ISSN : 2598–3814 (Online), ISSN : 1410–4520 (Cetak)

RANCANG BANGUN PEMBANGKIT LISTRIK DARI TEKANAN KENDARAAN PADA *SPEED BUMP* MENGGUNAKAN GENERATOR DC BERBASIS ARDUINO

Fadly Yusnil Husein, Raja Harahap, Armansyah, Hermansyah Alam
Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Islam Sumatera Utara
fadliyusnil.husein@gmail.com; raja@usu.ac.id;
armansyah@ft.uisu.ac.id; hermansyah.alam@ft.uisu.ac.id

Abstrak

Kebutuhan energi listrik yang terus meningkat mendorong pengembangan sumber energi alternatif, salah satunya energi mekanik dari tekanan kendaraan di jalan raya yang selama ini terbuang percuma pada struktur perkerasan jalan, khususnya di titik polisi tidur (speed bump) [1]. Penelitian ini merancang sistem pembangkit listrik yang memanfaatkan tekanan kendaraan melalui mekanisme pegas yang dihubungkan dengan generator DC 24 volt, dengan Arduino Uno sebagai sistem monitoring tegangan dan arus secara real-time melalui LCD. Pendekatan yang digunakan adalah perhitungan model matematis berbasis karakteristik mekanis pegas (model saturasi eksponensial mengikuti Hukum Hooke) yang diterapkan pada data berat lima jenis mobil dan empat jenis sepeda motor yang umum digunakan di Indonesia. Hasil perhitungan menunjukkan tegangan keluaran mobil berkisar 23,6-25,7 volt dengan daya ke baterai 7,25-8,00 watt dan arus pengisian 0,307-0,311 ampere, sedangkan motor menghasilkan tegangan 12,9-14,6 volt, daya 3,48-4,08 watt, dan arus 0,270-0,279 ampere. Perbedaan ini terjadi karena beban per roda mobil telah melewati titik kejenuhan mekanis pegas (120 kg), sementara beban motor masih berada pada rentang proporsional. Penelitian ini menunjukkan bahwa potensi energi dari tekanan kendaraan dapat dihitung dan diproyeksikan secara kuantitatif sebagai dasar pengembangan sistem pembangkit listrik skala kecil berbasis infrastruktur jalan.

Kata-Kata Kunci : *Energi Terbarukan, Speed Bump, Generator Dc, Arduino, Arus, Baterai*

I. Pendahuluan

Konsumsi energi listrik terus meningkat seiring pertumbuhan penduduk dan industrialisasi, sementara bauran energi nasional masih didominasi bahan bakar fosil. Energi mekanik dari tekanan kendaraan bermotor di jalan raya merupakan salah satu sumber energi yang berlimpah namun belum dioptimalkan, karena gaya tekan vertikal kendaraan sepenuhnya terserap oleh struktur jalan dan terbuang sebagai panas gesekan [1].

Konsep pemanenan energi dari infrastruktur jalan telah dikembangkan di berbagai negara, mulai dari lantai piezoelektrik di stasiun kereta Tokyo hingga ubin pejalan kaki Pavegen Systems di Inggris [2]. Riset lain memperkirakan potensi energi hingga puluhan watt-hour per jam pada jalan dengan volume lalu lintas tinggi, bergantung pada mekanisme konversi yang digunakan [3]. Pada titik polisi tidur, pendekatan generator DC yang digerakkan mekanisme pegas dinilai lebih ekonomis dibanding piezoelektrik karena biaya komponen yang lebih terjangkau dan konstruksi yang lebih sederhana [4], [9].

Penelitian Todaria dkk. membuktikan mekanisme rack-pinion mampu menghasilkan tegangan rata-rata 12 volt DC dari lintasan kendaraan roda dua [5], sedangkan Ramadhani dkk. di Indonesia mencatat tegangan 6,5 volt dengan arus 0,8 ampere menggunakan pegas heliks [6]. Berdasarkan kajian tersebut, penelitian ini merancang sistem pembangkit listrik dari tekanan kendaraan pada speed bump menggunakan generator DC 24 volt yang digerakkan mekanisme pegas gabungan, dilengkapi Arduino Uno sebagai sistem monitoring tegangan dan arus secara real-time. Tujuan penelitian adalah menghitung dan menganalisis besar tegangan, arus, dan daya listrik yang dapat dihasilkan sistem terhadap variasi berat kendaraan roda empat dan roda dua yang umum dijumpai di Indonesia.

II. Tinjauan Pustaka

2.1 Energi Terbarukan dan Energi Mekanik Kendaraan

Energi terbarukan merupakan energi yang bersumber dari alam dan dapat diperbaharui secara alami dalam skala waktu manusia, meliputi energi surya, angin, air, panas bumi, biomassa, serta energi mekanik dari berbagai aktivitas fisik. Pertumbuhan konsumsi energi dunia yang terus meningkat dan keterbatasan cadangan bahan bakar fosil mendorong intensifnya pengembangan sumber-sumber energi alternatif yang berkelanjutan *(Maczulak, 2010)*. Badan Energi Internasional mencatat bahwa porsi energi terbarukan dalam bauran energi global perlu ditingkatkan secara drastis untuk mencapai target netralitas karbon pada pertengahan abad ini *(IEA, 2023)*.

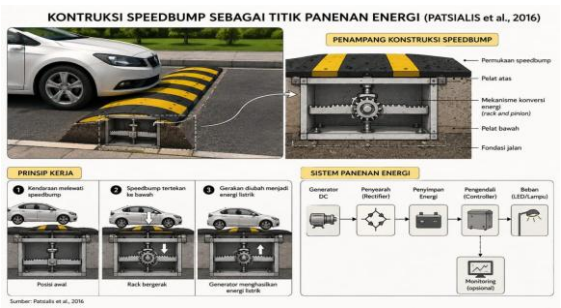
Salah satu kategori energi terbarukan yang kerap terabaikan adalah energi mekanik yang dihasilkan dari lalu lintas kendaraan bermotor. Setiap kendaraan yang melintas di atas permukaan jalan memberikan gaya tekan vertikal kepada struktur jalan yang besarnya setara dengan berat kendaraan ditambah gaya dinamis akibat getaran suspensi. Dalam kondisi normal, energi mekanik ini

seluruhnya terserap oleh material perkerasan jalan dan terkonversi menjadi panas gesekan yang terbuang tanpa pemanfaatan lebih lanjut. Kajian ilmiah tentang pemanenan energi dari tekanan kendaraan *(vehicle-induced energy harvesting)* mulai berkembang pesat sejak awal tahun 2000-an, mengeksplorasi berbagai mekanisme konversi mulai dari piezoelektrik, sistem hidrolik, hingga mekanisme pegas-generator yang memanfaatkan prinsip induksi elektromagnetik *(Xiong et al., 2012)*.

Studi yang dilakukan oleh Duarte et al. (2016) menunjukkan bahwa satu titik pemanenan energi pada jalan dengan volume lalu lintas sedang mampu menghasilkan daya rata-rata antara 10 hingga 50 watt tergantung desain sistem konversi. Potensi ini menjadi semakin signifikan apabila diterapkan secara massal pada titik-titik strategis dengan lalu lintas padat, seperti kawasan perumahan, area parkir, pintu gerbang tol, dan lingkungan sekolah yang memiliki polisi tidur sebagai infrastruktur pengendali kecepatan *(Patsialis et al., 2016)*.

2.2 *Speed Bump* (Polisi Tidur)

Speed bump atau polisi tidur merupakan perangkat manajemen kecepatan lalu lintas yang dipasang melintang pada permukaan jalan untuk memaksa pengemudi memperlambat kendaraannya. Secara struktural, polisi tidur berbentuk tonjolan memanjang yang umumnya terbuat dari aspal, karet, atau polimer sintetis, dengan dimensi ketinggian antara 7,5 hingga 10 cm dan lebar 30 hingga 90 cm *(Hossain & Alam, 2017)*. Standar teknis pemasangan speed bump di Indonesia diatur melalui Peraturan Menteri Perhubungan Nomor PM 82 Tahun 2018, yang menetapkan dimensi tinggi maksimum 5 cm dengan sudut kemiringan sisi tidak lebih dari 15 derajat.



Gambar 1. Konstruksi Speed Bump sebagai Titik Pemanenan Energi

Dalam konteks sistem pembangkit energi, polisi tidur memiliki posisi yang sangat strategis karena merupakan titik di mana kendaraan secara konsisten dan berulang memberikan gaya tekan vertikal yang signifikan. Sifat pembebanan yang terpusat dan periodik ini menjadikan speed bump sebagai lokasi optimal untuk integrasi mekanisme konversi energi, khususnya mekanisme berbasis tuas dan per yang mengonversi gaya tekan vertikal menjadi gerak rotasi pada generator *(Patsialis et al., 2016)*. Todaria et al. (2017) membuktikan secara eksperimental bahwa sistem speed bump generator sederhana mampu menghasilkan tegangan rata-rata 12 volt DC dari lintasan kendaraan rodadua.

2.3 Mekanisme Per Tarik dan Per Dorong

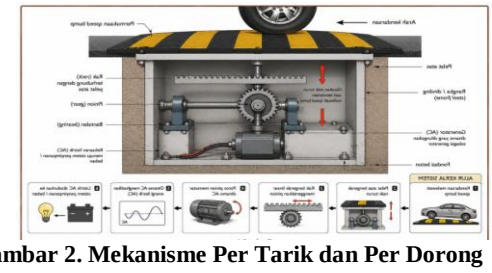
Pegas atau per merupakan elemen mekanis elastis yang mampu menyimpan energi potensial elastis saat mengalami deformasi (tertekan atau tertarik) dan melepaskan kembali energi tersebut ketika gaya eksternal dihilangkan. Karakteristik dasar pegas ideal dinyatakan melalui Hukum Hooke, yang menyatakan bahwa gaya yang dihasilkan pegas berbanding lurus dengan defleksinya *(Hibbeler, 2010)*:

$$F = k \times x$$

di mana:
F = gaya pegas (Newton),
k = konstanta kekakuan pegas (N/m atau N/cm)
x = defleksi atau perubahan panjang pegas dari posisi alaminya (m/cm).

Dalam sistem speed bump generator pada penelitian ini, digunakan kombinasi dua jenis per dengan fungsi yang berbeda. Satu per dorong *(compression spring)* dipasang di bawah pelat speed bump untuk menerima dan mentransfer gaya tekan dari kendaraan ke mekanisme tuas yang terhubung ke poros dinamo. Ketika kendaraan menginjak pelat, per dorong tertekan dan mendorong tuas ke bawah sehingga memutar poros dinamo dan menghasilkan listrik. Dua per tarik *(tension spring)* dipasang untuk menarik tuas kembali ke posisi awal setelah kendaraan berlalu dan beban hilang. Kombinasi satu per dorong dan dua per tarik ini menciptakan mekanisme restoratif yang seimbang, memastikan tuas kembali ke posisi semula dengan cepat dan konsisten sehingga sistem siap menerima lintasan kendaraan berikutnya *(Ramadhani et al., 2019)*.

Pemilihan konstanta kekakuan per yang tepat merupakan faktor kritis. Per yang terlalu kaku menghasilkan defleksi sangat kecil sehingga energi yang ditransfer ke generator tidak signifikan, sementara per yang terlalu lunak tidak mampu mengembalikan tuas dengan cepat dan responsif. Berdasarkan kajian yang dilakukan oleh Mehta dan Kant (2018), nilai konstanta pegas yang optimal untuk aplikasi speed bump generator skala prototipe berada pada kisaran 10 hingga 20 N/cm, bergantung pada rentang massa kendaraan yang akan menjadi beban pengujian.



Gambar 2. Mekanisme Per Tarik dan Per Dorong pada Sistem Speed Bump

2.5 Mekanisme Konversi Energi Mekanik Menjadi Energi Listrik

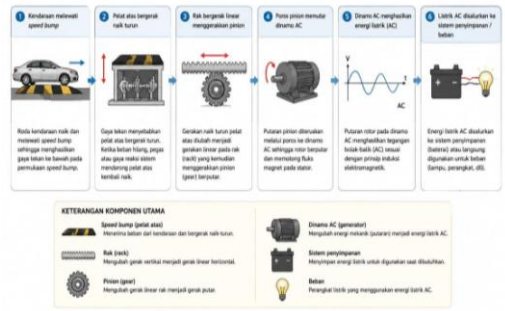
Proses konversi energi pada sistem speed bump generator melibatkan serangkaian transformasi energi yang berurutan. Tekanan vertikal kendaraan pertama-tama diterima oleh pelat speed bump, diteruskan melalui per dorong kepada tuas mekanis yang kemudian menggerakkan poros generator DC 24V secara rotasional. Gerak rotasi dinamo menghasilkan tegangan DC yang selanjutnya disearahkan menjadi tegangan DC oleh rangkaian penyearah *(Rashid, 2011)*. Diagram konversi energi dalam sistem ini dapat dituliskan sebagai:

Energi Mekanik → Energi Kinetik Rotasi Dinamo → Energi Listrik AC → Energi Listrik DC

Efisiensi konversi total sistem (η_{total}) merupakan hasil kali dari efisiensi mekanis mekanisme tuas-per (η_{mek}) dan efisiensi elektris dinamo (η_{gen}), dinyatakan sebagai *(Duarte et al., 2016)*:

$$\eta_{total} = \eta_{mek} \times \eta_{gen}$$

Pada skala prototipe laboratorium, efisiensi total sistem semacam ini umumnya berkisar antara 10 hingga 40 persen, bergantung pada kualitas komponen mekanis dan karakteristik dinamo yang digunakan. Nilai ini masih dapat ditingkatkan melalui optimasi desain mekanis dan pemilihan dinamo dengan efisiensi tinggi



Gambar 3. Alur Konversi Energi Mekanik ke EnergiListrik

2.9 Mikrokontroler Arduino Uno

Arduino merupakan platform komputasi fisik *(physical computing)* berbasis mikrokontroler yang bersifat open-source, dikembangkan pertama kali pada tahun 2005 oleh Massimo Banzi dan David Cuartielles di Institut Interaksi Desain Ivrea, Italia. Arduino dirancang untuk menjembatani kebutuhan prototipe elektronik yang cepat dan mudah bagi desainer, insinyur, maupun kalangan non-teknis *(Banzi & Shiloh, 2014)*.

Board Arduino Uno R3 yang digunakan dalam penelitian ini mengusung mikrokontroler ATmega328P yang beroperasi pada frekuensi clock 16 MHz dengan tegangan kerja 5 volt. Mikrokontroler ini memiliki memori Flash 32 KB untuk menyimpan program, SRAM 2 KB untuk data runtime, dan EEPROM 1 KB untuk penyimpanan non-volatil. Arduino Uno R3 dilengkapi 14 pin digital I/O (6 mendukung PWM), 6 pin analog input dengan resolusi ADC 10-bit (rentang 0-5 volt, nilai 0-1023), serta antarmuka I2C pada pin A4 (SDA) dan A5 (SCL) yang digunakan untuk komunikasi dengan modul LCD *(Arduino, 2023)*.

Dalam sistem ini, Arduino berperan sebagai unit pemrosesan dan monitoring data. Pin analog A0 menerima sinyal dari sensor tegangan, kemudian Arduino mengolah nilai amper DC yang diterima menjadi besaran tegangan aktual melalui konversi matematis, lalu menampilkannya pada LCD I2C secara real-time. Pemrograman dilakukan menggunakan Arduino IDE dengan bahasa C/C++ yang disederhanakan, terdiri dari fungsi setup() untuk inisialisasi satu kali dan fungsi loop() yang berjalan berulang secara kontinu.

III. Metodologi Penelitian

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Keseluruhan rangkaian kegiatan penelitian ini dilaksanakan dalam dua ranah lokasi berbeda yang saling melengkapi. Proses perancangan diagram sistem, seleksi komponen, pemrograman Arduino, serta perakitan awal dilakukan di Laboratorium Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Islam Sumatera Utara, Medan. Adapun tahap pengujian fungsional prototipe secara terpadu dilaksanakan di area terbuka lingkungan kampus tepatnya di gerbang keluar kampus UISU, guna mensimulasikan kondisi nyata lintasan kendaraan bermotor. Penelitian ini berlangsung dari bulan Maret 2026 hingga selesainya seluruh tahapan penyusunan laporan pada Juni 2026.

3.2 Alat dan Bahan Penelitian

Komponen perangkat keras dipilih berdasarkan tiga pertimbangan utama: kesesuaian fungsi dengan kebutuhan sistem, ketersediaan di pasaran komponen elektronik lokal, serta keterjangkauan harga yang relevan dengan skala prototipe laboratorium.

3.2.1 Perangkat Keras (Hardware)

Komponen perangkat keras yang digunakan dalam penelitian ini tercantum pada Tabel 3.1.

Tabel 1. Daftar Komponen Perangkat Keras

No.	Nama Komponen
1	Generator DC 24 volt (Motor Generator AC)
2	Arduino Uno R3
3	Sensor Tegangan (*Voltage Sensor Module*)
4	Lampu DC
5	LCD I2C 16x2
6	Modul Step-Down (*Buck Converter*)
7	Baterai 12 Volt
8	Kabel 0,75 mm²
9	Push Button
10	Per Tarik (*Tension Spring*)
11	Per Dorong (*Compression Spring*)

Generator DC 24 volt dipilih sebagai komponen penghasil listrik utama karena kemampuannya menghasilkan tegangan dari putaran

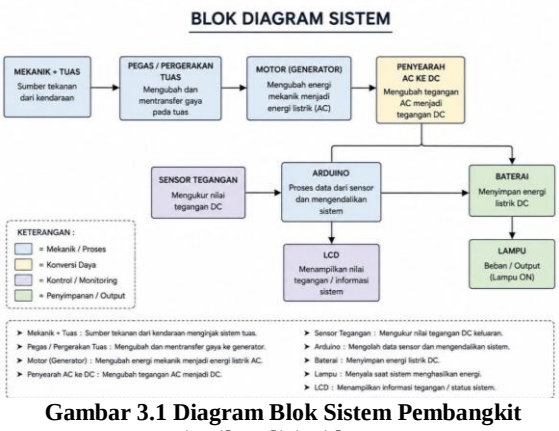
poros dengan frekuensi relatif rendah. Kombinasi per dorong dan dua per tarik dirancang secara sinergis: per dorong mentransmisikan gaya tekan vertikal kendaraan menjadi gerak putar, sementara kedua per tarik memastikan sistem kembali ke posisi awal setelah kendaraan melewatinya, memungkinkan siklus kerja yang berulang dan andal.

3.2.2 Perangkat Lunak *(Software)*

Perangkat lunak utama yang digunakan adalah Arduino IDE versi 2.x, lingkungan pengembangan berbasis C/C++ yang dirancang khusus untuk pemrograman papan Arduino. Library yang diintegrasikan meliputi Liquid Crystal_I2C untuk pengendalian modul LCD via protokol I2C, serta Wire.h untuk komunikasi serial dua jalur. Analisis dan visualisasi data hasil pengujian dilakukan menggunakan Microsoft Excel (Banzi & Shiloh, 2014).

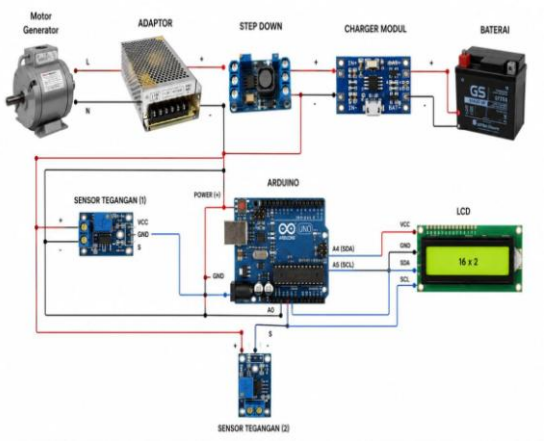
3.4 Diagram Blok Sistem

Perancangan sistem diawali dari penyusunan diagram blok sebagai representasi abstrak dari alur konversi energi dan aliran sinyal pada keseluruhan sistem. Diagram blok memudahkan identifikasi interkoneksi antar subsistem sebelum berlanjut ke perancangan rangkaian yang lebih terperinci (Rashid, 2011).



Gambar 3.1 Diagram Blok Sistem Pembangkit Listrik Polisi Tidur

Sistem ini beroperasi melalui dua jalur paralel yang saling mendukung. Jalur pertama adalah jalur konversi energi: tekanan kendaraan ditransfer oleh mekanisme tuas dan sistem pegas gabungan untuk memutar poros generator DC 24V, menghasilkan tegangan searah yang kemudian disearahkan oleh modul rectifier menjadi DC, lalu disimpan dalam baterai 12V sekaligus menyuplai lampu DC sebagai beban. Jalur kedua adalah jalur monitoring: sensor tegangan membaca nilai DC keluaran, mengirim sinyal analog ke Arduino, yang mengolah dan menampilkannya pada LCD I2C secara real-time. Modul step-down menstabilkan tegangan suplai Arduino pada 5V stabil.



Gambar 3.2 Skema Rangkaian Elektronik Sistem

IV. Hasil dan Pembahasan

4.1 Dasar Perhitungan

Analisis utama, yaitu menghitung besar tegangan listrik yang dihasilkan oleh Generator DC 24V serta daya yang masuk ke baterai berdasarkan berat aktual dari lima jenis mobil dan empat jenis sepeda motor yang umum digunakan di Indonesia. Perhitungan dilakukan dengan pendekatan beban per roda, mengingat hanya sebagian berat kendaraan yang diteruskan ke mekanisme tuas dan per pada satu titik speed bump saat kendaraan melintas *(Hibbeler, 2010)*.

Beban efektif per roda dihitung dari total berat kendaraan (berat kosong kendaraan ditambah berat pengendara rata-rata 70 kg) dibagi dengan jumlah roda kendaraan, yaitu 2 untuk sepeda motor dan 4 untuk mobil:

$$W_{roda} = \frac{W_{kendaraan} + W_{pengendara}}{n}$$

Tegangan keluaran generator pada fase tekanan turun (V_{turun}) dihitung menggunakan model saturasi eksponensial, yang merepresentasikan karakteristik mekanis pegas sesuai Hukum Hooke, di mana defleksi pegas memiliki batas maksimum sehingga peningkatan beban yag sangat besar tidak lagi sebanding dengan peningkatan tegangan *(Mehta & Kant, 2018)*:

$$V_{turun} = V_{maks}\left(1 - e^{-\frac{W_{roda}}{W_0}}\right)$$

Dimana:

V_{turun} = tegangan saat mekanisme turun
V_{maks} = tegangan maksimum
W_{roda} = beban pada roda
W_o = konstanta karakteristik sistem
e = bilangan euler

Tegangan pada fase pegas kembali naik (V_{naik}) diperoleh dari rasio rata-rata hasil pengujian sebelumnya, yaitu 92% dari nilai V_{turun} :

$$V_{naik} = 0{,}92\ V_{turun} \quad (4.3)$$

Tegangan rata-rata per siklus ($V_{rata\text{-}rata}$) dihitung sebagai rata-rata aritmetik dari kedua fase tersebut:

$$V_{rata\text{-}rata} = \frac{V_{turun} + V_{naik}}{2} \quad (4.4)$$

Daya yang masuk ke baterai (P) dihitung menggunakan persamaan regresi linier yang diperoleh dari hubungan antara tegangan generator dan arus pengisian pada pengujian generator sebelumnya *(Chapman, 2005)*:

$$P = 0{,}3533\ V_{turun} - 1{,}083 \quad (4.5)$$

Berdasarkan hubungan daya listrik P = V × I, arus pengisian yang masuk ke baterai (I) pada setiap kondisi pembebanan dapat diturunkan dari nilai tegangan turun (V_{turun}) dan daya ke baterai (P) yang telah dihitung sebelumnya, sesuai persamaan berikut:

$$I = \frac{P}{V_{turun}} \quad 4.6$$

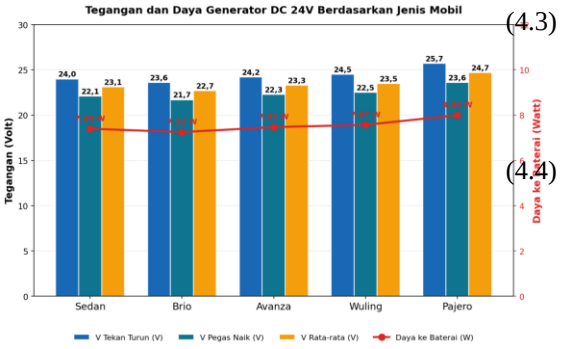
Perhitungan menunjukkan arus pengisian pada kelompok mobil berkisar antara 0,307 hingga 0,311 ampere, sedangkan pada kelompok motor berkisar antara 0,270 hingga 0,279 ampere, sebagaimana disajikan pada kolom "Arus (I)" di Tabel 1 dan Tabel 2. Nilai arus pada mobil relatif lebih tinggi dan lebih seragam dibanding motor, konsisten dengan pola tegangan dan daya yang telah dibahas sebelumnya, karena beban roda mobil sudah melampaui titik kejenuhan mekanis pegas sehingga arus pengisian yang dihasilkan cenderung stabil pada rentang tersebut.

4.1 Hasil pada Kendaraan Roda Empat

Kelima mobil menghasilkan tegangan seragam pada rentang 23,6-25,7 volt, daya ke baterai 7,25-8,00 watt, dan arus pengisian 0,307-0,311 ampere (Tabel 1). Keseragaman ini terjadi karena beban per roda seluruh mobil (287,5-517,5 kg) telah jauh melampaui titik kejenuhan mekanis pegas.

Tabel 1. Hasil Perhitungan Tegangan, Daya, dan Arus Berdasarkan Jenis Mobil

No	Jenis	Berat (kg)	Beban/ Roda (kg)	Tegangan Turun (V)	Tegangan Naik (V)	Daya (W)	Arus (A)
1	Sedan	1.220	305,0	24,0	22,1	7,40	0,308
2	Brio	1.150	287,5	23,6	21,7	7,25	0,307
3	Avanza	1.280	320,0	24,2	22,3	7,47	0,309
4	Wuling	1.370	342,5	24,5	22,5	7,57	0,309
5	Pajero	2.070	517,5	25,7	23,6	8,00	0,311
	Rata-rata	**1.418,0**	**354,5**	**24,4**	**22,4**	**7,54**	**0,309**



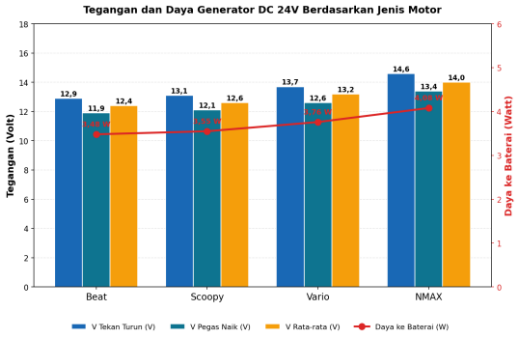
Gambar 1. Grafik Tegangan dan Daya Generator DC 24V Berdasarkan Jenis Mobil

4.2 Hasil pada Kendaraan Roda Dua

Motor menunjukkan variasi tegangan lebih jelas, yaitu 12,9-14,6 volt, daya 3,48-4,08 watt, dan arus pengisian 0,270-0,279 ampere (Tabel 2), karena beban per roda motor (82,5-99 kg) masih berada sebelum titik kejenuhan mekanis pegas.

Tabel 2. Hasil Perhitungan Tegangan, Daya, dan Arus Berdasarkan Jenis Motor

No	Jenis	Berat (kg)	Beban/ Roda (kg)	V Turun (V)	V Naik (V)	Daya (W)	Arus (A)
1	Beat	165,0	82,5	12,9	11,9	3,48	0,270
2	Scoopy	168,0	84,0	13,1	12,1	3,55	0,271
3	Vario	180,0	90,0	13,7	12,6	3,76	0,274
4	NMAX	198,0	99,0	14,6	13,4	4,08	0,279
	Rata-rata	**177,8**	**88,9**	**13,6**	**12,5**	**3,72**	**0,274**



Gambar 2. Grafik Tegangan dan Daya Generator DC 24V Berdasarkan Jenis Motor

4.3 Perbandingan Mobil dan Motor

Rata-rata tegangan mobil (23,5 V) jauh lebih tinggi dibanding motor (13,1 V), dengan selisih daya rata-rata 3,82 watt dan selisih arus pengisian sekitar 0,035 ampere. Sistem lebih optimal dipasang pada jalur yang lebih sering dilintasi kendaraan roda empat, meski motor tetap memberi kontribusi arus dan daya untuk pengisian baterai secara bertahap [7], [10].

Perlu ditekankan bahwa seluruh nilai pada Tabel 1 dan 2 merupakan hasil perhitungan model matematis berbasis karakteristik mekanis pegas dan data empiris pengujian generator sebelumnya, bukan

hasil pengukuran langsung di lapangan pada kelima mobil dan keempat motor tersebut, sehingga memerlukan validasi empiris lebih lanjut melalui pengujian fisik prototipe.

V. Kesimpulan dan Saran

5.1 Kesimpulan

Model saturasi eksponensial terbukti mampu menangkap perilaku mekanis pegas sesuai Hukum Hooke, dengan titik kejenuhan pada 120 kg sebagai pembeda utama respons mobil dan motor. Mobil menghasilkan tegangan 23,6-25,7 V, daya 7,25-8,00 W, arus 0,307-0,311 A; motor menghasilkan tegangan 12,9-14,6 V, daya 3,48-4,08 W, arus 0,270-0,279 A. Penelitian ini menunjukkan potensi energi dari tekanan kendaraan dapat dihitung dan diproyeksikan secara kuantitatif.

5.2 Saran

Validasi empiris melalui pengujian fisik prototipe pada kondisi jalan nyata perlu dilakukan untuk memastikan akurasi model. Parameter kunci seperti konstanta kejenuhan pegas (W_0) sebaiknya dikalibrasi ulang dari pengukuran langsung, dan cakupan kendaraan dapat diperluas ke jenis lain seperti truk ringan atau kendaraan listrik.

Daftar Pustaka

[1]. H. Xiong, L. Wang, D. Jiang, and J. Hong, 2012, *Harvesting Biomechanical Energy Using Impedance-Matched Multistable Energy Harvesters*, Applied Physics Letters, vol. 106, no. 14, p. 143901, doi: 10.1063/1.4916895.

[2]. F. Duarte, J. P. Champalimaud, and A. Ferreira, 2016, *Waynergy vehicles: An innovative road pavement energy harvesting system*, Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Municipal Engineer, vol. 169, no. 1, pp. 13-18, doi: 10.1680/jmuen.14.00019.

[3]. T. Patsialis, I. Kougias, N. Kazakis, N. Theodossiou, and P. Droege, 2016, *Supporting Renewables' Penetration in Remote Areas Through the Improvement of Hydropower Technology*, Energies, vol. 9, no. 5, pp. 1-18, doi: 10.3390/en9050359.

[4]. M. Hossain and M. S. Alam, 2017, A *Review Of Speed Bump Power Generation Systems For Sustainable Energy Harvesting From Road Infrastructure*, Journal of Mechanical and Civil Engineering, vol. 14, no. 3, pp. 12-19.

[5]. P. Todaria, L. Wang, A. Pandule, T. Sui, and S. Alben, 2017, *Speed Bump Energy Harvesting: Design, Analysis, And Experimental Validation Of A Mechanical Energy Harvesting System*, International Journal of Renewable Energy Research, vol. 7, no. 1, pp. 145-152.

[6]. F. Ramadhani, A. Pratama, and B. Sulistyo, 2019, *Rancang Bangun Pembangkit Listrik Tenaga Tekanan Kendaraan Berbasis Pegas*, Jurnal Teknik Elektro Universitas Gadjah Mada, vol. 12, no. 2, pp. 77-84.

[7]. V. K. Mehta and R. Kant, 2018, *Energy Harvesting From Speed Breakers: A Systematic Review Of Mechanisms And Performance*, International Journal of Advanced Engineering Research and Science, vol. 5, no. 4, pp. 211-215, doi: 10.22161/ijaers.5.4.29.

[8]. A. Abdulwasea and W. Liu, 2025, *High-voltage speed bump design: Leveraging dual crank-shaft mechanisms for enhanced energy harvesting on road*, *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 39, pp. 3065-3077, doi: 10.1007/s12206-025-0415-y.

[9]. M. H. Rashid, 2011, *Power Electronics Handbook: Devices, Circuits, and Applications, 3rd* ed., Butterworth-Heinemann.

[10]. S. J. Chapman, 2005, *Electric Machinery Fundamentals*, 4th ed., McGraw-Hill.