Zhang, Z. Zhang, Y. Yuan, and Y. Liu, “A high-efficiency regenerative shock absorber considering twin ball screws transmissions for application in range-extended electric vehicles,” *Energy Built Environ.*, vol. 1, no. 1, pp. 36–49, 2020.
- [12] J. Zou, X. Guo, M. A. A. Abdelkareem, L. Xu, and J. Zhang, “Modelling and ride analysis of a hydraulic interconnected suspension based on the hydraulic energy regenerative shock absorbers,” *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 127, pp. 345–369, 2019.
- [13] J. Wang, W. Wang, G. W. Jewell, and D. Howe, “A low-power, linear, permanent-magnet generator/energy storage system,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 49, no. 3, pp. 640–648, 2002.
- [14] I. Abdalla, E. Z. A. Zainal, N. A. Ramlan, Firmansyah, A. R. A. Aziz, and M. Heikal, “Free piston linear generator for low grid power generation,” *MATEC Web Conf.*, vol. 131, 2017.
- [15] S. J. Cho and J. H. Kim, “Linear electromagnetic electric generator for harvesting vibration energy at frequencies more than 50 Hz,” *Adv. Mech. Eng.*, vol. 9, no. 10, pp. 1–9, 2017.
- [16] S. Eriksson, “Design of permanent-magnet linear generators with constant-torque-angle control for wave power,” *Energies*, vol. 12, no. 7, 2019.
- [17] S. Djebarri, J. F. Charpentier, F. Scullier, and M. Benbouzid, “Design methodology of permanent magnet generators for fixed-pitch tidal turbines with overspeed power limitation strategy,” *J. Ocean Eng. Sci.*, 2019.
- [18] G. E. Dieter and L. C. Schmidt, *Engineering Design*, vol. 4, no. 9. 2000.
- [19] J. Gausemeier and S. Moehring, “VDI 2206- A New Guideline for the Design of Mechatronic Systems,” *IFAC Proc. Vol.*, vol. 35, no. 2, pp. 785–790, 2002.
- [20] T. Richter, J. H. Witt, J. W. Gesk, and A. Albers, “Identification of requirements of methods and processes for modeling objectives in predevelopment projects,” *Procedia CIRP*, vol. 84, pp. 419–427, 2019.
- [21] J. Jansch and H. Birkhofer, “The development of the guideline VDI 2221 - The change of direction,” *9th Int. Des. Conf. Des. 2006*, pp. 45–52, 2006.
- [22] J. M. Kim, J. Y. Choi, K. S. Lee, and S. H. Lee, “Design and analysis of linear oscillatory single-phase permanent magnet generator for free-piston stirling engine systems,” *AIP Adv.*, vol. 7, no. 5, pp. 1–7, 2017.
- [23] Yokogawa Electric Corporation, “Digital Oscilloscope,” 2000.
- [24] V. Žežulka, J. Pištora, M. Lesňák, P. Straka, D. Ciprian, and J. Foukal, “Intensity distribution of strong magnetic fields created by opposing linear Halbach assemblies of

- permanent magnets," *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 345, pp. 7–12, 2013.
- [25] C. K. Chandrana, J. A. Neal, D. Platts, B. Morgan, and P. Nath, "Automatic alignment of multiple magnets into Halbach cylinders," *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 381, pp. 396–400, 2015.
- [26] T. O'Reilly, W. M. Teeuwisse, and A. G. Webb, "Three-dimensional MRI in a homogenous 27 cm diameter bore Halbach array magnet," *J. Magn. Reson.*, vol. 307, p. 106578, 2019.
- [27] A. Habib, H. S. Che, N. Abd Rahim, M. Tousizadeh, and E. Sulaiman, "A fully coreless Multi-Stator Multi-Rotor (MSMR) AFPM generator with combination of conventional and Halbach magnet arrays," *Alexandria Eng. J.*, vol. 59, no. 2, pp. 589–600, 2020.
- [28] S. Zhu *et al.*, "Acoustic field characteristics of a free-piston Stirling cryocooler with large cooling capacity at liquid nitrogen temperature," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 147, no. October 2018, pp. 324–335, 2019.
- [29] J. P. T. Mo, S. C. P. Cheung, and R. Das, "Mechanical Vibration," in *Demystifying Numerical Models*, 2019, pp. 209–233.
- [30] J. C. A. Jauregui Correa and A. A. Lozano Guzman, "Fundamentals of mechanical vibrations," in *Mechanical Vibrations and Condition Monitoring*, 2020, pp. 1–26.
- [31] Y. Wang, J. Zhou, G. Wei, Z. Dong, and H. Chen, "Stator winding single-phase grounding faults protective scheme based on discriminant analysis for Powerformers with selectivity," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 77, pp. 145–150, 2016.
- [32] W. Liu, L. Liu, I. Y. Chung, D. A. Cartes, and W. Zhang, "Modeling and detecting the stator winding fault of permanent magnet synchronous motors," *Simul. Model. Pract. Theory*, vol. 27, pp. 1–16, 2012.
- [33] L. Otava, M. Graf, and L. Buchta, "Interior permanent magnet synchronous motor stator winding fault modeling," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 28, no. 4, pp. 324–329, 2015.
- [34] M. H. Bhuyan, D. Das, and R. Islam, "Design And Manufacturing Of A Low Cost Synchronous Motor- Generator For Electrical Machine Laboratory Design And Manufacturing Of A Low Cost Synchronous Motor-Generator For," in *Proceedings of the Conference on Engineering Research, Innovation and Education 2011*, 2011, pp. 525–529.
- [35] O. Farrok, M. R. Islam, M. R. I. Sheikh, Y. Guo, and J. G. Zhu, "A Split Translator Secondary Stator Permanent Magnet Linear Generator for Oceanic Wave Energy Conversion," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 65, no. 9, pp. 7600–7608, 2018.
- [36] C. T. Liu, H. N. Lin, H. C. Yeh, and C. C. Hwang, "Optimal design of a direct driven slotless tubular linear generator for renewable energy extraction," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 266, no. 1, 2011.
- [37] M. Caruso, A. O. Di Tommaso, F. Marignetti, R. Miceli, and G. R. Galluzzo, "A general mathematical formulation for winding layout arrangement of electrical machines," *Energies*, vol. 11, no. 2, pp. 1–24, 2018.
- [38] K. Zhumagulov, Y. Sarsikeyev, and D. Kapanova, "Calculation of the Magnetic Field of the Stator Windings of the Synchronous Machine," *MATEC Web Conf.*, vol. 155, 2018.