



## Pengaruh Tegangan dan Bentuk Geometri Flywheel terhadap Energi Kinetik pada Motor Starter dan Massa Tetap Flywheel

Ravi Fadila Hafis<sup>1\*</sup>, Wirawan<sup>2</sup>,

<sup>1-2</sup>Program Studi Teknik Mesin dan Perawatan, Politeknik Negeri Malang

Alamat: Jl. Soekarno Hatta No.9, Jatimulyo, Kec. Lowokwaru, Kota Malang, Jawa Timur, Indonesia.

Korespondensi penulis: [ravifahisz@gmail.com](mailto:ravifahisz@gmail.com)\*

**Abstarct.** Flywheel is an important element in the motor starter system due to its ability to store relase kinetic energy during the rotation process. This study aims to evaluate the effect of rotation speed variation and flywheel geometry shape on the kinetic energy produced, assuming the flywheel mass is fixed. The analysis is conducted through theoretical approach and numerical simulation using the rotational kinetic energy equation, namely  $E_k = \frac{1}{2} I \omega^2$ , with  $I$  as the moment of inertia that depends on the geometry shape, and  $\omega$  as the angular velocity and shape of the flywheel. The results show that the geometry shape greatly affects the moment of inertia, and at the same angular velocity, the flywheel with larger moment of inertia is able to store more kinetic energy. The conclusion of this study provides recommendations in the selection of the optimal flywheel design to improve the efficiency of the motor starter system.

**Keywords:** Flywheel, Geometric Shape, Kinetic Energy, Starter motor, Voltage.

**Abstrak.** Flywheel merupakan elemen penting dalam sistem motor starter karena kemampuannya menyimpan dan melepaskan energi kinetik selama proses rotasi. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh variasi kecepatan putaran dan bentuk geometri flywheel terhadap energi kinetik yang dihasilkan, dengan asumsi massa flywheel tetap. Analisis dilakukan melalui pendekatan teoritis dan simulasi numerik menggunakan persamaan energi kinetik rotasi, yaitu  $E_k = \frac{1}{2} I \omega^2$ , dengan  $I$  sebagai momen inersia yang bergantung pada bentuk geometri, serta  $\omega$  sebagai kecepatan sudut dan bentuk flywheel. Hasil penelitian menunjukkan bahwa bentuk geometri sangat memengaruhi momen inersia, dan pada kecepatan sudut yang sama, flywheel dengan momen inersia lebih besar mampu menyimpan energi kinetik lebih banyak. Kesimpulan dari studi ini memberikan rekomendasi dalam pemilihan desain flywheel yang optimal untuk meningkatkan efisiensi sistem starter motor.

**Kata kunci:** Flywheel, Bentuk Geometris, Energi Kinetik, Motor Starter, Tegangan.

### 1. LATAR BELAKANG

Perkembangan teknologi otomotif terus mengarah pada peningkatan efisiensi dan performa kendaraan, dengan motor starter sebagai komponen vital yang mengonversi energi listrik menjadi energi kinetik untuk memutar mesin. Dalam sistem ini, flywheel berperan penting sebagai penyimpan energi rotasi yang membantu mengurangi beban torsi awal. Efisiensi flywheel sangat dipengaruhi oleh geometri, momen inersia, dan kecepatan rotasi. Desain geometri yang tepat dapat meningkatkan kapasitas penyimpanan energi tanpa menambah massa, sementara peningkatan kecepatan rotasi berbanding lurus dengan energi kinetik yang dihasilkan. Namun, keterbatasan teknis seperti kekuatan material dan kapasitas motor starter menjadi tantangan tersendiri dalam optimalisasi sistem.

Penelitian sebelumnya lebih banyak difokuskan pada aplikasi flywheel di sistem energi besar, sedangkan kajian khusus tentang hubungan antara bentuk geometri dan kecepatan rotasi flywheel dengan massa tetap dalam konteks motor starter masih terbatas. Selain itu, kebutuhan torsi tinggi akibat momen inersia besar dapat membebani sistem dan mempercepat degradasi baterai. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh putaran dan bentuk geometri flywheel terhadap energi kinetik yang dihasilkan, guna mendukung rancangan sistem starter yang efisien, ringan, dan andal.

## **2. KAJIAN TEORITIS**

Motor starter merupakan salah satu komponen utama dalam sistem penggerak kendaraan yang berfungsi memberikan torsi awal guna mengatasi inersia mesin yang diam agar dapat mencapai kecepatan kerja yang optimal. Pada tahap awal pengoperasian, sistem ini membutuhkan energi listrik yang cukup besar untuk memutar poros engkol dan mengaktifkan proses pembakaran. Jika tidak didukung oleh desain sistem yang efisien, seperti pengaturan arus, tegangan, dan elemen mekanis pendukung, efisiensi dan kinerja motor starter akan menurun secara signifikan (Maksimov et al., 2020). Salah satu komponen pendukung yang sangat berperan dalam efisiensi sistem ini adalah flywheel atau roda gila. Flywheel bekerja dengan menyimpan energi kinetik dalam bentuk rotasi massa dan melepaskannya saat dibutuhkan, terutama ketika mesin memulai rotasi dari keadaan diam. Ketebalan dan diameter flywheel merupakan dua parameter penting yang memengaruhi momen inersia dan kapasitas penyimpanan energi. Flywheel yang lebih tebal dan memiliki diameter lebih besar, dengan massa tetap, akan menghasilkan momen inersia yang lebih besar, sehingga mampu menyimpan energi lebih banyak. Hal ini memungkinkan pengurangan beban torsi yang harus diatasi oleh motor starter dan pada saat yang sama memperpanjang usia pakai sistem starter karena beban mekanis menjadi lebih ringan (Djuhana et al., 2019).

Selain dimensi fisik, bentuk geometri flywheel juga memiliki pengaruh besar terhadap performa sistem. Beberapa geometri umum yang digenean antara lain silinder solid, hollow disk, dan ring-type. Setiap bentuk memiliki distribusi massa dan respon struktural yang berbeda terhadap tegangan mekanis. Desain hollow disk, misalnya, memungkinkan konsentrasi massa di bagian luar flywheel, sehingga meningkatkan momen inersia secara signifikan tanpa harus menambah massa total. Hal ini membuat desain tersebut efisien dalam menyimpan energi dan efektif dalam mengurangi tegangan material bagian dalam, menjadikannya lebih unggul dibanding bentuk lainnya dalam aplikasi penyimpanan energi berkecepatan tinggi (Stas et al., 2020). Energi kinetik rotasi pada flywheel secara teoritis dihitung menggunakan persamaan

$E_k = \frac{1}{2} J \omega^2$ ,  $\omega$  adalah kecepatan sudut. Momen inersia sendiri ditentukan oleh distribusi massa terhadap sumbu rotasi dan dinyatakan dengan rumus  $J = mR^2$ , sementara  $\omega$  yaitu  $\omega = 2\pi f$ , dengan  $f$  sebagai frekuensi rotasi. Dengan demikian, semakin besar momen inersia dan kecepatan sudut, semakin besar pula energi kinetik yang dapat disimpan, sehingga optimalisasi parameter ini sangat penting dalam mendesain sistem starter yang efisien (Jauch et al., 2024).

Di sisi lain, tegangan potensial juga berperan krusial dalam mendukung sistem motor starter. Tegangan ini merupakan sumber energi listrik utama yang menggerakkan komponen elektronik dan mekanis dalam sistem starter. Kestabilan tegangan sangat menentukan efisiensi dan keandalan sistem. Tegangan yang terlalu rendah dapat menyebabkan lonjakan arus yang berisiko merusak komponen elektronik seperti relay, saklar, dan kumparan. Sebaliknya, tegangan yang terlalu tinggi dapat mempercepat keausan komponen motor, mengurangi umur pakai sistem, dan berpotensi menyebabkan kerusakan dini. Sistem motor starter modern, terutama pada kendaraan listrik, mengandalkan baterai dengan tegangan tetap agar dapat mengontrol dan menstabilkan suplai daya secara efisien. Oleh karena itu, pengaturan tegangan yang stabil sangat penting untuk menghindari kerusakan dan menjaga efisiensi energi yang tersalurkan ke flywheel serta keseluruhan sistem starter (Noland et al., 2020). Integrasi yang baik antara karakteristik geometri flywheel dan pengendalian tegangan listrik menjadi kunci utama dalam merancang sistem penyimpanan energi kinetik yang andal, efisien, dan berdaya guna tinggi.

Pengujian hipotesis dilakukan menggunakan metode statistik Two Way ANOVA. Hasil pengujian menunjukkan bahwa tegangan dan bentuk geometri flywheel masing-masing berpengaruh signifikan terhadap energi kinetik, ditunjukkan dengan nilai p-value yang lebih kecil dari 0,05. Oleh karena itu, hipotesis nol untuk kedua variabel tersebut ditolak, dan hipotesis alternatif diterima. Namun, untuk interaksi antara tegangan dan bentuk geometri flywheel, hasil menunjukkan bahwa pengaruhnya karena nilai p-value melebihi 0,05, maka hasilnya tidak menunjukkan signifikansi. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa tidak terdapat pengaruh yang berarti dari variabel tersebut terhadap variabel yang diamati meskipun tegangan dan bentuk geometri memiliki pengaruh individual yang signifikan terhadap energi kinetik, keduanya tidak menunjukkan efek interaksi yang signifikan saat diuji secara bersamaan.

### 3. METODE PENELITIAN



**Gambar 1 Flywheel**

Penelitian studi ini mengadopsi pendekatan kuantitatif dengan menerapkan metode eksperimen serta mengkaji literatur dari berbagai referensi lain. Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan metode eksperimental dengan dua variabel bebas: tegangan (11 V, 12 V, 13 V, 14 V) dan inersia (0,001700248, 0,0015654224, 0,0015044095, 0,0017033074) yang dipengaruhi bentuk geometri flywheel (cakram, cakram diantara, silinder, silinder diantara) ditunjukkan pada gambar 1 di atas dengan cara melihat dari sisi kiri ke kanan. Variabel terikat adalah energi kinetik flywheel yang dihitung berdasarkan kecepatan putaran dan momen inersia.



**Gambar 2 Pengambilan Data**

Pengujian dilakukan sebanyak 16 kombinasi dengan 3 kali replikasi untuk masing-masing kombinasi. Alat yang digunakan meliputi tachometer, tang ampere, dan motor starter. Data dianalisis menggunakan Two Ways ANOVA Faktorial dan grafik kontur untuk memvisualisasikan hubungan antar variabel. Cara pengambilan data pertama atur power supply DC sesuai kebutuhan dan juga pasangankan flywheel ke mesin kharisma 125cc setelah itu siapkan alat pengukuran seperti stopwatch, tachometer, tang ampere. Yang dimana mengambil data menggunakan tachometer digital yang akan memancarkan infra merah, stopwatch digunakan untuk mengukur waktu saat saat melakukan stater yang ditunjukkan pada gambar 2.

#### 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

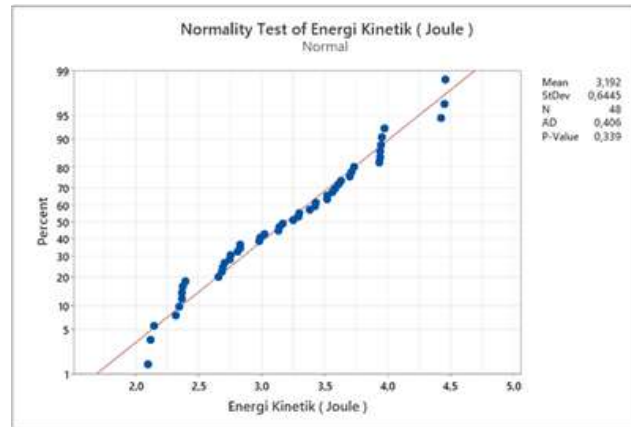
##### Hasil Data Eksperimen

Setelah diperoleh nilai dari hasil pengukuran putaran (RPM) dan perhitungan energi kinetik, langkah selanjutnya adalah mencatat dan mengelompokkan data tersebut ke dalam format yang sistematis. Data ini kemudian dimasukkan ke dalam tabel data eksperimen yang telah disiapkan sebelumnya untuk keperluan analisis. Tabel tersebut, yang ditampilkan pada Tabel 1. Dengan penyusunan data pada Tabel 1, proses analisis selanjutnya dapat dilakukan dengan lebih terstruktur dan mudah untuk dibandingkan antar variabel:

**Tabel 1 Data Eksperimen**

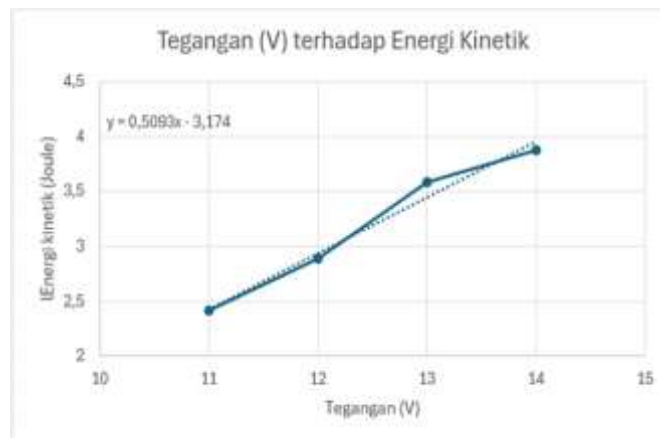
Tegangan(V)	Bentuk Geometri	Inersia(Kgm <sup>2</sup> )	Putaran(RPM)			Energi Kinetik(Joule)			Status Mesin( 3 second)
			Uji 1	Uji 2	Uji 3	Uji 1	Uji 2	Uji 3	
11	Cakram	$1,700248 \times 10^{-3}$	504	504	507	2,368	2,368	2,396	Nyala
	Cakram Diantara	$1,5654224 \times 10^{-3}$	497	500	494	2,12	2,145	2,094	Nyala
	Silinder	$1,5044095 \times 10^{-3}$	536	530	533	2,369	2,317	2,343	Nyala
	Silinder Diantara	$1,7033074 \times 10^{-3}$	550	551	548	2,825	2,83	2,804	Nyala
12	Cakram	$1,700248 \times 10^{-3}$	566	569	565	2,986	3,018	2,976	Nyala
	Cakram Diantara	$1,5654224 \times 10^{-3}$	560	556	561	2,691	2,653	2,701	Nyala
	Silinder	$1,5044095 \times 10^{-3}$	577	578	570	2,746	2,755	2,68	Nyala
	Silinder Diantara	$1,7033074 \times 10^{-3}$	582	579	583	3,163	3,13	3,141	Nyala
13	Cakram	$1,700248 \times 10^{-3}$	631	633	630	3,711	3,735	3,7	Nyala
	Cakram Diantara	$1,5654224 \times 10^{-3}$	620	619	615	3,299	3,288	3,246	Nyala
	Silinder	$1,5044095 \times 10^{-3}$	640	644	645	3,378	3,421	3,431	Nyala
	Silinder Diantara	$1,7033074 \times 10^{-3}$	649	652	646	3,933	3,97	3,945	Nyala
14	Cakram	$1,700248 \times 10^{-3}$	651	650	650	3,95	3,938	3,938	Nyala
	Cakram Diantara	$1,5654224 \times 10^{-3}$	640	644	641	3,515	3,559	3,515	Nyala
	Silinder	$1,5044095 \times 10^{-3}$	661	659	663	3,604	3,582	3,625	Nyala
	Silinder Diantara	$1,7033074 \times 10^{-3}$	688	690	681	4,42	4,446	4,459	Nyala

Data dalam penelitian ini diperoleh melalui pengujian eksperimental yang melibatkan dua variabel bebas, masing-masing dengan empat level. Setiap level diuji sebanyak 3 kali (tiga replikasi) untuk memastikan keakuratan hasil. Seluruh data kemudian divisualisasikan dalam bentuk grafik dan dianalisis menggunakan metode Two Way ANOVA Faktorial untuk mengetahui pengaruh masing-masing variabel terhadap spesimen yang diuji. Grafik yang dihasilkan digunakan sebagai dasar dalam menarik kesimpulan dan menginterpretasi pengaruh variabel terhadap respon yang diamati.



**Gambar 3 Uji Normalitas**

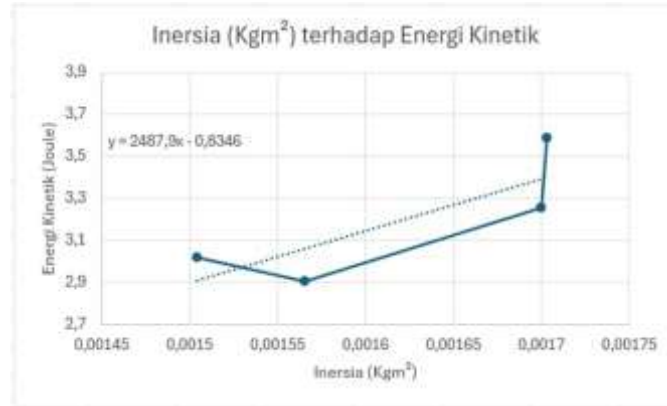
Hasil uji normalitas terhadap data energi kinetik menunjukkan bahwa data dapat dianggap berdistribusi normal, ditunjukkan oleh nilai P-Value sebesar 0,339 yang melebihi batas signifikansi 0,05 serta nilai Anderson-Darling (AD) sebesar 0,406 yang relatif kecil. Tdiak terdapat cukup bukti untuk menolak hipotesis nol ( $H_0$ ), sehingga asumsi normalitas terpenuhi. Hal ini diperkuat oleh tampilan grafik normal probability plot, di mana titik-titik data mengikuti garis lurus tanpa penyimpangan signifikan pada bagian ujung, menandakan bahwa distribusi data mengikuti pola normal secara konsisten.



**Grafik 4 Grafik Tegangan terhadap Energi kinetik**

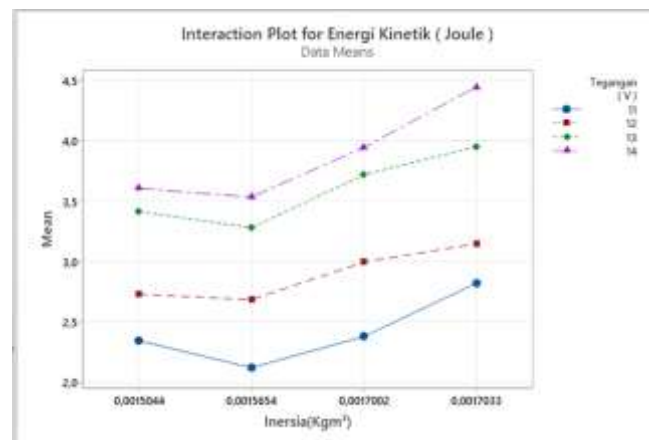
Gambar grafik di atas menunjukkan hubungan antara Tegangan (Volt) dengan Rata-Rata Energi Kinetik (Joule). Berdasarkan grafik hubungan antara tegangan (V) dan energi kinetik (Joule), terlihat bahwa arah tren mengalami peningkatan positif dari kiri ke kanan. Hal ini menunjukkan bahwa semakin besar tegangan yang diberikan pada sistem, maka semakin tinggi pula rata-rata energi kinetik yang dihasilkan. Peningkatan energi kinetik berlangsung secara bertahap mulai dari tegangan 11V hingga 14V, yang mengindikasikan bahwa sistem memberikan respons yang stabil dan konsisten terhadap perubahan nilai tegangan. Berdasarkan persamaan regresi  $y=0,5093x- 3,174$ , dapat diinterpretasikan bahwa setiap

kenaikan tegangan sebesar 1 volt akan meningkatkan energi kinetik sebesar 0,5093 Joule. Hal ini menunjukkan bahwa tegangan memiliki pengaruh signifikan terhadap besarnya energi kinetik yang dihasilkan oleh sistem. Titik- titik data yang mengikuti pola garis tren menunjukkan bahwa hubungan antara kedua variabel cukup kuat dan stabil.



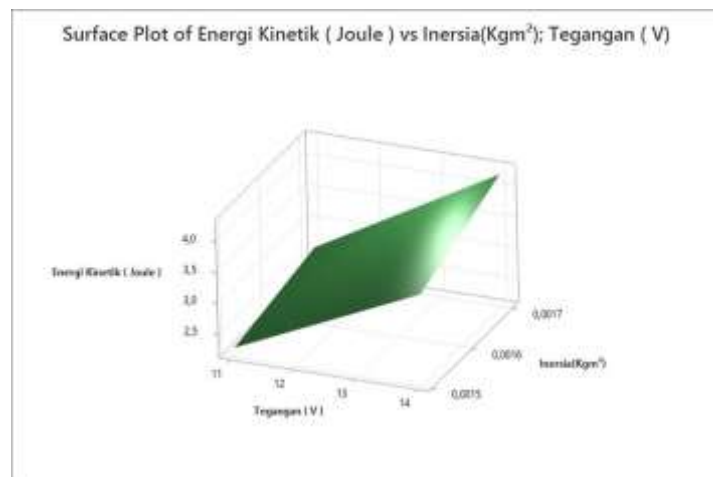
**Gambar 5 Grafik Inersia terhadap Energi kinetik**

Gambar grafik di atas menunjukkan hubungan antara inersia (Kgm<sup>2</sup>) terhadap energi kinetik (Joule), di mana secara umum terlihat tren peningkatan energi kinetik seiring dengan bertambahnya nilai inersia. Meskipun terdapat sedikit penurunan pada titik inersia 0,0015654 Kgm<sup>2</sup>, secara keseluruhan grafik menunjukkan pola kenaikan yang konsisten, khususnya pada inersia tertinggi yaitu 0,0017033 Kgm<sup>2</sup> yang menghasilkan energi kinetik paling besar. Persamaan regresi linear  $y=2487,9x-0,8346$ , menunjukkan adanya hubungan positif, artinya setiap kenaikan nilai inersia akan berkontribusi terhadap peningkatan energi kinetik. Hal ini sesuai dengan prinsip energi kinetik rotasi yang menyatakan bahwa energi kinetik berbanding lurus dengan momen inersia. Oleh karena itu, peningkatan inersia pada flywheel terbukti mampu meningkatkan kemampuan sistem dalam menyimpan energi kinetik secara efisien.



**Gambar 6 Grafik Interaksi Tegangan dan Inersia**

Berdasarkan grafik Interaction Plot for Energi Kinetik (Joule), terlihat bahwa baik tegangan maupun inersia secara individu memberikan pengaruh nyata terhadap besar kecilnya energi kinetik yang dihasilkan. Grafik menunjukkan bahwa semakin tinggi tegangan yang diberikan, semakin besar pula energi kinetik yang dihasilkan oleh flywheel. Hal ini dapat diamati dari garis representasi tegangan 14V yang konsisten menghasilkan nilai energi kinetik tertinggi pada setiap level inersia. Demikian pula, terdapat tren peningkatan energi kinetik pada setiap level tegangan seiring bertambahnya nilai inersia flywheel, yang mengindikasikan bahwa flywheel dengan massa inersia lebih besar mampu menyimpan lebih banyak energi. Namun demikian, pola grafik juga memperlihatkan bahwa garis antar level tegangan tidak saling berpotongan secara tajam, yang menunjukkan tidak adanya interaksi yang signifikan antara tegangan dan inersia. Hal ini konsisten dengan hasil uji ANOVA sebelumnya yang menunjukkan nilai P-Value sebesar 0,065 untuk interaksi dua arah, yang lebih besar dari tingkat signifikansi 0,05. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa meskipun kedua variabel bebas (tegangan dan inersia) secara individu memengaruhi energi kinetik secara signifikan, pengaruh gabungan atau interaksinya tidak memberikan efek yang lebih besar dibandingkan pengaruh masing-masing secara terpisah.



**Gambar 7 Surface Perbandingan Energi Kinetik VS Tegangan dan Inerisa**

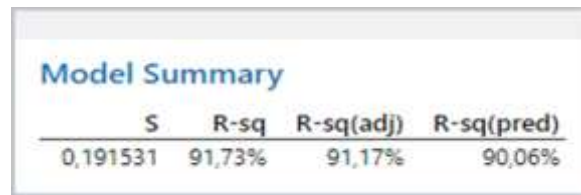
Gambar surface plot di atas memperlihatkan hubungan antara dua variabel bebas, yaitu tegangan (V) dan inersia ( $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ ), terhadap variabel terikat berupa energi kinetik (Joule) yang dihasilkan oleh flywheel. Dari permukaan grafik yang ditampilkan, terlihat bahwa energi kinetik cenderung meningkat secara konsisten seiring dengan peningkatan tegangan dan inersia. Peningkatan tegangan dari 11 volt hingga 14 volt menunjukkan pengaruh yang lebih tajam terhadap energi kinetik, yang mengindikasikan bahwa tegangan memiliki kontribusi yang dominan dalam memperbesar energi kinetik. Sementara itu, peningkatan inersia dari 0,0015 hingga 0,0017  $\text{kg}\cdot\text{m}^2$  juga menunjukkan tren peningkatan energi kinetik, meskipun

pengaruhnya tidak sebesar tegangan. Permukaan grafik yang relatif rata dan tidak menunjukkan lengkungan ekstrem mengindikasikan bahwa tidak terdapat interaksi yang signifikan antara tegangan dan inersia. Hal ini sesuai dengan hasil uji ANOVA yang sebelumnya dilakukan, di mana nilai P-Value untuk interaksi dua arah lebih besar dari 0,05, sehingga pengaruh gabungan keduanya tidak signifikan secara statistik. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa baik tegangan maupun inersia memberikan pengaruh yang signifikan terhadap energi kinetik secara individual, namun pengaruh keduanya bersifat independen dan tidak saling memperkuat satu sama lain. Grafik ini memberikan gambaran visual yang jelas mengenai arah dan besarnya pengaruh masing-masing variabel terhadap energi kinetik.

Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	3	17,9072	5,9691	162,72	0,000
Linear	2	16,8842	8,4421	230,13	0,000
Tegangan ( V )	1	14,6800	14,6800	400,17	0,000
Inersia(Kgm <sup>2</sup> )	1	2,2042	2,2042	60,08	0,000
2-Way Interactions	1	0,1312	0,1312	3,58	0,065
Tegangan ( V )*Inersia(Kgm <sup>2</sup> )	1	0,1312	0,1312	3,58	0,065
Error	44	1,6141	0,0367		
Lack-of-Fit	12	1,5968	0,1331	245,79	0,000
Pure Error	32	0,0173	0,0005		
Total	47	19,5213			

**Gambar 8 Uji Statistik ANOVA Tegangan dan Inersia serta Interaksinya**

Berdasarkan hasil analisis diketahui bahwa variabel tegangan (V) dan inersia (massa flywheel) memiliki pengaruh yang sangat signifikan terhadap energi kinetik yang dihasilkan. Hal tersebut terlihat dari nilai P-Value yang sangat kecil, yaitu 0,000, yang berada jauh di bawah ambang signifikansi 0,05. Selain itu, nilai F-Value yang diperoleh juga cukup tinggi, yakni sebesar 430,17 untuk variabel tegangan dan 60,08 untuk variabel inersia, yang semakin menguatkan adanya pengaruh signifikan dari kedua faktor tersebut. Artinya, baik peningkatan tegangan maupun massa inersia secara individu dapat meningkatkan energi kinetik secara nyata. Namun, interaksi antara tegangan dan inersia menunjukkan P-Value sebesar 0,065 yang melebihi batas signifikansi, sehingga dapat disimpulkan bahwa pengaruh gabungan keduanya tidak signifikan secara statistik dalam model ini.



Model Summary			
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,191531	91,73%	91,17%	90,06%

**Gambar 9 Hasil Nilai Square**

Hasil Model Summary menunjukkan bahwa model yang digunakan memiliki tingkat keakuratan yang sangat tinggi, dengan nilai R-squared sebesar 91,73%, R-squared adjusted sebesar 91,17%, dan R-squared predicted sebesar 90,06%, yang berarti model mampu menjelaskan dan memprediksi sebagian besar variasi dalam data energi kinetik. Nilai galat standar (S) yang rendah yaitu 0,1915 juga mengindikasikan bahwa model ini memberikan estimasi yang cukup akurat. Walaupun uji Lack-of-Fit menunjukkan hasil yang signifikan, hal ini tidak terlalu mempengaruhi kualitas model secara keseluruhan, mengingat kesalahan murni (pure error) sangat kecil, yang menunjukkan bahwa data eksperimen memiliki konsistensi yang tinggi.

## **5. KESIMPULAN DAN SARAN**

Berdasarkan hasil penelitian mengenai pengaruh tegangan dan bentuk geometri flywheel terhadap energi kinetik pada massa tetap flywheel, dapat disimpulkan bahwa tegangan memberikan pengaruh yang sangat signifikan terhadap energi kinetik yang dihasilkan oleh motor starter. Peningkatan tegangan dari 11 volt hingga 14 volt secara konsisten meningkatkan energi kinetik, dengan nilai tertinggi tercatat sebesar 4,2368 Joule pada tegangan 14 volt. Hal ini menunjukkan bahwa tegangan merupakan faktor utama dalam meningkatkan kinerja sistem penyimpanan energi berbasis flywheel.

Selain itu, bentuk geometri flywheel juga terbukti berpengaruh signifikan terhadap energi kinetik meskipun massa flywheel dijaga tetap. Flywheel dengan momen inersia yang lebih besar mampu menyimpan lebih banyak energi kinetik. Peningkatan nilai inersia dari 0,0015044 kg·m<sup>2</sup> hingga 0,0017033 kg·m<sup>2</sup> menunjukkan tren positif terhadap peningkatan energi kinetik. Namun demikian, hasil uji statistik menunjukkan bahwa interaksi antara tegangan dan bentuk geometri tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap energi kinetik. Dengan demikian, kedua variabel tersebut berkontribusi secara independen dan dapat dioptimalkan secara terpisah dalam perancangan sistem.

Sebagai tindak lanjut, disarankan agar penelitian selanjutnya lebih difokuskan pada pengembangan dan optimalisasi bentuk geometri flywheel untuk meningkatkan efisiensi penyimpanan energi. Penggunaan alat ukur yang lebih presisi, seperti tachometer digital

dengan resolusi tinggi, juga sangat direkomendasikan guna memperoleh data kecepatan rotasi yang lebih akurat.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis ingin mengungkapkan rasa terima kasih yang tulus kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan dan partisipasi dalam proses pelaksanaan hingga selesainya penelitian ini. Penghargaan khusus diberikan kepada pembimbing, Dr. Wirawan, B.Eng(HONS), M.T., atas segala bimbingan, saran, serta arahnya yang sangat membantu selama jalannya penelitian. Ucapan terima kasih juga ditujukan kepada Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Malang, beserta seluruh rekan dan pihak lain yang turut berkontribusi dalam kelancaran penelitian ini. Semoga hasil dari penelitian ini dapat memberikan manfaat nyata serta menjadi dasar bagi pengembangan riset lanjutan di masa mendatang.

## DAFTAR REFERENSI

- Bianchini, C., Torreggiani, A., David, D., & Bellini, A. (2021). Design of motor/generator for flywheel batteries. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 68(10), 9675–9684. <https://doi.org/10.1109/TIE.2020.3026292>
- Djuhana, S. (2019). Pengaruh massa flywheel terhadap energi kinetik, tegangan serta daya luaran pada flywheel energy storage system. *Journal of Technical Engineering: Piston*, 3(1), 17–23.
- Jauch, C., Jost, R., & Kloft, P. (2024). Hydraulic variable inertia flywheel. *Applied Energy*, 360, 122830. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.122830>
- Maksimov, N. M., Savosteenko, N. V., Semenova, K. D., & Belov, N. A. (2020). Optimization of flywheel for starter-generator based on the differential electric drive. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 919(6). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/919/6/062065>
- Neelakandan, V., Ganesan, T., & Rao, P. C. (2019). Weight optimization of housing bracket for electrical starter motor using FEA. *Procedia Structural Integrity*, 14, 345–353. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2019.05.043>
- Noland, J. K., Leandro, M., Suul, J. A., & Molinas, M. (2020). High-power machines and starter-generator topologies for more electric aircraft: A technology outlook. *IEEE Access*, 8, 130104–130123. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3007791>
- Olabi, A. G., Wilberforce, T., Abdelkareem, M. A., & Ramadan, M. (2021). Critical review of flywheel energy storage system. *Energies*, 14(8), 2159. <https://doi.org/10.3390/en14082159>
- Permana, T., Daryanto, E., & Hutajulu, O. Y. (2023). Analisis kelistrikan sistem starter tipe konvensional untuk penggerak mula motor bensin. *Jurnal Insinyur Profesional*, 2(3), 102–107.

- Samshette, S. M., & Swami, M. C. (2015). Comparative study of different geometry flywheel by analytical and Ansys. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 12(5), 1–6. <https://doi.org/10.9790/1684-12530106>
- Selvaraj, A., Ron Carter, S. B., & Thangavel, S. (2020). Design of non-solenoidal operation of starter motor. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 234(13), 3095–3102. <https://doi.org/10.1177/0954407020925714>
- Shinde, A., Rawat, K. S., Mahajan, R., Pardeshi, V., Kamanna, B., & Sheravi, S. (2017). Design and analysis of flywheel for different geometries and materials. *Global Journal of Enterprise Information System*, 9(1), 96–99. <https://doi.org/10.18311/gjeis/2017/15872>
- Stas, P.-J. C., Ghimire, S., & Ouerdane, H. (2020). Modeling flywheel energy storage system charge and discharge dynamics. *arXiv*. <http://arxiv.org/abs/2005.14634>
- Surabidin, & Djuhana. (2019). Pengaruh massa flywheel terhadap energi kinetik, tegangan serta daya luaran pada flywheel energy storage system. *Piston: Journal of Technical Engineering*, 3(1), 17–23.
- Vishnurameshkumar, R., Kingsly, A., Karthikeyan, P., Muthukumaran, R., & Saran, B. (2015). Starter motor control system. *International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology (IJISSET)*, 2(9), 514–520. <http://www.ijiset.com/>
- Xu, K., Guo, Y., Lei, G., & Zhu, J. (2023). A review of flywheel energy storage system technologies. *Energies*, 16(18), 6462. <https://doi.org/10.3390/en16186462>