



Optimasi Parameter *Electromagnetic Regenerative Shock Absorber (ERSA)* untuk Pemanenan Energi Listrik pada Suspensi Belakang Toyota Avanza

Parameter Optimization of an Electromagnetic Regenerative Shock Absorber (ERSA) for Electrical Energy harvesting on the Rear Suspension of a Toyota Avanza

Agus prayuda^{1*}, Dwi sudarno putra¹, Donny Fernandez¹, Wawan Purwanto¹, Jheri Hermanto²

Abstrak

Pemanfaatan energi getaran pada suspensi kendaraan merupakan salah satu strategi untuk mengurangi ketergantungan terhadap sumber energi fosil. Penelitian ini bertujuan mengoptimalkan pembangkitan energi listrik *Electromagnetic Regenerative Shock absorber (ERSA)* pada suspensi belakang Toyota Avanza menggunakan metode *Taguchi*. Tiga faktor diuji, yaitu jumlah lilitan kumparan (1500–2500 lilitan), diameter kawat (0,2–0,4 mm), dan *air gap* (2–6 mm) dengan *orthogonal array L9* dan kriteria *larger-the-better* terhadap tegangan keluaran. Hasil analisis S/N dan ANOVA menunjukkan bahwa jumlah lilitan dan diameter kawat berkontribusi masing-masing 55,10% dan 38,96% terhadap variasi tegangan, sedangkan pengaruh *air gap* relatif kecil. Kombinasi optimum A3B3C3 (2500 lilitan, kawat 0,4 mm, *air gap* 6 mm) menghasilkan tegangan verifikasi 5,30 V dengan galat 5% terhadap prediksi model. Temuan ini mengindikasikan bahwa ERSA berpotensi dimanfaatkan sebagai sistem *energy harvesting* berdaya rendah bila dikombinasikan dengan rangkaian penyimpan dan pengkondisi daya.

Kata Kunci

Electromagnetic Regenerative Shock absorber; energy harvesting; metode Taguchi; suspensi otomotif; magnet neodymium.

Abstract

Harvesting vibration energy from vehicle suspensions is a strategy to reduce dependence on fossil-fuel electricity. This study aims to optimize the electrical output of an Electromagnetic Regenerative Shock absorber (ERSA) installed on the rear suspension of a Toyota Avanza using the Taguchi method. Three control factors were investigated number of coil turns (1500–2500 turns), wire diameter (0.2–0.4 mm), and air gap (2–6 mm) arranged in an L9 orthogonal array with a larger-the-better criterion for output voltage. Signal-to-noise and ANOVA analyses indicate that coil turns and wire diameter contribute 55.10% and 38.96% of the voltage variation, whereas the influence of air gap is small. The optimal combination A3B3C3 (2500 turns, 0.4-mm wire, 6-mm air gap) yields a verification voltage of 5.30 V with a 5% error relative to the predicted response. These findings show that ERSA has potential as a low-power automotive energy-harvesting system when combined with power-conditioning and storage circuits.

Keywords

Electromagnetic Regenerative Shock absorber; energy harvesting; Taguchi method; automotive suspension; neodymium magnet.

¹ Departemen Teknik Otomotif, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Padang
Jln. Prof. Dr. Hamka, Air Tawar, Padang Sumatera Barat, Indonesia

² Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Riau
Kampus Bina Widya KM. 12,5, Simpang Baru, Pekanbaru, 28293

* agusprayuda28@gmail.com

Dikirimkan: 31 Juli 2024. Diterima: 23 Agustus 2025. Diterbitkan: 5 Desember 2025.



PENDAHULUAN

Perkembangan industri otomotif yang sangat pesat berkontribusi langsung terhadap peningkatan konsumsi energi, khususnya energi fosil. Secara global maupun di Indonesia, ketergantungan pada bahan bakar minyak menimbulkan tekanan serius terhadap ketersediaan energi karena cadangan minyak bumi dan sumber fosil lain terus menurun [1]. Berdasarkan data Korlantas Polri hingga 9 Februari 2023, jumlah kendaraan bermotor yang beroperasi di Indonesia mencapai 153.400.392 unit [2]. Peningkatan jumlah kendaraan ini tidak diimbangi dengan ketersediaan cadangan energi; cadangan minyak bumi Indonesia bahkan diperkirakan habis dalam waktu sekitar 12 tahun sejak 2018, sementara cadangan gas alam diproyeksikan habis dalam 50 tahun dan batubara dalam 76 tahun [2]. Kondisi tersebut menuntut strategi pemanfaatan energi yang lebih efisien dan ramah lingkungan.

Kebijakan energi global juga mendorong pengurangan emisi dan penggunaan teknologi yang mampu menekan konsumsi bahan bakar kendaraan. Program penelitian yang dikembangkan oleh *Center for Energy Transportation and Environment (CETE)* menunjukkan bahwa kendaraan konvensional hanya menyalurkan sekitar 16% energi bahan bakar menjadi tenaga gerak, sedangkan sebagian besar energi lainnya hilang sebagai panas dan getaran [3]. Salah satu pendekatan untuk memanfaatkan energi yang terbuang tersebut adalah konsep *vehicle energy harvesting (VEH)*, yaitu pemanenan energi dari getaran kendaraan, terutama pada sistem suspensi. Dalam konteks ini, *Electromagnetic Regenerative Shock absorber (ERSA)* dikembangkan sebagai sistem suspensi yang tidak hanya meredam guncangan, tetapi juga mengonversi energi mekanik menjadi energi listrik.

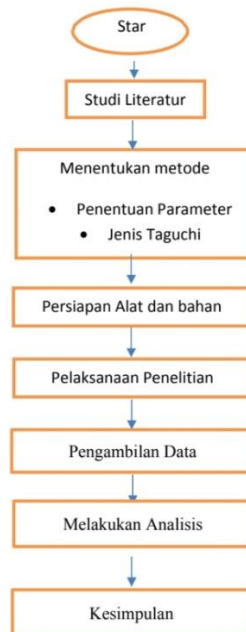
Secara umum, sistem suspensi berfungsi menyerap getaran dan guncangan dari permukaan jalan yang tidak rata, sekaligus menjaga kontak optimal antara ban dan permukaan jalan guna meningkatkan stabilitas dan pengendalian kendaraan [4]. Di dalam sistem ini, pegas berperan sebagai elemen elastis yang memungkinkan kendaraan kembali ke posisi semula setelah menerima beban [5], sedangkan *shock absorber* bertugas meredam guncangan dan mendispersikan energi kinetik yang timbul selama kendaraan bergerak [6]. Prinsip kerja ERSA memanfaatkan gerak relatif komponen suspensi untuk menginduksikan gaya gerak listrik melalui interaksi medan magnet dan kumparan konduktor. Medan magnet sendiri merupakan konsep fundamental dalam fisika yang berperan penting dalam proses induksi elektromagnetik dan banyak aplikasi teknologi modern [7].

Penelitian sebelumnya mengenai ERSA berbasis magnet neodimium menunjukkan bahwa tegangan bangkitan yang dihasilkan masih relatif rendah, yakni sekitar 195,6 mV, sehingga belum memadai untuk aplikasi praktis sebagai sumber energi tambahan kendaraan. Keterbatasan tersebut membuka peluang penelitian lanjutan yang berfokus pada optimasi parameter desain ERSA agar energi listrik yang dihasilkan meningkat secara signifikan. Dalam penelitian ini, pengembangan ERSA diterapkan pada suspensi belakang Toyota Avanza. Kendaraan ini dipilih karena merupakan salah satu mobil penumpang yang banyak digunakan di Indonesia, dengan karakteristik suspensi belakang yang menerima beban dinamis cukup besar selama operasi, sehingga potensial sebagai sumber energi getaran yang dapat dipanen.

Penelitian ini bertujuan mengoptimalkan kinerja *Electromagnetic Regenerative Shock absorber* berbasis magnet neodimium pada suspensi belakang Toyota Avanza melalui penentuan kombinasi terbaik jumlah lilitan kumparan tembaga, diameter kawat, dan celah udara (*air gap*). Optimasi dilakukan agar tegangan bangkitan yang dihasilkan meningkat dan berpotensi dimanfaatkan sebagai sumber energi untuk menyalakan lampu penerangan area *car port* maupun lampu darurat (*emergency*) ketika kendaraan mengalami kendala di perjalanan. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi terhadap pengembangan teknologi pemanenan energi pada kendaraan sekaligus mendukung upaya penghematan energi dan pengurangan emisi dari sektor transportasi.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen dengan pendekatan *Taguchi* untuk mengoptimalkan kinerja *Electromagnetic Regenerative Shock absorber* (ERSA) pada suspensi belakang Toyota Avanza. Metode *Taguchi* dipilih karena mampu meningkatkan kualitas produk dan proses sekaligus meminimalkan pengaruh *noise* melalui perancangan parameter yang *robust* [8]. Alur penelitian meliputi studi literatur, penentuan metode dan parameter, persiapan alat dan bahan, pelaksanaan eksperimen, pengambilan data, analisis *Taguchi*, serta penarikan kesimpulan, sebagaimana digambarkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Alur Penelitian

Studi literatur dilakukan untuk mengkaji konsep sistem suspensi, karakteristik medan magnet, prinsip kerja ERSA, serta penerapan metode *Taguchi* pada optimasi parameter elektromagnetik. Kajian ini menjadi landasan dalam merumuskan masalah, menentukan faktor kendali, dan menetapkan rentang level yang digunakan pada eksperimen. Berdasarkan hasil kajian dan penelitian terdahulu, dirumuskan tujuan penelitian, yaitu mengoptimalkan arus bangkitan ERSA dengan memvariasikan jumlah lilitan kumparan, diameter kawat, dan jarak *air gap* antara magnet neodmium dan kumparan. Kombinasi faktor kendali dan level yang digunakan dirangkum pada Tabel 1.

Tabel 1. Parameter kendali

	Kode	1	2	3
A	Banyak gulungan	1500	2000	2500
B	Diameter kawat	0,2	0,3	0,4
C	<i>Air gap</i>	2	4	6

Perancangan percobaan menggunakan *orthogonal array Taguchi* L9, sehingga sembilan kombinasi eksperimen cukup untuk merepresentasikan seluruh pengaruh utama faktor A, B, dan C terhadap tegangan bangkitan ERSA. Setiap kombinasi dijalankan dengan tiga kali

pengulangan (R1, R2, R3) untuk memperoleh data yang reliabel. Struktur *orthogonal array* yang digunakan ditunjukkan pada [Tabel 2](#).

Tabel 2. *Orthogonal array Taguchi L9 untuk pengujian tegangan*

Eksperimen	Faktor			Voltase hasil Pengukuran			Rata-rata	SNR	Stdev
	A	B	C	R1	R2	R3			
1	1	1	1						
2	1	2	2						
3	1	3	3						
4	2	1	2						
5	2	2	3						
6	2	3	1						
7	3	1	3						
8	3	2	2						
9	3	3	1						

Prosedur eksperimen diawali dengan persiapan alat dan bahan. Mobil Toyota Avanza disiapkan dalam kondisi standar, kemudian *shock absorber* belakang dilepas pelindung debunya untuk pemasangan modul ERSA. Dudukan berbahan pelat tipis dibuat pada bagian tengah *shock absorber* sebagai tempat pemasangan magnet neodmium, sedangkan koker kumparan dibentuk dari pipa paralon berdiameter 1,5 inci dengan *end cap* sebagai batas gulungan. Kumparan tembaga digulung pada koker sepanjang 10 cm dengan panjang efektif gulungan 6 cm, dan kombinasi jumlah lilitan, diameter kawat, serta *air gap* diatur sesuai level pada [Tabel 1](#) dan konfigurasi L9 pada [Tabel 2](#). Di bagian luar kumparan dipasang rangkaian penyearah dan *loading* berupa lampu darurat (*emergency lamp*) yang sekaligus mensimulasikan pemanfaatan energi untuk penerangan *carport*.

Seluruh komponen ERSA yang telah dirakit kemudian dipasang pada suspensi belakang Toyota Avanza dan diuji menggunakan *vibration test rig* di Workshop Teknik Otomotif, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Padang. Kendaraan dinaikkan pada alat uji getar, kemudian *vibration test* diaktifkan untuk mensimulasikan gerakan naik-turun suspensi sesuai kondisi operasi aktual. Tegangan induksi yang dihasilkan ERSA pada setiap kombinasi faktor diukur menggunakan osiloskop digital. Keluaran osiloskop direkam melalui *flash disk* dan ditransfer ke komputer untuk dianalisis lebih lanjut.

Data tegangan hasil pengukuran untuk setiap eksperimen (R1–R3) dihitung nilai rata-ratanya dan dikonversi menjadi *Signal-to-noise ratio* (SNR) dengan karakteristik *larger-the-better* sesuai formulasi *Taguchi*. Nilai SNR dan rata-rata respon kemudian digunakan untuk menghitung efek faktor utama serta menentukan kombinasi level optimal yang menghasilkan tegangan bangkitan tertinggi. Selanjutnya dilakukan analisis *analysis of variance* (ANOVA) untuk menguji signifikansi pengaruh masing-masing faktor dan menghitung kontribusi persentase tiap faktor terhadap variasi respon. Hasil analisis divisualisasikan dalam bentuk *main effect plot* dan grafik respon lainnya untuk mendukung interpretasi temuan penelitian.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil

Berdasarkan eksperimen *Electromagnetic Regenerative Shock absorber* (ERSA) pada suspensi belakang Toyota Avanza dengan rancangan *orthogonal array Taguchi* L9, tegangan keluaran yang dihasilkan pada setiap kombinasi faktor dan level disajikan pada [Tabel 3](#). Tabel

ini memuat kombinasi faktor jumlah lilitan (A), diameter kawat (B), dan *air gap* (C) beserta tiga kali pengulangan pengukuran (R1–R3), nilai rata-rata, *signal-to-noise ratio* (SNR) tipe *larger-the-better*, dan simpangan baku.

Tabel 3. Hasil pengujian tegangan

Eksperimen	Pengujian tegangan						Rata-rata	SNR	Stdev
	Faktor			Voltase hasil Pengukuran					
	A	B	C	R1	R2	R3			
1	1	1	1	0,56	0,6	0,58	0,58	-5,44	0,02
2	1	2	2	0,87	0,86	0,86	0,86	-1,38	0,01
3	1	3	3	1,06	1,1	1,07	1,08	0,41	0,02
4	2	1	2	0,9	0,89	0,89	0,89	-1,07	0,01
5	2	2	3	1,14	1,13	1,18	1,15	0,96	0,03
6	2	3	1	1,28	1,3	1,32	1,30	2,13	0,02
7	3	1	3	1,18	1,18	1,23	1,20	1,30	0,03
8	3	2	2	1,3	1,32	1,32	1,31	2,28	0,01
9	3	3	1	1,6	1,67	1,62	1,63	4,07	0,4

Dari **Tabel 3** terlihat bahwa rata-rata tegangan keluaran ERSA meningkat dari 0,58 V pada kombinasi faktor $A_1B_1C_1$ (Eksperimen 1) menjadi 1,63 V pada kombinasi $A_3B_3C_1$ (Eksperimen 9). Nilai SNR tertinggi juga diperoleh pada Eksperimen 9 (4,07 dB), menunjukkan bahwa kombinasi tersebut menghasilkan tegangan paling tinggi sekaligus paling stabil dibanding kombinasi lainnya. Nilai simpangan baku seluruh eksperimen relatif kecil (0,01–0,03), kecuali Eksperimen 9 yang mencapai 0,40, namun masih dalam batas yang dapat diterima untuk pengukuran eksperimental.

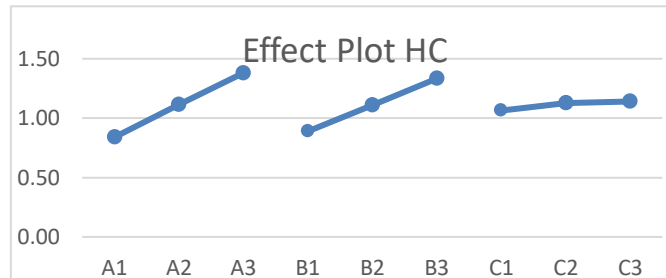
Respon rata-rata tegangan untuk setiap level faktor dihitung berdasarkan nilai SNR guna mengidentifikasi kecenderungan pengaruh faktor A, B, dan C. Ringkasan perhitungan respon per level disajikan pada **Tabel 4**.

Tabel 4. Respon rata-rata tegangan per level faktor

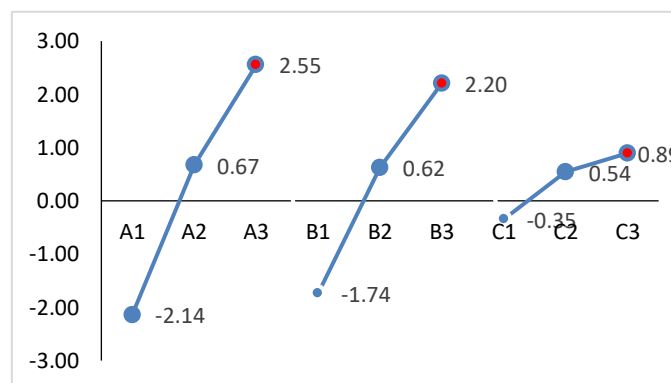
Eksperimen	Faktor		
	A	B	C
Level 1	0,84	0,89	1,06
Level 2	1,11	1,11	1,13
Level 3	1,38	1,34	1,14
Max	1,38	1,34	1,14
Min	0,84	0,89	1,06
Diff	0,54	0,45	0,08
Rank	1	2	3
Optimal	A3	B3	C3

Tabel 4 menunjukkan bahwa rentang perubahan respon (Diff) terbesar terdapat pada faktor jumlah lilitan (A) yaitu 0,54, diikuti diameter kawat (B) sebesar 0,45, sedangkan *air gap* (C) hanya 0,08. Hal ini mengindikasikan bahwa variasi jumlah lilitan memberikan pengaruh paling besar terhadap kenaikan tegangan, diikuti oleh diameter kawat, sementara *air gap* relatif kurang berpengaruh. Kombinasi level optimum yang diusulkan oleh analisis *Taguchi* adalah $A_3B_3C_3$, yaitu 2.500 lilitan, diameter kawat 0,4 mm, dan *air gap* 6 mm.

Visualisasi pengaruh perubahan level tiap faktor terhadap respon tegangan disajikan pada *effect plot* pada Gambar 2. Grafik tersebut mengkonfirmasi hasil Tabel 4, di mana kurva faktor A dan B menunjukkan kemiringan yang tajam dari level 1 ke level 3, sedangkan kurva faktor C hampir datar. Gambar 3 menampilkan *effect plot* berdasarkan nilai SNR, dan menunjukkan pola yang konsisten: peningkatan level A dan B secara bertahap meningkatkan nilai SNR, sementara perubahan level C hanya sedikit mengubah SNR.



Gambar 2. HC



Gambar 3. Effect plot dari S/N Tegangan

Untuk mengkuantifikasi kontribusi masing-masing faktor terhadap variasi tegangan keluaran, dilakukan analisis ragam (ANOVA). Hasil perhitungan ANOVA disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Perhitungan ANOVA tegangan keluaran ERSA

Tabel ANOVA						
Sumber	SS	DF	Ms	Fratio	SS'	Ratio(%)
A	33,39	2	16,69484	16,31	16,30882	55,10
B	23,60	2	11,8023	11,42	11,41629	38,96
C	2,44	2	1,220989	0,83	0,834973	4,03
e	1,16	3	0,386016			1,91
SSt	60,59430399					

Berdasarkan Tabel 5, faktor jumlah lilitan (A) menyumbang 55,10% variasi tegangan, diikuti faktor diameter kawat (B) sebesar 38,96%. Faktor *air gap* (C) hanya berkontribusi 4,03%, sedangkan error eksperimental 1,91%. Dengan demikian, lebih dari 94% variasi respon dapat dijelaskan oleh perubahan jumlah lilitan dan diameter kawat.

Signifikansi statistik masing-masing faktor diuji menggunakan uji F pada taraf signifikansi 5%. Hasil perbandingan antara nilai F-ratio dan F-tabel disajikan pada Tabel 6.

Tabel 6. Hasil uji F

Perbandingan F ratio dengan F tabel				
Faktor	F ratio	Simbol	F tabel	Keterangan
A	16,31	\geq	9,55	Berpengaruh
B	11,42	\geq	9,55	Berpengaruh
C	0,83	\leq	9,55	Tidak Berpengaruh

Tabel 6 menunjukkan bahwa faktor A dan B memiliki nilai F-ratio yang lebih besar dari F-tabel (9,55), sehingga berpengaruh signifikan terhadap tegangan keluaran ERSA. Sebaliknya, faktor C memiliki F-ratio yang lebih kecil dari F-tabel sehingga dinyatakan tidak signifikan secara statistik.

Sebagai langkah akhir, dilakukan uji verifikasi dengan mengaplikasikan kombinasi parameter optimum yang diperoleh dari analisis *Taguchi* ($A_3B_3C_3$) dan membandingkan hasil eksperimen dengan nilai tegangan yang diprediksi model. Hasil verifikasi disajikan pada Tabel 7.

Tabel 7. Hasil verifikasi kombinasi parameter optimum

Parameter	Nilai
Prediksi	5,25
Eksperimental	5,30

Dari Tabel 7 terlihat bahwa nilai tegangan eksperimental (5,30) berada sangat dekat dengan nilai prediksi (5,25) dengan selisih 5%. Perbedaan yang relatif kecil ini menunjukkan bahwa model *Taguchi* yang digunakan mampu memprediksi respon tegangan ERSA dengan akurasi yang baik. Secara keseluruhan, hasil ini mengonfirmasi bahwa kombinasi 2.500 lilitan, diameter kawat 0,4 mm, dan *air gap* 6 mm merupakan konfigurasi yang paling optimal untuk meningkatkan tegangan bangkitan *Electromagnetic Regenerative Shock absorber* pada suspensi belakang Toyota Avanza.

Pembahasan

Hasil eksperimen menunjukkan bahwa kinerja *Electromagnetic Regenerative Shock absorber* (ERSA) sangat dipengaruhi oleh kombinasi parameter jumlah lilitan kumparan, diameter kawat tembaga, dan celah udara (*air gap*) antara magnet dan kumparan. Secara teoritis, peningkatan jumlah lilitan memperbesar gaya gerak listrik induksi sesuai hukum Faraday, sedangkan diameter kawat menentukan resistansi internal kumparan dan kemampuan hantar arus; *air gap* memengaruhi kerapatan fluks magnetik pada jalur rangkaian magnet. Temuan ini sejalan dengan berbagai kajian mengenai *energy-regenerative suspension* yang menegaskan bahwa optimasi parameter elektromagnetik merupakan kunci peningkatan densitas daya pada sistem suspensi energi-regeneratif [9][10][11][12].

Tabel 3 menyajikan hasil pengujian tegangan untuk sembilan kombinasi level faktor pada *orthogonal array* L9. Tegangan rata-rata terendah, sebesar 0,58 V, dihasilkan oleh konfigurasi A1B1C1 (1.500 lilitan, diameter kawat 0,2 mm, *air gap* 2 mm), sedangkan tegangan tertinggi, 1,63 V, diperoleh pada konfigurasi A3B3C1 (2.500 lilitan, diameter kawat 0,4 mm, *air gap* 2 mm). Peningkatan tegangan yang konsisten dari eksperimen 1 sampai eksperimen 9 menunjukkan bahwa penambahan jumlah lilitan dan penggunaan kawat berdiameter lebih besar mampu meningkatkan tegangan bangkitan secara signifikan, sementara variasi *air gap* pada rentang 2–6 mm memberikan pengaruh relatif kecil. Nilai standar deviasi yang rendah (0,01–0,04) pada setiap eksperimen mengindikasikan bahwa proses pengukuran cukup stabil

dan replikasi pengujian dapat diandalkan, sebagaimana juga dilaporkan pada pengujian *energy-harvesting damper* di penelitian sebelumnya [9][10][11].

Analisis respon kualitas berbasis rasio *signal-to-noise* (S/N) pada Tabel 4 dan *effect plot* pada Gambar 2 dan Gambar 3 memperjelas kontribusi masing-masing faktor. Perbedaan (*diff*) nilai rata-rata respon S/N antara level maksimum dan minimum untuk faktor A (jumlah lilitan) mencapai 0,54, diikuti faktor B (diameter kawat) sebesar 0,45, sedangkan faktor C (*air gap*) hanya 0,08. Hal ini mengindikasikan bahwa perubahan jumlah lilitan memberikan pengaruh paling dominan terhadap peningkatan tegangan, disusul oleh diameter kawat, sementara *air gap* dalam rentang yang diuji relatif tidak sensitif. Pola tersebut konsisten dengan hasil simulasi dan pengujian *energy-harvesting damper* serta *regenerative shock absorber* lain yang melaporkan sensitivitas tinggi terhadap geometri kumparan dan konfigurasi magnet, dibandingkan perubahan parameter geometrik kecil di jalur fluks magnet [10][11][12][13].

Hasil *Analysis of variance* (ANOVA) pada Tabel 5 mengkuantifikasi kontribusi masing-masing faktor terhadap variasi tegangan bangkitan. Faktor A (jumlah lilitan) memberikan kontribusi terbesar, yaitu 55,10% terhadap total variasi, diikuti faktor B (diameter kawat) sebesar 38,96%, sedangkan faktor C (*air gap*) hanya 4,03%; sisanya (1,91%) berasal dari galat eksperimental. Uji F pada Tabel 6 menunjukkan bahwa nilai *F ratio* untuk faktor A (16,31) dan B (11,42) lebih besar daripada *F tabel* (9,55), sehingga keduanya berpengaruh signifikan secara statistik, sedangkan faktor C dengan *F ratio* 0,83 dinyatakan tidak berpengaruh signifikan. Pola kontribusi ini sejalan dengan studi sensitivitas parameter pada *energy-harvesting shock absorber* yang menegaskan bahwa geometri kumparan dan konfigurasi magnet merupakan faktor penentu, sementara *air gap* baru menjadi kritis ketika mencapai nilai yang jauh lebih besar sehingga menyebabkan kebocoran fluks signifikan [11][12][13].

Berdasarkan analisis respon dan *effect plot*, kombinasi optimum yang diperoleh adalah A3B3C3, yaitu jumlah lilitan 2.500, diameter kawat 0,4 mm, dan *air gap* 6 mm, sebagaimana dirangkum pada baris "Optimal" di Tabel 4. Konfigurasi ini memaksimalkan energi magnetik yang terinduksi sekaligus meminimalkan kerugian resistif pada kumparan. Hasil ini sejalan dengan rancangan *electromagnetic regenerative damper* dan *ball-screw energy harvester* yang menekankan pentingnya peningkatan jumlah lilitan dan penurunan resistansi kumparan untuk mencapai densitas daya yang lebih tinggi tanpa mengorbankan karakteristik redaman suspensi [14][15][16][17].

Validasi terhadap kombinasi optimum dilakukan melalui pengujian verifikasi yang dirangkum pada Tabel 7. Tegangan prediksi berdasarkan metode *Taguchi* adalah 5,25 V, sedangkan hasil eksperimen aktual mencapai 5,30 V, dengan selisih galat hanya 5%. Deviasi yang relatif kecil ini menunjukkan bahwa model *Taguchi* dengan *orthogonal array* L9 mampu merepresentasikan karakteristik sistem secara memadai dan dapat digunakan sebagai dasar perancangan awal ERSA tanpa memerlukan jumlah eksperimen yang sangat banyak. Pendekatan serupa juga digunakan pada pemanen energi berbasis suspensi kendaraan dan sistem rel kereta yang mengoptimalkan parameter desain melalui *design of experiments* untuk memaksimalkan daya keluaran dengan jumlah percobaan yang efisien [17][18].

Secara aplikatif, tegangan optimum yang dihasilkan dari konfigurasi A3B3C3 berpotensi dimanfaatkan untuk menyuplai beban kelistrikan berdaya rendah, seperti lampu *emergency* atau sistem sensor pada kendaraan, terutama jika diintegrasikan dengan rangkaian penyearah dan penyimpan energi seperti *supercapacitor* atau baterai. Studi sebelumnya menunjukkan bahwa *regenerative shock absorber* dengan integrasi penyimpanan energi mampu memasok kebutuhan daya untuk perangkat bantu kendaraan, bahkan pada kendaraan listrik dan *driverless buses* [15][16]. Temuan penelitian ini memperkuat bukti bahwa ERSA berbasis suspensi belakang Toyota Avanza dapat berperan sebagai solusi *retrofit* yang memanfaatkan

energi vibrasi yang sebelumnya terbuang, sehingga berkontribusi pada efisiensi energi transportasi darat dan pengurangan ketergantungan pada sumber daya fosil [9][15][16].

Di sisi lain, meskipun tegangan hasil pengujian masih belum cukup untuk mengoperasikan beban daya menengah secara langsung, tren peningkatan tegangan yang jelas pada kombinasi parameter optimum menunjukkan adanya ruang pengembangan lanjutan. Integrasi rancangan mekanis yang lebih efisien, sistem transmisi seperti *mechanical motion rectifier*, serta pengendali cerdas yang mengatur karakteristik redaman sekaligus memaksimalkan regenerasi energi sebagaimana banyak dikaji pada sistem suspensi energi-regeneratif modern berpotensi meningkatkan lagi keluaran daya tanpa mengorbankan kenyamanan berkendara [14][17][18]. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya mengidentifikasi kombinasi parameter kumparan yang paling efektif untuk meningkatkan tegangan ERSA, tetapi juga memberikan landasan empiris bagi pengembangan lebih lanjut sistem suspensi otomotif yang mampu memanen energi getaran secara lebih efisien.

SIMPULAN DAN SARAN

Simpulan

Berdasarkan hasil eksperimen dan optimasi menggunakan metode *Taguchi* L9, dapat disimpulkan bahwa kinerja *Electromagnetic Regenerative Shock absorber* (ERSA) dengan magnet neodmium sangat dipengaruhi oleh konfigurasi kumparan, khususnya jumlah lilitan dan diameter kawat, sedangkan *air gap* dalam rentang 2–6 mm memberikan pengaruh yang relatif kecil. Analisis ANOVA menunjukkan bahwa faktor jumlah lilitan menyumbang 55,10% variasi tegangan dan diameter kawat 38,96%, sehingga keduanya merupakan parameter dominan. Kombinasi optimum yang diperoleh adalah 2.500 lilitan, diameter kawat 0,4 mm, dan *air gap* 6 mm (A3B3C3), dengan hasil verifikasi tegangan sebesar 5,30 V dan galat hanya 5% terhadap prediksi 5,25 V, yang menegaskan keandalan pendekatan *Taguchi* dalam merancang ERSA. Meskipun tegangan yang dihasilkan belum memadai untuk secara langsung mensuplai beban penerangan darurat berdaya menengah, hasil ini menunjukkan potensi pemanfaatan energi vibrasi suspensi untuk beban berdaya rendah dan sebagai dasar pengembangan sistem penyimpanan serta pengkondisi daya pada aplikasi regenerasi energi kendaraan.

Saran

Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengembangkan rancangan ERSA di luar optimasi parameter kumparan dengan cara menambahkan variasi *air gap* yang lebih lebar, mengkaji konfigurasi magnet dan geometri mekanis lain (misalnya integrasi *mechanical motion rectifier*), serta menguji performa pada berbagai kondisi kecepatan dan beban kendaraan agar karakteristik keluaran energi lebih komprehensif. Selain itu, perlu dilakukan perancangan dan pengujian rangkaian penyearah, *DC-DC converter*, dan sistem penyimpanan energi (baterai atau *supercapacitor*) sehingga tegangan dan daya yang dihasilkan ERSA dapat dinaikkan dan distabilkan untuk mengoperasikan lampu *emergency* maupun beban elektronik lain secara berkelanjutan.

DAFTAR RUJUKAN

- [1] A. K. Ruly Kurniawan, "Jumlah Kendaraan di Indonesia 147 Juta Unit, 87 Persen Motor," Kompas.com, Feb. 10, 2023.
- [2] Direktorat Jenderal Minyak dan Gas Bumi, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, Statistik Minyak dan Gas Bumi 2019. Indonesia, 2019.
- [3] R. Zhou et al., "Design, analysis and prototyping of a magnetic energy-harvesting suspension for vehicles," *Smart Mater. Struct.*, vol. 29, no. 10, Art. no. 105034, Oct. 2020, doi: 10.1088/1361-665X/aba538.

- [4] A. D. Winastra, "Analisa Sistem Suspensi Pada Kendaraan Truck Mercedes Benz Axor," *Menulis: J. Penelit. Nusantara*, vol. 1, no. 6, pp. 1163–1167, Jun. 2025.
- [5] A. F. Ainurroji and D. Wulandari, "Pengembangan modul pembelajaran alat uji kekakuan pegas untuk mata kuliah Fisika Teknik I di Jurusan Teknik Mesin Universitas Negeri Surabaya," *J. Pendidik. Tek. Mesin*, vol. 11, no. 1, pp. 50–55, Nov. 2021.
- [6] A. Fadhil, H. Maksum, and W. Afnison, "Optimasi *Electromagnetic Regenerative Shock absorber* (ERSA) tipe magnet batang Alnico pada suspensi belakang multi purpose vehicle (MPV)," *AEEJ*, vol. 1, no. 1, pp. 21–30, Jun. 2020, doi: 10.24036/aej.v1i1.3.
- [7] A. E. Harefa and C. J. Humendru, "Kajian medan magnet dan pemanfaatannya dalam fisika dasar," *IDENTIK: J. Ilmu Ekon., Pendidik. dan Tek.*, vol. 1, no. 3, pp. 127–133, Nov. 2024, doi: 10.70134/identik.v2i1.159.
- [8] G. D. Ahadi, S. W. Pratiwi, and D. P. Isnarwaty, "Pendekatan desain eksperimen *Taguchi* sebagai metode optimasi pada bidang teknik dan industri (studi kasus pada proses bundling kemasan)," *SainsTech Innov. J.*, vol. 6, no. 2, pp. 380–388, Nov. 2023, doi: 10.37824/sij.v6i2.2023.617.
- [9] M. Abdelkareem, X. Lin, A. Ahmed, E. Ahmed, M. Jia, and L. Guo, "Vibration energy harvesting in automotive suspension system: A detailed review," *Appl. Energy*, vol. 229, pp. 672–699, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.08.030.
- [10] H. Y. Pan, L. F. Qi, Z. T. Zhang, and J. Y. Yan, "Kinetic energy harvesting technologies for applications in land transportation: A comprehensive review," *Appl. Energy*, vol. 286, Art. no. 116518, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.apenergy.2021.116518.
- [11] R. Zhang, X. Wang, and S. John, "A comprehensive review of the techniques on regenerative shock absorber systems," *Energies*, vol. 11, no. 5, Art. no. 1167, May 2018, doi: 10.3390/en11051167.
- [12] S. J. Guo, Y. L. Liu, L. Xu, X. X. Guo, and L. Zuo, "Performance evaluation and parameter sensitivity of energy-harvesting shock absorbers on different vehicles," *Veh. Syst. Dyn.*, vol. 54, no. 7, pp. 918–942, 2016, doi: 10.1080/00423114.2016.1174276.
- [13] P. Li and L. Zuo, "Influences of the electromagnetic regenerative dampers on the vehicle suspension performance," *Proc. Inst. Mech. Eng. D, J. Automob. Eng.*, vol. 231, no. 3, pp. 383–394, 2017, doi: 10.1177/0954407016639503.
- [14] L. H. Xie, J. H. Li, S. Q. Cai, and X. D. Li, "Electromagnetic energy-harvesting damper with multiple independently controlled transducers: On-demand damping and optimal energy regeneration," *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 22, no. 5, pp. 2705–2713, Oct. 2017, doi: 10.1109/TMECH.2017.2758783.
- [15] Z. T. Zhang et al., "A high-efficiency energy regenerative shock absorber using supercapacitors for renewable energy applications in range extended electric vehicle," *Appl. Energy*, vol. 178, pp. 177–188, Sep. 2016, doi: 10.1016/j.apenergy.2016.06.054.
- [16] H. Li et al., "A high-efficiency energy regenerative shock absorber for powering auxiliary devices of new energy driverless buses," *Appl. Energy*, vol. 295, Art. no. 117020, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.apenergy.2021.117020.
- [17] Y. L. Liu, L. Xu, and L. Zuo, "Design, modeling, lab, and field tests of a mechanical-motion-rectifier-based energy harvester using a ball-screw mechanism," *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 22, no. 5, pp. 1933–1943, Oct. 2017, doi: 10.1109/TMECH.2017.2700485.
- [18] Y. Pan et al., "Modeling and field-test of a compact electromagnetic energy harvester for railroad transportation," *Appl. Energy*, vol. 247, pp. 309–321, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.03.051.