

# ANALISIS PERFORMA PROTOTIPE SISTEM PEMBANGKIT DAYA LISTRIK TERINTEGRASI PADA RODA KENDARAAN LISTRIK

Muhammad Luthfi<sup>(1\*)</sup>, Agus Sifa<sup>(2)</sup>, Ade Ruli Nurul Fajri<sup>(2)</sup>  
dan Agil Alfiansyah<sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup>Prodi Teknik Mesin, Jurusan Teknik, Politeknik Negeri Indramayu

<sup>(2)</sup>Prodi Perancangan Manufaktur, Jurusan Teknik, Politeknik Negeri Indramayu

<sup>(\*)</sup>E-mail *Corresponding Author* : [mhm.luthfi@polindra.ac.id](mailto:mhm.luthfi@polindra.ac.id)

## Abstrak

Semakin banyaknya penggunaan sepeda ataupun motor listrik di Indonesia membuat kesempatan pengembangan di kendaraan ini semakin terbuka lebar, salah satunya pemanfaatan gerakan putaran roda ketika kendaraan sedang dalam kondisi beroperasi. Penelitian ini bertujuan untuk meneliti performa dari prototipe sistem pembangkit daya listrik yang dipasang ke dalam roda kendaraan sepeda atau motor listrik secara langsung. Data penelitian kuantitatif dikumpulkan menggunakan metode eksperimen dengan mengukur tegangan, arus listrik, serta waktu pengisian aki dari arus yang dihasilkan dengan variasi kecepatan putaran roda dan jumlah kutub kumparan stator. Dari hasil pengujian sistem yang telah dilakukan, arus listrik, tegangan listrik rata-rata tertinggi, serta waktu pengisian aki terendah yang masing-masing sebesar 11.64 V, 2.29 A, dan 20 menit dihasilkan pada jumlah kutub stator terbanyak dan kecepatan putaran tertinggi, yang masing-masing adalah 12 kutub dan 1119.8 rpm atau setara dengan kecepatan tempuh ekuivalen sebesar 73.88 km/jam. Sedangkan, efek penambahan kutub kumparan stator pada daya listrik yang dihasilkan tidak terlalu signifikan jika dibandingkan dengan perubahan kecepatan putaran roda.

**Kata Kunci:** Sepeda Listrik, Motor Listrik, Pembangkit Daya Listrik, Roda.

## Abstract

*The increasing use of electric bicycles and motorcycles in Indonesia has opened up significant opportunities for advancements in this type of vehicle, including the utilization of wheel rotation during operation. This research aims to evaluate the performance of a prototype electric power generation system directly installed within the wheels of electric bicycles or motorcycles. Quantitative research data were collected using experimental methods by measuring voltage, electric current, and battery charging time derived from the generated current under varying wheel rotation speeds and the number of stator coil poles. From the system testing results, the highest average voltage and current, along with the shortest battery charging time, which were 11.64 V, 2.29 A, and 20 minutes, respectively were achieved under conditions with the maximum number of stator poles and the highest rotation speed of 12 stator poles and a rotational speed of 1119.8 rpm respectively, which was equivalent to a travel speed of 73.88 km/h. In addition, the effect of addition of poles to the generated electricity power is not as significant as the change of the wheel rotation speed.*

**Keywords:** Electric Bicycle, Electric Motorcycle, Electric Power Generation, Wheel.

## 1 PENDAHULUAN

Dalam rangka mengurangi emisi karbon, produksi kendaraan bertenaga listrik masih terus berkembang hingga saat ini. Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 55 Tahun 2019 tentang percepatan program kendaraan listrik berbasis baterai menjadi salah satu alasan menguatnya kembali perkembangan kendaraan listrik di Indonesia [1]. Hal ini diimplementasikan melalui target pemerintah dalam produksi kendaraan bermotor listrik berbasis baterai (KBLBB) mencapai 400 ribu unit untuk roda empat

dan 1,76 juta unit roda dua dan terus meningkat hingga 600 ribu unit mobil dan 2,45 juta unit motor pada 2030 [2].

Diantara kendaraan listrik yang semakin banyak digunakan di masyarakat adalah sepeda dan motor listrik. Kendaraan sepeda dan motor listrik yang saat ini dipasarkan di Indonesia memiliki kecepatan gerak beragam yang berkisar 20 – 70 km/jam dengan jarak tempuh 15 – 200 km [3]. Dengan semakin banyaknya penggunaan sepeda ataupun motor listrik di Indonesia, kesempatan pengembangan produk ini masih terbuka lebar.

Salah satu aspek yang berpotensi untuk dikembangkan adalah pemanfaatan gerakan putaran roda kendaraan sepeda atau motor listrik untuk diubah menjadi daya listrik melalui prinsip Gaya Gerak Listrik (GGL) Induksi. GGL Induksi didefinisikan sebagai beda potensial yang dihasilkan pada kumparan karena perubahan atau gerakan garis-garis magnet yang melaluinya [4]. Pemanfaatan gerakan putaran roda lebih baik dilakukan pada saat sepeda atau motor listrik dalam kondisi bergerak menurun. Hal ini disebabkan bahwa dalam kondisi menurun, kendaraan listrik dapat bergerak dengan hanya mengandalkan gaya gravitasi tanpa menarik daya listrik dari baterai yang digunakan. Daya yang didapatkan dalam kondisi ini, dapat dimanfaatkan dengan disimpan kembali dalam baterai ataupun digunakan untuk menghidupkan perangkat elektronik lain melalui rangkaian elektronik tambahan.

Beberapa penelitian telah dilakukan untuk mengimplementasikan hal ini dalam kendaraan listrik. Dalam sebuah penelitian, simulasi *fuzzy logic* dari *adaptive DC-DC converter* dilakukan untuk memaksimalkan output dari putaran motor menjadi listrik melalui generator yang terpasang pada pelek roda secara langsung (*in-wheel generator*) sehingga dihasilkan tegangan sebesar 48 V dengan arus masukan yang digunakan oleh motor sebesar 5A [5]. Dalam penelitian lain, perhitungan dilakukan dengan model sebuah alternator dipasang pada kendaraan dan digerakkan oleh roda melalui mekanisme transmisi rantai serta sproket [6]. Dari penelitian yang dilakukan tersebut, didapatkan arus sebesar 12A dengan kecepatan putaran 1119,5 rpm atau ekuivalen dengan kecepatan tempuh 40 km/jam. Simulasi lain menggunakan Matlab/Simulink dilakukan untuk memodelkan listrik yang dihasilkan dari roda kendaraan dengan poros dari generator tersambung pada poros roda kendaraan [7]. Di penelitian tersebut, disimulasikan tegangan yang dihasilkan hingga 2500 V di kecepatan 80 km/jam, namun bentuk dari model pembangkit yang digunakan tidak dijelaskan secara eksplisit pada hasil penelitian. Sedangkan, di penelitian lain, simulasi dan uji prototipe skala kecil dilakukan untuk memodelkan kendaraan roda empat yang dipasang generator DC [8].

Selain simulasi, beberapa penelitian yang berkaitan dengan pembangkit listrik menggunakan putaran kendaraan juga dilakukan menggunakan eksperimen. Dalam sebuah penelitian, sepeda dipasangkan dinamo BLDC pada lokasi yang tidak dijelaskan untuk menghasilkan listrik sekitar 8.13 V pada kecepatan putaran 510.5 rpm dengan ditambah beban pengendara [9]. Dalam penelitian lain, generator AC dan penyearah arus juga dipasangkan pada roda depan sepeda yang telah dimodifikasi menggunakan motor listrik BLDC, untuk menghasilkan tegangan listrik dan arus listrik berkisar 25.75V dan 13.7 A pada kecepatan tempuh 19.65 km/jam [10]. Meskipun desain bentuk dari generator AC yang digunakan tidak dijelaskan secara rinci, penulis tersebut

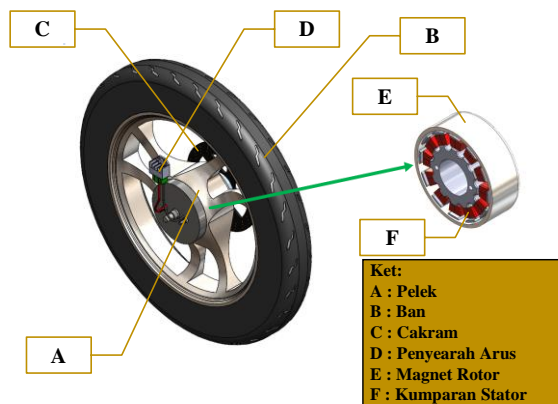
menyimpulkan bahwa penambahan generator berefek pada kecepatan tempuh yang semakin rendah karena efek dari berat generator. Selanjutnya, penelitian lain yang telah dilakukan juga memanfaatkan putaran roda sepeda motor menggunakan sambungan rantai ataupun roda sepeda listrik menggunakan dinamo sepeda [11], [12].

Dari penelitian-penelitian yang telah dilakukan tersebut, mayoritas dilakukan hanya menggunakan simulasi. Sedangkan dari penelitian yang dilakukan secara eksperimen, sistem membutuhkan komponen yang banyak, termasuk sistem transmisi, ataupun penggunaan sistem konversi mekanik ke listrik yang berat. Hal ini dapat menambah berat secara signifikan, tingkat kesulitan, dan biaya dalam proses fabrikasi sistem keseluruhan jika diimplementasikan lebih lanjut ataupun torsi dan kecepatan putaran roda tidak bisa ditransmisikan secara langsung ke sistem pembangkit listrik seperti pada prinsip *in-wheel motor* dimana motor terpasang pada pelek roda secara langsung dan poros roda berada pada satu sumbu dengan poros motor [13]. Selanjutnya, variasi parameter yang mungkin berpengaruh terhadap performa dari penggunaan sistem pembangkit listrik terintegrasi ini belum dibahas secara mendalam. Sehingga, tujuan penelitian ini adalah meneliti secara eksperimen, performa terbaik dari prototipe sistem pembangkit daya listrik yang dipasang ke dalam roda kendaraan sepeda atau motor listrik dalam bentuk kumparan stator dan magnet rotor untuk mengurangi penggunaan komponen serta penambahan berat beban yang perlu digerakkan oleh penggerak kendaraan, serta kecepatan dan torsi dari roda dapat ditransmisikan secara langsung ke sistem pembangkit listrik.

## 2 METODOLOGI

Pendekatan eksperimen digunakan dalam pengambilan data yang terbatas pada skala laboratorium atau prototipe, yang dengan kata lain roda kendaraan sepeda listrik tidak langsung diuji pada kendaraan sepeda listrik itu sendiri. Selain itu, keterbatasan lain dari sistem ini adalah roda tidak mengalami pembebanan yang sebenarnya dibandingkan roda yang dipasang secara langsung pada kendaraan listrik yang perlu menopang badan kendaraan dan juga pengguna. Pemilihan pelek roda depan sebagai tempat terletaknya sistem pembangkit dilakukan, adalah karena roda depan yang tidak tersambung secara langsung dengan bagian penggerak, lebih memungkinkan untuk dipasangkan magnet rotor dan kumparan stator di dalam peleknya. Pelek roda depan ini memiliki diameter total 2235.2 mm, tebal 67 mm, serta tempat tromol berdiameter 110 mm dan tebal 36 mm. Desain dan hasil fabrikasi dari roda yang di dalamnya diintegrasikan sistem pembangkit daya listrik ditampilkan pada Gambar 1 dan Gambar 2. Dengan pemilihan penempatan dalam pelek roda ini, maka sistem transmisi tidak diperlukan

antara roda dengan sistem pembangkit daya listrik yang memungkinkan pengurangan komponen dan berat dari sistem. Sedangkan rancangan dan hasil fabrikasi setup eksperimen secara keseluruhan ditampilkan pada 1 dan Gambar 4.



**Gambar 1.** Desain Prototipe Sistem Pembangkit Daya Listrik Terintegrasi pada Roda Kendaraan



**Gambar 2.** Hasil Fabrikasi Prototipe Sistem Pembangkit Daya Listrik Terintegrasi pada Roda Kendaraan

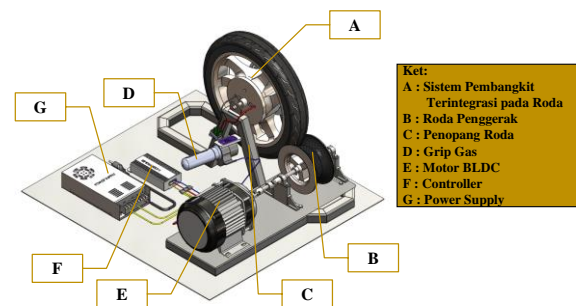
Cara kerja dari sistem ini dalam menghasilkan arus listrik adalah dengan memanfaatkan perubahan fluks magnetik yang terjadi di sekitar kumparan ketika magnet rotor berputar terhadap kumparan stator yang diam ketika pelek kendaraan berputar. Perubahan fluks magnetik yang terjadi di sekitar kumparan akan menginduksi arus listrik AC di dalam kumparan tersebut yang kemudian disearahkan menjadi arus listrik DC menggunakan penyearah arus.

Motor BLDC dan perangkat lainnya digunakan untuk memodelkan putaran roda melalui mekanisme gesekan antara roda kecil penggerak dengan roda uji sepeda listrik yang digerakkan dengan menyesuaikan kecepatan putaran dari kendaraan listrik mendekati penggunaan kendaraan yang sebenarnya. Pengaturan kecepatan putaran motor diatur menggunakan *Grip Gas Throttle*. Arus listrik (I) dan tegangan (V) diukur menggunakan multimeter setelah disearahkan dan kecepatan putaran motor (n) diukur menggunakan Tachometer non-kontak UNI-T 373 yang memiliki

rentang pengukuran 10.0 - 9999.9 rpm, resolusi 0.1 rpm, dan akurasi  $0.04\% \pm 2$ . Kecepatan tempuh ekuivalen ( $v$ ) dihitung dengan menggunakan persamaan (1) dimana  $r$  adalah jari-jari ban dalam satuan m. Sedangkan, daya listrik (P) dihitung menggunakan persamaan (2). Selain arus listrik dan tegangan yang diukur, sistem ini juga diuji untuk mengisi aki. Aki yang digunakan untuk proses pengisian memiliki spesifikasi tegangan dan kapasitas masing masing sebesar 6V dan 7Ah. Hal yang perlu diperhatikan adalah bahwa proses pengisian dimulai ketika aki berada dalam persentase 80%.

$$v \left( \frac{km}{jam} \right) = \frac{2\pi n}{60} \times r \times 3.6 \quad (1)$$

$$P (W) = IV \quad (2)$$



**Gambar 3.** Desain Setup Eksperimen Penelitian



**Gambar 4.** Hasil Fabrikasi Setup Eksperimen Penelitian

**Tabel 1.** Desain Eksperimen Penelitian

Variabel Bebas	Level (rpm)	Variabel Terikat	Variabel Kontrol
n (rpm)	659 – 739 rpm	V (V)	$N_w$ (70 lilitan)
atau	840 – 890 rpm	I (A)	$D_w$ (0.6 mm)
$v$ (km/jam)	979 – 1120 rpm	P (W)	$t_{charge}$ (menit)
$N_p$	6 dan 12		

Desain eksperimen dari penelitian ini ditampilkan pada Tabel 1 dimana  $n$  adalah kecepatan putaran motor,  $v$  kecepatan tempuh kendaraan ekuivalen,  $N_p$  adalah jumlah kutub dalam kumparan stator,  $V$  adalah tegangan listrik searah,  $I$  adalah arus listrik searah,  $P$  adalah daya listrik,  $t_{charge}$  adalah waktu pengisian aki dari arus listrik yang dihasilkan,  $N_w$  adalah jumlah lilitan per kutub,  $D_w$  adalah diameter lilitan.

Pengambilan data setiap variasi variabel bebas dilakukan 2 kali untuk memastikan hasil yang reliabel. Karena keterbatasan alat ukur kecepatan putaran, sehingga level  $n$  pada desain eksperimen dalam bentuk rentang. Hasil yang telah didapat kemudian diolah dan dianalisa untuk ditinjau performa yang dihasilkan serta keterkaitan antara variabel bebas dan variabel terikat yang diuji.

### 3 HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengambilan data eksperimen dari penelitian ini ditampilkan pada Tabel 2.

**Tabel 2.** Hasil Pengambilan Data Eksperimen

n (rpm)	$n_{rata}$ (rpm)	$N_p$	Pengukuran ke -	V (V)	I (A)
739.2	739.20	6	1	5.42	1.1
739.2			2	5.01	1.06
711.2	659.65	12	1	6.62	1.32
608.1			2	6.21	1.28
886.1	890.35	6	1	6.91	1.33
894.6			2	7.17	1.41
830.5	840.55	12	1	8.39	1.58
850.6			2	9.5	1.88
978.1	979.70	6	1	9.12	1.83
981.3			2	9.58	1.99
1045.6	1119.80	12	1	12.03	2.38
1194			2	11.24	2.19

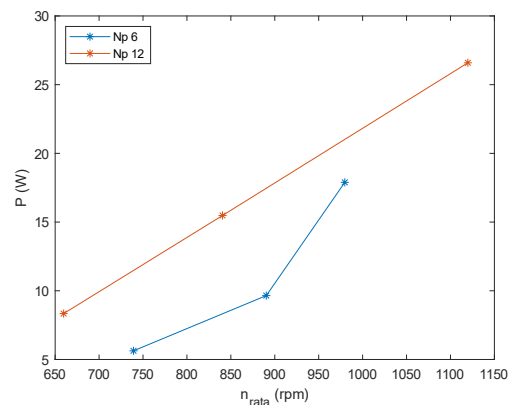
Dari hasil pengukuran tersebut, dihitung kecepatan tempuh ekivalen ( $v$ ), daya listrik ( $P$ ) dari data rata-rata dan waktu pengisian aki ditambahkan sehingga data yang dihasilkan adalah sebagai berikut (Table 3).

Dari tabel tersebut, dibuat grafik sebagai berikut. Dari Tabel 2 dan Gambar 5, dapat diambil informasi bahwa  $V_{rata}$  tertinggi sebesar 11.64 V,  $I_{rata}$  tertinggi sebesar 2.29 A, serta  $t_{charge}$  terendah sebesar 20 menit didapatkan pada variasi  $n_{rata}$  1119.8 rpm yang setara dengan  $v$  sebesar 73.88 km/jam dan  $N_p$  sebesar 12 buah.

Dari Gambar 5 juga, dapat diambil informasi bahwa pada rentang ini, semakin besar kecepatan putaran yang digunakan, daya yang dihasilkan semakin besar. Sedangkan jumlah kutub juga berbanding secara proporsional dengan daya listrik yang dihasilkan.

**Tabel 3.** Hasil Perhitungan Rata-Rata Data

$N_p$	$n_{rata}$ (rpm)	$v$ (km/jam)	$V_{rata}$ (V)	$I_{rata}$ (A)	P (W)	$t_{charge}$ (menit)
6	739.20	48.77	5.22	1.08	5.63	85
12	659.65	43.52	6.42	1.3	8.34	56
6	890.35	58.74	7.04	1.37	9.65	54
12	840.55	55.45	8.95	1.73	15.4	30
6	979.70	64.63	9.35	1.91	17.8	29
12	1119.80	73.88	11.6	2.2	26.5	20



**Gambar 5.** Grafik Pengaruh Kecepatan Putaran Roda Rata Rata dan Jumlah Kutub terhadap Daya Listrik

Hubungan kecepatan putaran dan daya yang dihasilkan dapat dijelaskan melalui Hukum Faraday tentang GGL induksi ( $\epsilon$ ) pada persamaan (3) [14]:

$$\epsilon = -N \frac{d\Phi}{dt} = -N \frac{d(BA \cos \theta)}{dt} \quad (3)$$

Dengan penurunan rumus, dihasilkan persamaan berikut:

$$\epsilon_{puncak} = NBA\omega \quad (4)$$

Dimana  $N$  adalah jumlah lilitan dalam kumparan,  $B$  adalah kekuatan medan magnet,  $A$  adalah luas permukaan loop, dan  $\omega$  adalah kecepatan putaran dalam rad/s. Dari persamaan (4), dapat diambil informasi bahwa nilai  $\epsilon_{puncak}$  yang pada umumnya merupakan tegangan bolak-balik sebanding dengan kecepatan putaran dari magnet rotor. Sedangkan hubungan arus listrik dan tegangan listrik dapat dinyatakan dalam Hukum Ohm pada persamaan (5) dimana arus listrik sebanding dengan tegangan yang dihasilkan dari induksi elektromagnetik. Dari persamaan ini, dapat diambil informasi bahwa semakin besar tegangan listrik, maka arus listrik yang dihasilkan semakin besar. Sehingga, dari kecepatan putaran yang semakin besar, tegangan dan arus listrik

akan semakin besar, dan daya listrik yang dihasilkan pun semakin besar.

$$I = \frac{\varepsilon}{Z} \quad (5)$$

Sedangkan  $V$  yang berbanding secara proporsional terhadap  $N_p$  sejalan dengan sebuah penelitian yang didalamnya menerangkan bahwa hubungan kesebandingan ini hanya berlaku hingga banyaknya pasangan kutub berjumlah 6 atau  $N_p$  sebanyak 12. Sedangkan, jika banyaknya pasangan kutub bertambah lebih dari jumlah tersebut, maka  $V$  akan menurun karena bertambahnya reaktansi internal [15]. Reaktansi internal generator adalah bagian imajiner dari impedansi total generator yang disebabkan oleh induktansi kumparan dan efek medan magnet yang semakin kecil reaktansi internal, semakin besar daya puncak generator dan semakin kecil sudut rotor awal [16].

Untuk mengetahui kontribusi dari tiap variabel bebas, yang dalam hal ini adalah  $N_p$ , dan  $n_{rata}$  terhadap variabel terikat  $P$ , data kemudian dianalisa menggunakan regresi berganda melalui Minitab dengan tingkat kepercayaan 95%, lalu dihasilkan persamaan regresi yang ditampilkan pada persamaan (6), dan hasil lengkap dari metode regresi linier berganda yang ditampilkan pada Tabel 4 - Tabel 6.

$$P = -30.68 + 0.933N_p + 0.042n_{rata} \quad (6)$$

**Tabel 4.** Rekapitulasi Koeffisien Regresi Berganda

Term	Coef	SE Coef	T-Val	P-Val	VIF
Constant	-30.68	5.03	-6.10	0.009	
$N_p$	0.933	0.256	3.64	0.036	1.00
$n_{rata}$	0.04156	0.00508	8.17	0.004	1.00

**Tabel 5.** Ringkasan Model Regresi Berganda

S	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> (adj)	R <sup>2</sup> (pred)
1.88230	96.42%	94.03%	88.99%

**Tabel 6.** Analisis Varian dari Regresi Berganda

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Val	P-Val
Regression	2	286.19	143.093	40.39	0.007
$N_p$	1	47.00	46.996	13.26	0.036
$n_{rata}$	1	236.65	236.651	66.79	0.004
Error	3	10.63	3.543		
Total	5	296.82			

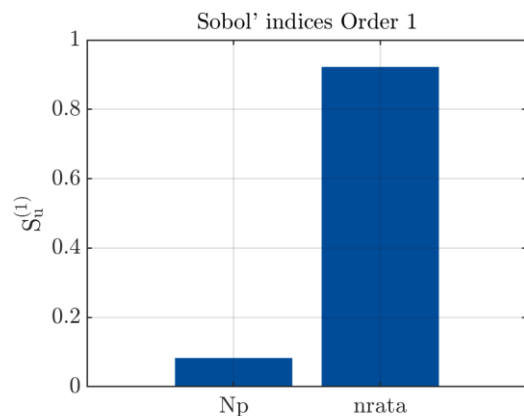
Dari tabel tersebut, dapat diambil informasi bahwa P-Val yang dihasilkan di analisis varian adalah 0.007, atau kurang dari 5%, yang menandakan uji F signifikan, sehingga model regresi yang digunakan layak untuk dianalisis lebih lanjut [17], dan variabel terikat, dalam hal ini  $P$  (daya listrik) dipengaruhi minimal oleh salah satu variabel bebas, baik  $N_p$  ataupun  $n_{rata}$ . Hal ini juga didukung oleh nilai R<sup>2</sup> yang

tinggi berkisar 96.4%, yang menandakan 96.4% dari variasi data  $P$  (daya listrik) dapat dijelaskan oleh parameter  $N_p$  dan  $n_{rata}$  [17]. Dari uji regresi berganda juga, dapat dilihat bahwa T-Val dari  $n_{rata}$  lebih besar, sehingga dapat diambil informasi bahwa pengaruh  $n_{rata}$  terhadap  $P$  (daya listrik) juga besar.

Untuk menganalisis lebih dalam, variabel bebas mana di antara  $N_p$  dan  $n_{rata}$  yang memiliki pengaruh yang lebih besar terhadap variabel terikat  $P$ , maka dilakukanlah analisis sensitivitas global, yang dalam penelitian ini, digunakan Metode Analisis Sensitivitas Berbasis Varian ‘‘Sobol’’. Hal ini dilakukan dengan menghitung indeks sensitivitas orde pertama  $S_i$ , menggunakan persamaan (7) yang menandakan pengaruh individual dari tiap variabel bebas terhadap varian total, dimana  $Var_i$  adalah variansi parsial tiap variabel dan  $Var(Y)$  adalah variansi total tak bersyarat [18]–[20].

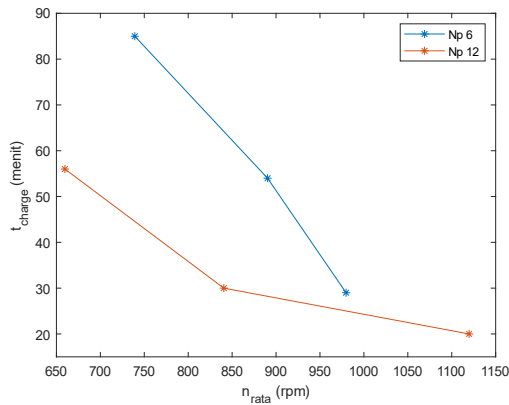
$$S_i = \frac{Var_i}{Var(Y)} \quad (7)$$

Dengan menggunakan Matlab, khususnya Library dari UQLab, total evaluasi model mencapai 40000, dengan fungsi dari persamaan regresi berganda yang didapat sebelumnya, didapatkan hasil berikut. Dari Gambar 6, dapat dilihat bahwa variabel  $n_{rata}$  memiliki indeks sensitivitas yang jauh lebih besar, yang berkisar 0.921265, jika dibandingkan indeks sensitivitas  $N_p$  yang hanya berkisar 0.086598. Hal ini menandakan bahwa pengaruh individual dari  $n_{rata}$  terhadap  $P$  (daya listrik) jauh lebih besar dibandingkan pengaruh dari  $N_p$ . Sehingga, implikasi dari hasil ini adalah bahwa untuk pengembangan selanjutnya, perlu dipertimbangkan agar tidak terlalu berfokus pada penambahan  $N_p$  melebihi jumlah yang ada saat ini karena efeknya tidak terlalu signifikan terhadap peningkatan  $P$ , bahkan menambah berat dari beban yang perlu digerakkan oleh motor penggerak.



**Gambar 6.** Indeks Sensitivitas dari Masing-Masing Variabel Bebas

Selanjutnya,  $t_{charge}$  dari aki berbanding terbalik dengan  $n_{rata}$  dan juga  $N_p$ . Hal ini disebabkan karena semakin besar  $N_p$  ataupun  $n_{rata}$ , arus listrik yang dihasilkan semakin besar, sehingga waktu pengisian dari aki semakin sedikit.



**Gambar 7.** Grafik Pengaruh Kecepatan Putaran Roda Rata Rata dan Jumlah Kutub terhadap Waktu Pengisian Aki

#### 4 KESIMPULAN

Dari penelitian yang telah dilakukan, dapat diambil kesimpulan bahwa dapat disimpulkan bahwa tegangan dan arus tertinggi, serta waktu pengisian aki terendah dihasilkan pada kombinasi jumlah kutub kumparan stator dan kecepatan putaran tertinggi, yaitu masing-masing berjumlah 12 kutub dan 1119.8 rpm atau setara dengan kecepatan tempuh ekuivalen sebesar 73.88 km/jam. Tegangan dan arus listrik berbanding proporsional terhadap jumlah kutub stator dan kecepatan putaran roda, serta berbanding terbalik terhadap waktu pengisian aki. Dari penelitian ini juga dapat disimpulkan bahwa kecepatan putaran roda jauh lebih berpengaruh terhadap daya yang dihasilkan dibandingkan penambahan kutub kumparan stator.

Sehingga, saran untuk pengembangan kedepannya adalah tidak berfokus lagi pada penambahan kutub dari kumparan stator yang tidak terlalu signifikan dalam peningkatan daya, bahkan dapat menambah berat beban yang digerakkan mesin. Namun, peningkatan yang dapat dilakukan adalah dalam hal penambahan *boost converter* yang merupakan pengkonversi DC-DC yang bekerja berdasarkan prinsip *switching* dan dapat menaikkan tingkat tegangan [21]. Hal lain yang dapat dikembangkan adalah dalam hal optimasi kumparan stator yang digunakan, serta pengambilan data dengan mengimplementasikan secara langsung roda pada kendaraan listrik agar prototipe yang telah dibuat mampu dimanfaatkan dalam kondisi riil di jalan.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih, penulis ucapkan kepada seluruh pihak yang telah membantu keberlangsungan penelitian ini.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] N. M. A. Wijaya, I. N. S. Kumara, And Y. Divayana, "Perkembangan Baterai Dan Charger Untuk Mendukung Pemasayarakatan Sepeda Listrik Di Indonesia," *J. Spektrum; Vol 8 No 1 J. Spektrumdo* - 10.24843/Spektrum.2021.V08.I01.P3, Mar. 2021, [Online]. Available: <https://Ojs.Unud.Ac.Id/Index.Php/Spektrum/Article/View/71605>
- [2] Kemenperin Republik Indonesia, "Upaya Pemerintah Pada Pertumbuhan Industri Kendaraan Listrik."
- [3] I. P. Agus Surya Adi P, I. N. Satya Kumara, And I. G. A. P. Raka Agung, "Status Perkembangan Sepeda Listrik Dan Motor Listrik Di Indonesia," *J. Spektrum; Vol 8 No 4 J. Spektrumdo* - 10.24843/Spektrum.2021.V08.I04.P2, Jan. 2022, [Online]. Available: <https://Ojs.Unud.Ac.Id/Index.Php/Spektrum/Article/View/82025>
- [4] M. G. Say And G. R. Jones, "2 - Electrotechnology," M. A. Laughton And D. J. B. T.-E. E. R. B. (Sixteenth E. Warne, Eds., Oxford: Newnes, 2003, Pp. 2–30. Doi: <https://doi.org/10.1016/B978-075064637-6/50002-2>.
- [5] N. T. Nguyen, H. V Ho, S.-T. Hong, And F. Bien, "Smart In-Wheel Generator Using Adaptive Dc-Dc Converter For Rechargeable Batteries In Electric Vehicles," *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, Vol. 15, No. 6, Pp. 1009–1013, 2014, Doi: 10.1007/S12541-014-0429-3.
- [6] E. T. Vitug *Et Al.*, "Harvesting Electrical Energy Using Alternator Installed In Rolling Store Side Wheel," *Int. Res. J. Mod. Eng. Technol. Sci.*, 2024, Doi: 10.56726/Irjmets48466.
- [7] B. Manikandan, S. Jamunarani, K. Keerthana, And B. Saravanan, "Electricity Generation From Vehicle Wheel," In *2021 Innovations In Power And Advanced Computing Technologies (I-Pact)*, 2021, Pp. 1–6. Doi: 10.1109/I-Pact52855.2021.9696740.
- [8] H. Prasad, V. Gupta, V. Babu, R. Pachauri, And A. Gupta, *Self Power Generation In Electric Vehicles Using Driving Wheel*. 2023. Doi: 10.1109/Incet57972.2023.10170709.
- [9] I. Agustiawan And D. Aji, "Pemanfaatan Putaran Roda Sepeda Guna Menghasilkan Energi Listrik," In *Seminar. Nasional-Xvii Rekayasa Dan Apl. Tek. Mesin Di Indonesia*, Bandung, 2018, Pp. 57–62.
- [10] N. D. Pratiwi, R. Muhammad, And A. Fiatno, "Analysis Of The Use Of Generators And Rectifier Regulators As Additional Charging Systems For Bldc-Based Electric Bicycles," *J. Eng. Sci. Technol. Manag.*, Vol. 3, No. 2 Series-Articles, Pp. 77–82, Sep. 2023, Doi: 10.31004/Jestm.V3i2.114.
- [11] I. Umarella, "Desain Pembangkit Listrik Dengan Analisis Performa Prototipe Sistem Pembangkit Daya Listrik Terintegrasi pada Roda Kendaraan Listrik

- Memanfaatkan Putaran Mesin Ke Roda Belakang Sepeda Motor,” *Mechonversio Mech. Eng. J.*, vol. 2, p. 1, Dec. 2020, doi: 10.51804/mmej.v2i1.816.
- [12] F. M. Dewadi, “Efisiensi Pada Sepeda Listrik Dengan Dinamo Sepeda Sebagai Generator,” *J. Sains, Teknol. Masy. dan Jejaring*, vol. 4, no. 1, p. 13, 2021, doi: 10.24167/praxis.v4i1.3215.
- [13] K. Deepak, M. A. Frikha, Y. Benômar, M. El Baghdadi, and O. Hegazy, “In-Wheel Motor Drive Systems for Electric Vehicles: State of the Art, Challenges, and Future Trends,” *Energies*, vol. 16, no. 7, 2023. doi: 10.3390/en16073121.
- [14] P. Kinsler, “Faraday’s Law and Magnetic Induction: Cause and Effect, Experiment and Theory,” *Physics*, vol. 2, no. 2. pp. 150–163, 2020. doi: 10.3390/physics2020009.
- [15] X. Zhang *et al.*, “Permeance Analysis and Calculation of the Double-Radial Rare-Earth Permanent Magnet Voltage-Stabilizing Generation Device,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 23939–23947, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2792448.
- [16] L. L. Grigsby, *Power system stability and control, third edition*. CRC Press, 2016. doi: 10.4324/b12113.
- [17] A. F. Siegel, “Chapter 12 - Multiple Regression: Predicting One Variable from Several Others,” A. F. B. T.-P. B. S. (Sixth E. Siegel, Ed., Boston: Academic Press, 2012, pp. 347–416. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385208-3.00012-2>.
- [18] M. Tosin, A. M. A. Côrtes, and A. Cunha, “A Tutorial on Sobol’ Global Sensitivity Analysis Applied to Biological Models BT - Networks in Systems Biology: Applications for Disease Modeling,” F. A. B. da Silva, N. Carels, M. Trindade dos Santos, and F. J. P. Lopes, Eds., Cham: Springer International Publishing, 2020, pp. 93–118. doi: 10.1007/978-3-030-51862-2\_6.
- [19] A. Van Schepdael, A. Carlier, and L. Geris, “Sensitivity Analysis by Design of Experiments BT - Uncertainty in Biology: A Computational Modeling Approach,” L. Geris and D. Gomez-Cabrero, Eds., Cham: Springer International Publishing, 2016, pp. 327–366. doi: 10.1007/978-3-319-21296-8\_13.
- [20] E. G. Goh and K. Noborio, “Sensitivity Analysis Using Sobol’ Variance-Based Method on the Haverkamp Constitutive Functions Implemented in Richards’ Water Flow Equation,” *Malaysian J. Soil Sci.*, vol. 18, pp. 19–33, Dec. 2014.
- [21] A. Mansouri, R. Gavagsaz-Ghoachani, M. Phattanasak, and S. Pierfederici, “Nonlinear Cascaded Control for a DC-DC Boost Converter,” *J. Robot. Control (JRC); Vol 4, No 4 (2023)DO - 10.18196/jrc.v4i4.18932*, Aug. 2023, [Online]. Available: <https://journal.umy.ac.id/index.php/jrc/article/view/18932/8515>