

Karakteristik Pengontrolan Torka Pengereman Regeneratif Pada Kendaraan Listrik Dengan Integrasi Ultrakapasitor

Rizki Pratama Putra¹; Novi Kurniasih¹; Dewi Purnama Sari¹; Zaky Syamsuddin¹

1. Institut Teknologi PLN, Menara PLN, Jl. Lingkar Luar Barat, Duri Kosambi, Cengkareng, Jakarta Barat, DKI Jakarta 11750, Indonesia

^{*)}Email: rizki@itpln.ac.id

Received: 03 Januari 2023 | Accepted: 30 Januari 2024 | Published: 29 Januari 2024

ABSTRACT

Regenerative braking on conventional electric vehicles utilizes the battery as a load in the braking phase to create reverse electric torque which will slow down the vehicle. This method has the disadvantage that the amount of braking torque depends on the maximum charging current of the battery. This final project examines a regenerative braking system using an ultracapacitor as a reverse electric torque-producing load that creates a slowdown in the rotation of the driving motor (BLDC/Brushless DC). The regenerative braking trial using ultracapacitors was carried out on a laboratory scale test model by varying the rotational load or inertia and the number of parallelized capacitors, which will see the effect on the amount of regeneration energy and braking torque that occurs. The load variations are 2.5 kg, 3.75 kg and 5 kg, speed variations of 600 rpm, 700 rpm and 800 rpm and variations of single, parallel ultracapacitor configuration. From the test results obtained the highest current, voltage and braking values at a load variation of 2.5 kg with a speed of 800 rpm and one ultracapacitor with a successive value of 1.57 m/s², 5.8 mA and 7.87 V. As for the highest energy of 0.2091662 Joule obtained from a load variation of 5 kg with a speed of 800 rpm and parallel ultracapacitor. In addition, it is also known that the highest deceleration torque, on average, was obtained in the test with the lowest load mass, namely 2.5 kg. From the overall test results, it can be observed and concluded that the retarding torque is influenced by the maximum regeneration current that can be achieved, where the value is influenced by the type of capacitor and the regeneration voltage. So that the effective deceleration is only seen at low load inertia and less significant at high load inertia.

Keywords: Electric Vehicles, Regenerative Braking, Ultracapacitors

ABSTRAK

Pengereman regeneratif pada kendaraan listrik konvensional memanfaatkan baterai sebagai beban pada fase pengereman untuk menciptakan torka elektrik balik yang akan memperlambat laju kendaraan. Metode ini memiliki kekurangan yakni besar torka pengereman bergantung pada besar arus pengisian maksimum dari baterai. Pada tugas akhir ini dikaji suatu sistem pengereman regeneratif menggunakan ultrakapasitor sebagai beban penghasil torka elektrik balik yang menciptakan perlambatan pada putaran motor penggerak (BLDC/Brushless DC). Uji coba pengereman regeneratif menggunakan ultrakapasitor dilakukan pada model uji skala laboratorium dengan memvariasikan beban putar atau inersia dan jumlah kapasitor yang diparalelkan, yang akan dilihat pengaruhnya terhadap besar energi regenerasi dan torka pengereman yang terjadi. Variasi beban yakni 2.5 kg, 3.75 kg dan 5 kg, variasi kecepatan 600 rpm, 700 rpm dan 800 rpm dan variasi konfigurasi ultrakapasitor tunggal, parallel. Dari hasil pengujian didapatkan nilai arus, tegangan dan pengereman tertinggi pada variasi beban 2.5 kg dengan kecepatan 800 rpm dan satu buah ultrakapasitor dengan nilai berturut-turut sebesar 1.57 m/s², 5.8 mA dan 7.87 V. Sedangkan untuk energi tertinggi sebesar 0.2091662 Joule yang didapat dari variasi beban 5 kg dengan kecepatan 800 rpm dan ultrakapasitor paralel. Selain itu diketahui juga bahwa torka perlambatan tertinggi, rata-rata diperoleh pada pengujian dengan massa beban paling rendah yakni 2.5 kg. Dari hasil

pengujian secara keseluruhan dapat diamati dan disimpulkan bahwa torka perlambatan dipengaruhi oleh arus regenerasi maksimum yang dapat dicapai, dimana nilainya dipengaruhi oleh kapasitas kapasitornya dan tegangan regenerasi. Sehingga perlambatan hanya efektif terlihat pada inersia beban yang rendah dan kurang signifikan pada inersia beban yang tinggi.

Kata kunci: *Electric Vehicles, Regenerative Braking, Ultracapacitors*

1. PENDAHULUAN

Kendaraan listrik mengalami pertumbuhan yang signifikan dalam beberapa tahun terakhir. Direktur Jendral Perhubungan Darat, Budi Setiyadi mengatakan bahwa jumlah kendaraan listrik khususnya sepeda motor listrik di Indonesia pada tahun 2021 telah mencapai 10.300 unit yang telah beredar di masyarakat (Biro Komunikasi dan Informasi Publik, 2021). Kendaraan listrik menggunakan baterai sebagai penggerak utama. Hal ini membuat fokus utama pada kendaraan listrik merupakan bagaimana cara mengoptimalkan kemampuan kerja baterai sehingga kendaraan listrik dapat meningkatkan jarak tempuh kendaraan listrik (Putra, dkk., 2021; Qiu & Wang, 2016). Berbagai macam cara telah dikembangkan untuk meningkatkan nilai efisiensi penggunaan baterai pada kendaraan listrik, salah satu cara yang mungkin adalah dengan membuat kendaraan listrik dengan bobot seringan mungkin atau dengan cara membuat motor listrik dengan nilai efisiensi tinggi (L. Li, dkk., 2016).

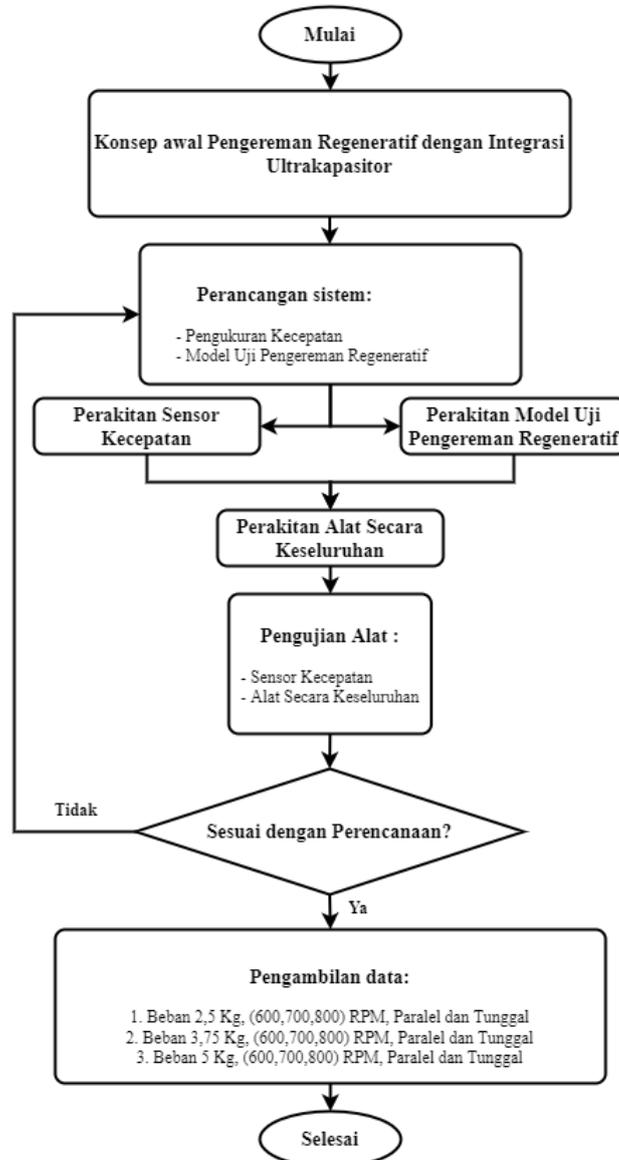
Metode lain yang dapat dipakai untuk meningkatkan efisiensi kendaraan listrik adalah dengan menerapkan sistem pengereman regeneratif. Pengereman pada umumnya merupakan suatu tindakan untuk memperlambat laju kendaraan dengan cara memanfaatkan gaya gesek antara kampas rem dengan piringan cakram atau sejenisnya. Hal ini akan menyebabkan terjadinya konversi energi mekanik menjadi energi panas. Konversi energi yang terjadi pada proses pengereman biasa hanya akan membuang potensi energi kinetik yang dihasilkan dari laju kendaraan. Pengereman regeneratif dapat memaksimalkan potensi energi kinetik yang dihasilkan menjadi energi listrik yang dapat dipakai untuk mengisi ulang daya baterai, sehingga terjadi daur ulang energi listrik yang dapat meningkatkan nilai efisiensi kendaraan listrik (Khayyam & Bab-Hadiashar, 2014; Putra, dkk., 2021).

Indonesia memiliki keuntungan tambahan dalam penerapan sistem pengereman regeneratif ini karena memiliki kontur jalan yang beraneka ragam, terdapat banyak sekali tanjakan serta turunan. Pada saat melalui jalanan menurun, pengereman akan dilakukan untuk mempertahankan laju kendaraan agar tetap stabil (Dani & Priananda, 2020; Latif, dkk., 2018). Kondisi ini dapat dimanfaatkan secara maksimal dengan menggunakan sistem pengereman regeneratif. Metode pengereman pada jalanan menurun juga mempengaruhi tingkat regenerasi energi listrik karena kecepatan awal kendaraan sangat mempengaruhi besar tegangan yang dihasilkan pada sistem pengereman regeneratif (Dani & Priananda, 2020).

Kecepatan awal menjadi salah satu indikator besarnya tegangan yang dapat dihasilkan dari pengereman regeneratif. Tingkat perubahan kecepatan suatu kendaraan sangat tinggi, oleh karenanya tegangan yang dihasilkan juga bervariasi. Karena itu penyaluran arus regenerasi secara langsung pada baterai harus dipertimbangkan, hal ini terkait usia pemakaian baterai atau *life cycle*. Usia baterai sangat bergantung pada tingkat pelepasan dan pengisian baterai tersebut, semakin besar pelepasan atau pengisian yang dilakukan setiap saat, maka semakin menurun usia pemakaian baterai tersebut (Qadrnan, dkk., 2018). Atas pertimbangan tersebut, maka perlunya integrasi dengan Ultrakapasitor sebagai media penyimpanan arus regenerasi yang dihasilkan dari pengereman regeneratif. Ultrakapasitor memiliki *life cycle* berkisar $10^6 - 10^8$ dan efisiensi hingga 98% serta nilai arus maksimum hingga 2019 A (LSUC, 1993; Saleh, 2019). Ultrakapasitor memiliki kelemahan yang menjadi kelebihan pada sistem ini yaitu tingkat kerapatan energi yang rendah. Hal ini berpengaruh pada cepat lambat arus masuk atau keluar dari ultrakapasitor, menjadi sangat penting karena pengereman regeneratif dilakukan dalam waktu yang relatif singkat.

2. METODE/PERANCANGAN PENELITIAN

2.1. Perancangan Alat



Gambar 1. Diagram kerja alat

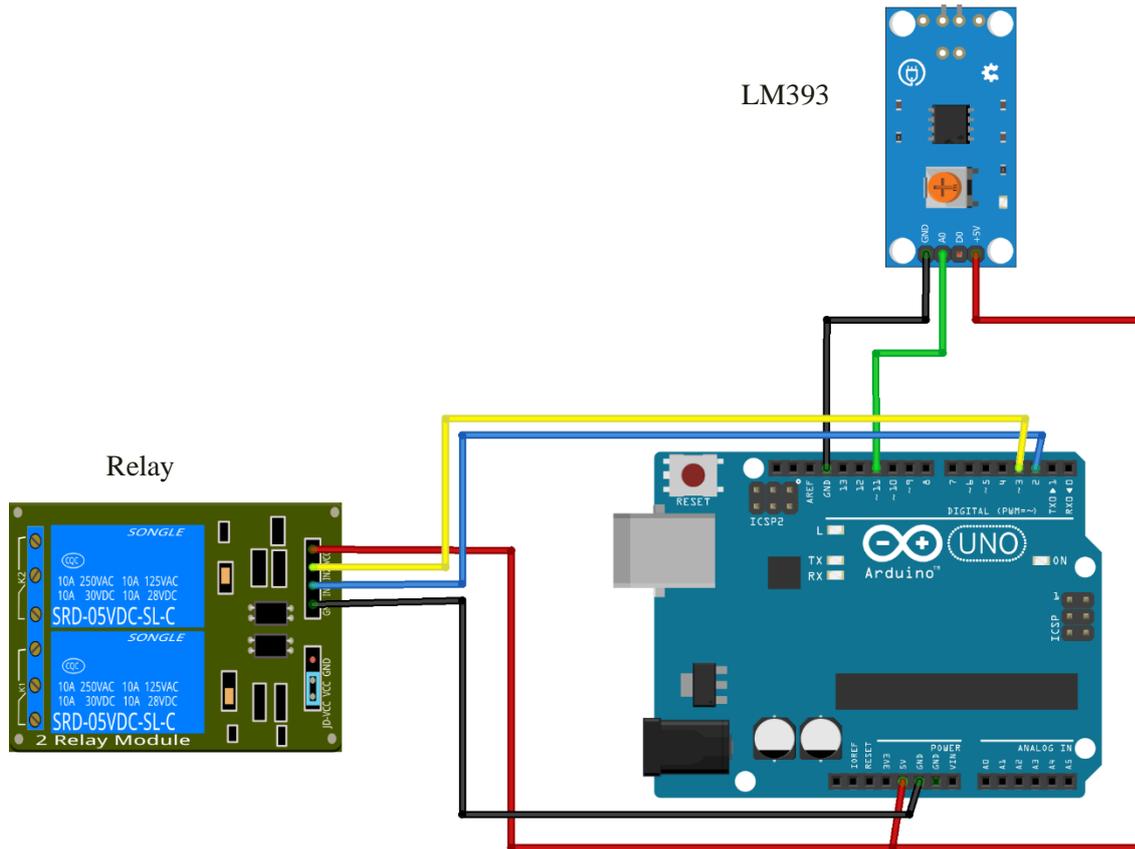
Berikut deskripsi bagan alir diatas :

2.1.1. Konsep Awal

Tahap pertama dalam penelitian ini adalah mencari studi literatur terkait sistem pengereman regeneratif pada penelitian – penelitian sebelumnya dan mempelajari metode yang digunakan. Kemudian merancang konsep awal sistem pengereman regeneratif dengan integrasi ultrakapasitor dan menentukan peralatan apa saja yang akan digunakan guna menunjang pembuatan model uji.

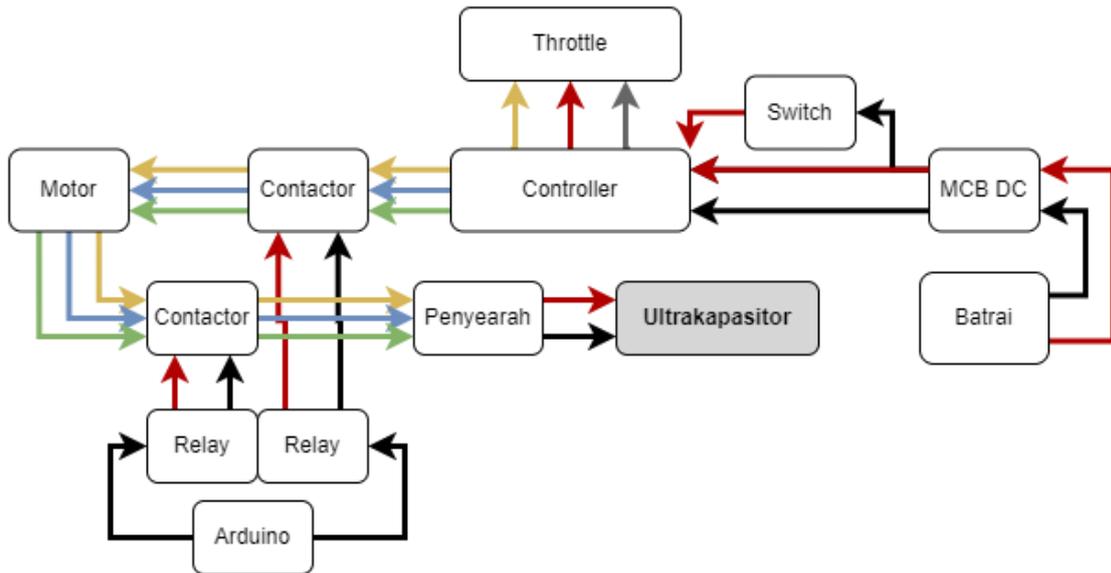
2.1.2. Perancangan Sistem

Setelah konsep awal dan peralatan telah ditentukan, maka tahap selanjutnya adalah merancang sistem baik dari sistem pengukuran kecepatan hingga sistem pengereman regeneratif secara keseluruhan. Rancangan sensor kecepatan dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 2. Skema Rangkaian Sensor Kecepatan

Terlihat pada gambar, Sensor LM393 melalui pin GND, D0 dan +5V berturut – turut terhubung ke pin GND, 11 dan 5V dari Arduino UNO. Kemudian untuk Relay masing-masing pin mulai dari GND, IN1, IN2 dan VCC berturut-turut terhubung ke pin GND, 2, 3 dan 5V dari Aduino UNO. Untuk skema kelistrikan dari sensor kecepatan seperti yang terlihat pada gambar nantinya akan dikendalikan oleh Arduino UNO yang telah diberikan logika agar sensor LM393 dan Relay dapat bekerja sesuai rancangan yang mana ketika sensor LM393 mendeteksi kecepatan untuk rpm tertentu maka secara otomatis relay akan aktif. Relay nantinya akan terhubung dengan kontaktor yang akan memindahkan hubungan motor dengan baterai menjadi motor dengan ultrakapasitor. Kemudian untuk skema rangkaian secara keseluruhan dapat dilihat melalui gambar berikut.



Gambar 3. Skema Rangkaian Pengereman Regeneratif

Terlihat pada skema diatas bahwa semua dimulai dari baterai yang kemudian dihubungkan ke MCB DC sebelum terhubung ke *Controller* agar dapat membatasi arus yang keluar dari baterai guna menjaga keamanan baterai. Kemudian antara *Controller* dan motor juga penyearah dengan motor terdapat kontaktor yang masing-masingnya terhubung dengan relay seperti rancangan pada gambar sebelumnya. Skema ini digunakan agar ketika motor mencapai batas rpm yang ditentukan maka secara otomatis hubungan antara *Controller* dengan motor diputus dan motor dengan penyearah menjadi terhubung yang kemudian masuk ke ultrakapasitor. Sesuai dengan rumus energi kinetik :

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 \dots\dots\dots (1)$$

- E_k = Energi Kinetik (J)
- m = Massa (kg)
- v = Kecepatan (m/s)

Maka yang menjadi faktor utama dalam peningkatan energi adalah kecepatan dan juga massa. Oleh karena itu penelitian ini memberikan variasi kecepatan dan juga beban yang terhubung ke motor agar dapat melihat perbedaan tingkat energi yang dihasilkan.

2.1.3. Variabel Independen dan Dependen

Berikutnya adalah variabel independen, dependen dan juga indikator keberhasilan yang digunakan pada penelitian ini.

Tabel 1. Variabel Independen

No	Bagian	Variabel Independen
1.	Motor BLDC	Tegangan, kecepatan, daya
2.	Controller	Jenis, tegangan, daya
4.	Baterai	Tegangan, kapasitas
5.	Roda	Inersia

Tabel 2. Variabel Dependen

No	Bagian	Variabel Dependen
1.	Roda	Perlambatan
2.	Ultrakapasitor	Arus, Tegangan, Energi

Tabel 3. Data dan Indikator Keberhasilan

No	Data	Metode	Indikator Keberhasilan
1.	Arus Regenerasi	Pengukuran dengan menggunakan multimeter	Nilai arus regenerasi didapatkan melalui pengukuran.
2.	Tegangan Regenerasi	Pengukuran dengan menggunakan multimeter	Nilai tegangan dari motor didapatkan melalui pengukuran.
3.	Perlambatan	Pengukuran dengan menggunakan sensor LM393	Nilai perlambatan didapatkan melalui pengukuran dengan sensor.

2.1.4. Perakitan Alat

Tahap selanjutnya adalah perakitan alat yang diawali dengan perakitan model uji pengereman regeneratif sesuai dengan skema rangkaian yang telah dibuat. Kemudian perakitan sensor kecepatan dan relay sesuai dengan skema dan membuat program untuk ditanamkan ke Arduino UNO untuk mengatur sensor kecepatan dan relay. Setelah berhasil dilanjutkan ke tahap berikutnya.

2.1.5. Pengujian Alat

Tahap selanjutnya adalah pengujian alat yang diawali dengan pengujian sensor kecepatan dan relay. Dilanjutkan dengan pengujian alat secara keseluruhan dengan menentukan batas kecepatan tertentu dan ditanamkan ke Arduino UNO. Setelah alat bekerja sesuai dengan perencanaan maka dilanjutkan ke tahap berikutnya.

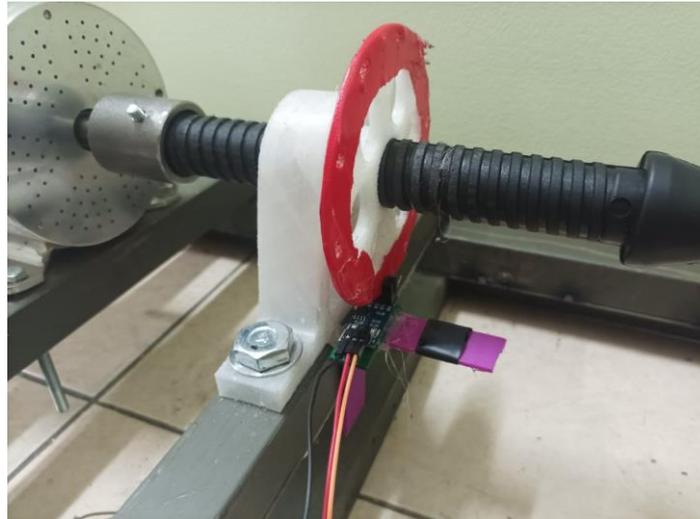
2.1.6. Pengambilan Data

Setelah alat bekerja dengan baik, maka selanjutnya adalah pengambilan data. Data yang diambil diberikan variasi berdasarkan kecepatan dan juga beban (*Dumble*) yang terhubung dengan motor. Kemudian akan dilihat nilai energi yang dihasilkan dan juga perlambatan yang terjadi.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

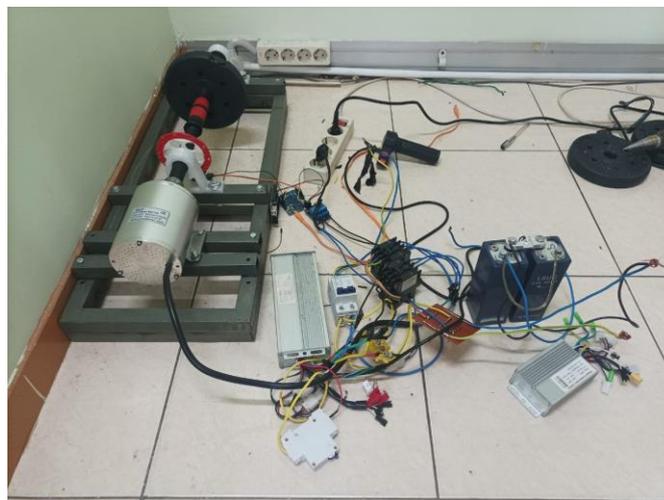
3.1. Hasil perakitan alat uji

Berdasarkan perencanaan dan perakitan alat yang dibahas pada bab sebelumnya, berikut adalah hasil alat uji yang telah dilakukan perakitan :



Gambar 4. Sensor Kecepatan

Gambar diatas merupakan sensor kecepatan yang diletakkan pada piringan dengan 10 lubang dibagian sisi luarnya. Hal ini dilakukan karena sensor kecepatan yang digunakan akan mendeteksi setiap lubang yang melaluinya. Hasil deteksi ini menjadi nilai kecepatan motor dengan tambahan perhitungan menggunakan persamaan pada pembahasan sebelumnya.

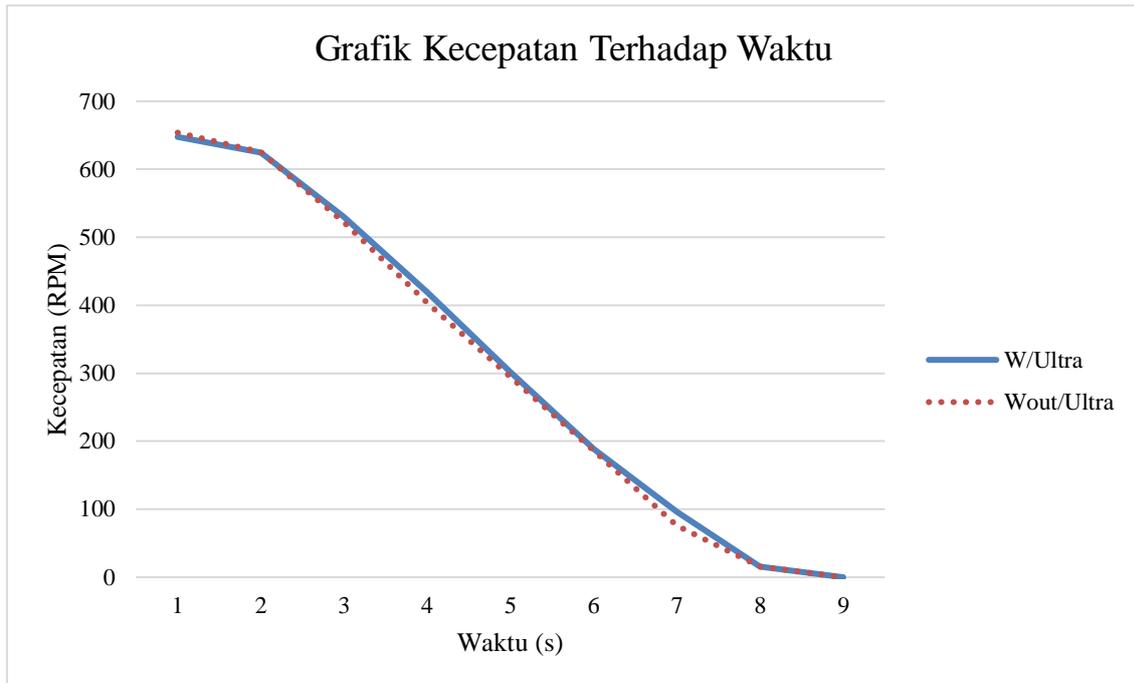


Gambar 5. Model Uji Pengereman Regeneratif

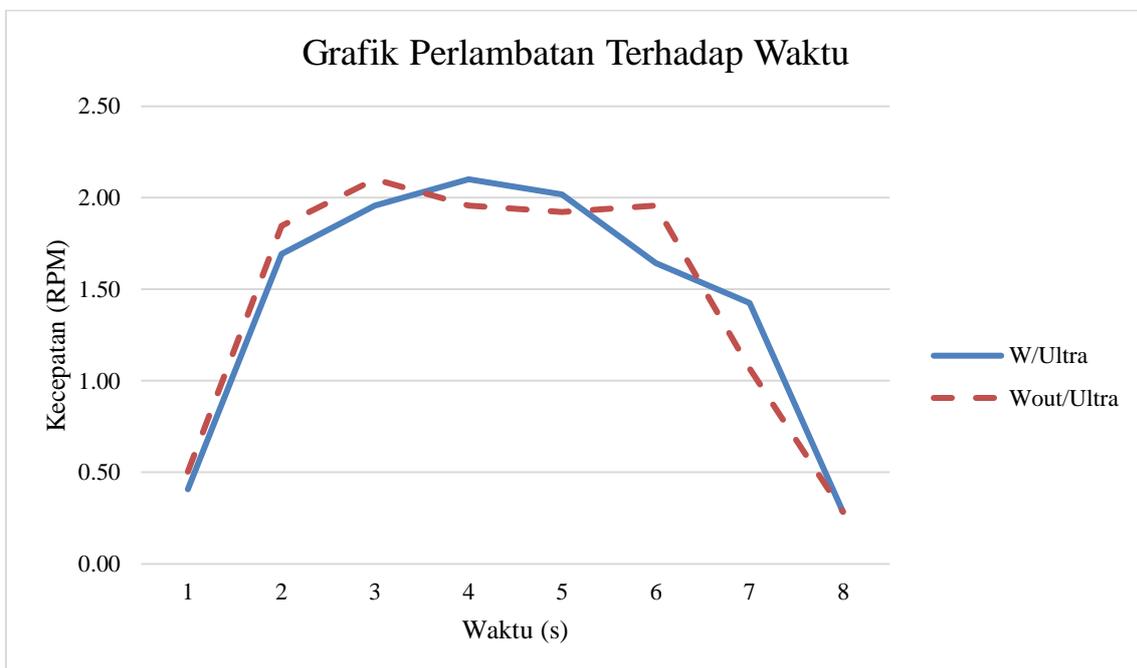
Gambar diatas merupakan gambar alat secara keseluruhan yang dirangkai sesuai dengan skema rangkaian yang telah dibuat.

3.2. Pengujian dengan Beban 2.5 kg Kecepatan 600 rpm dengan Satu Buah Ultrakapasitor

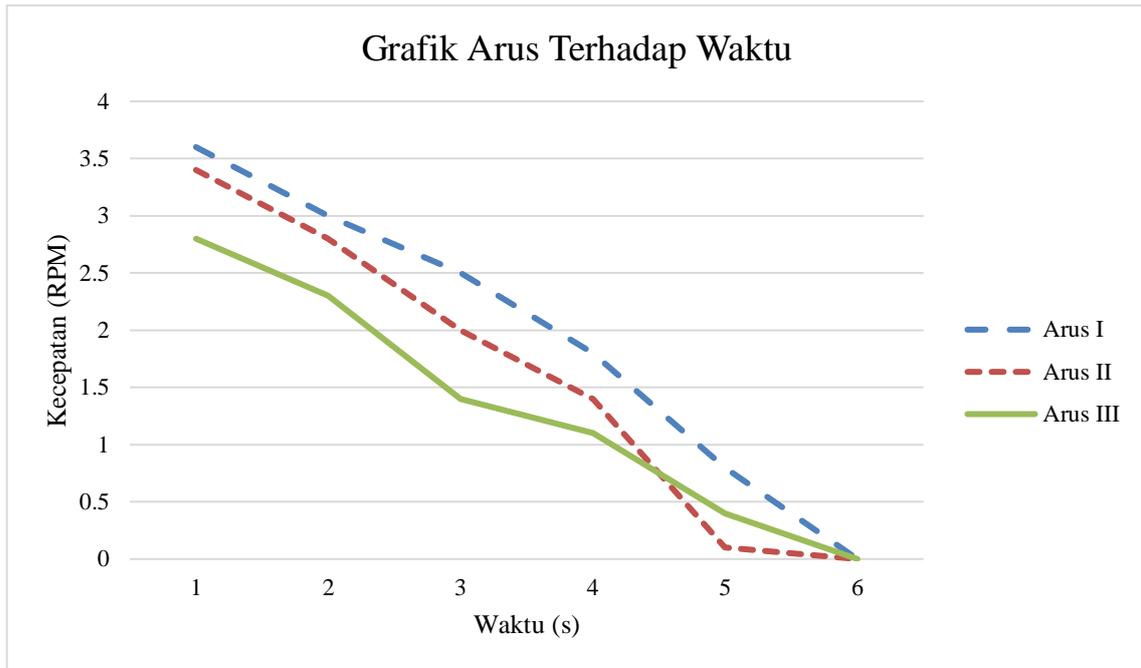
Berdasarkan hasil uji yang dilakukan untuk kecepatan 600 rpm dengan satu buah ultrakapasitor dan beban 2.5 kg didapatkan data sebagai berikut:



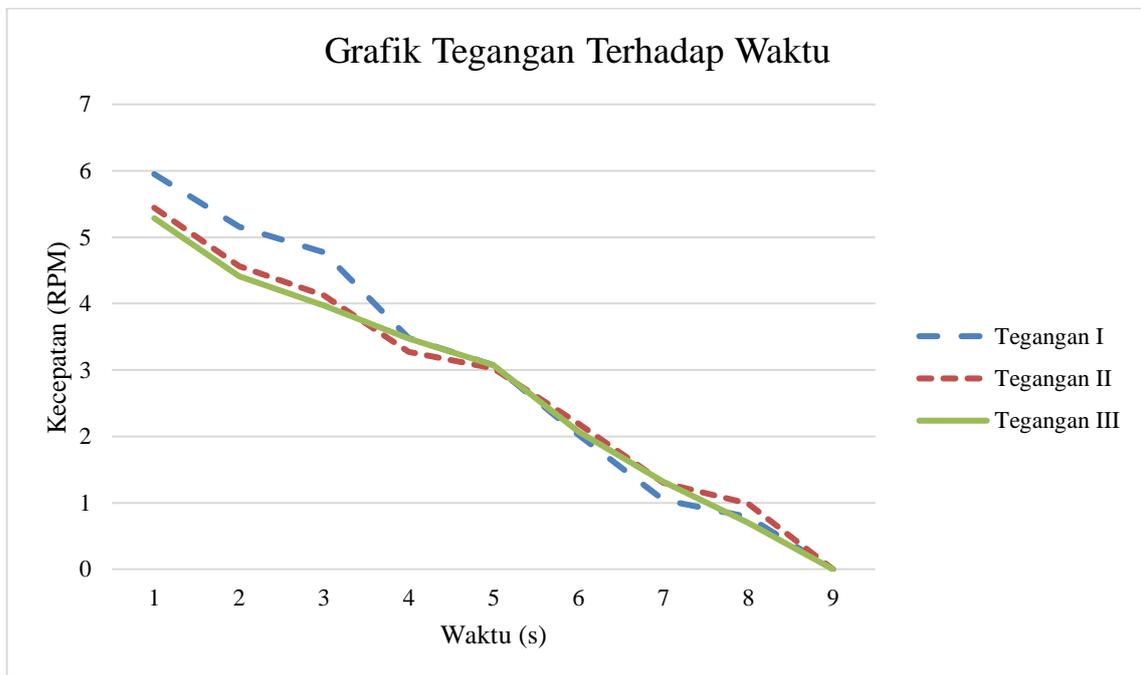
Gambar 6. Grafik Kecepatan Terhadap Waktu – (600 rpm - 2.5 kg)



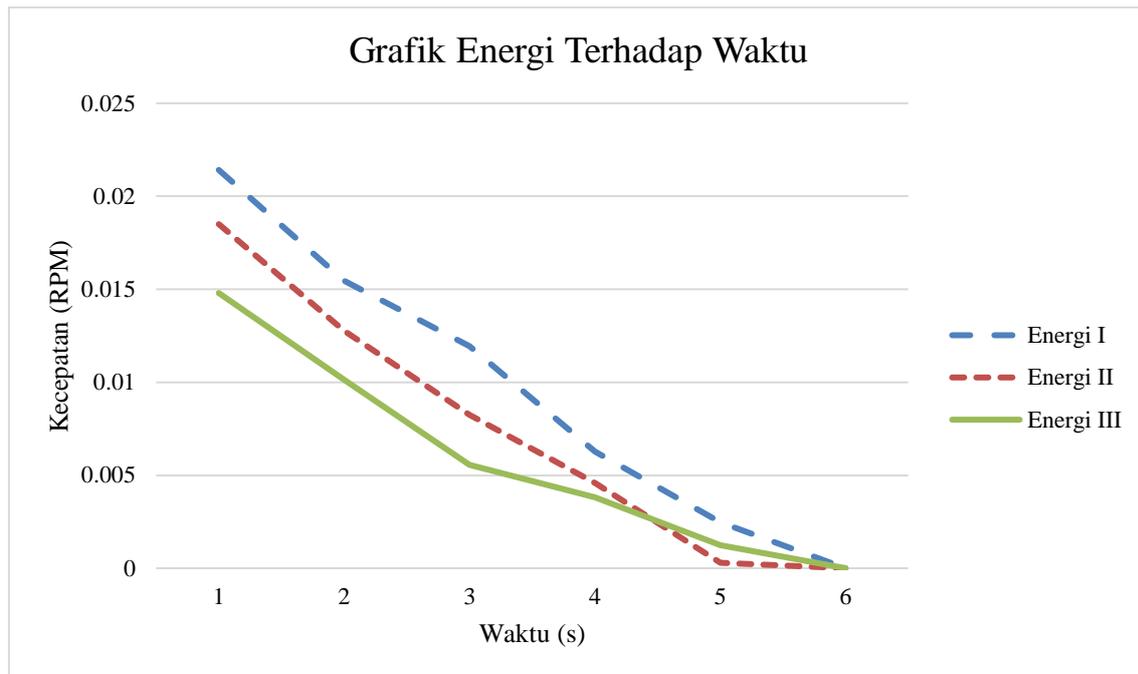
Gambar 7. Grafik Perlambatan Terhadap Waktu - (600 rpm - 2.5 kg)



Gambar 8. Grafik Arus Terhadap Waktu - (600 rpm - 2.5 kg)



Gambar 9. Grafik Tegangan Terhadap Waktu - (600 rpm - 2.5 kg)

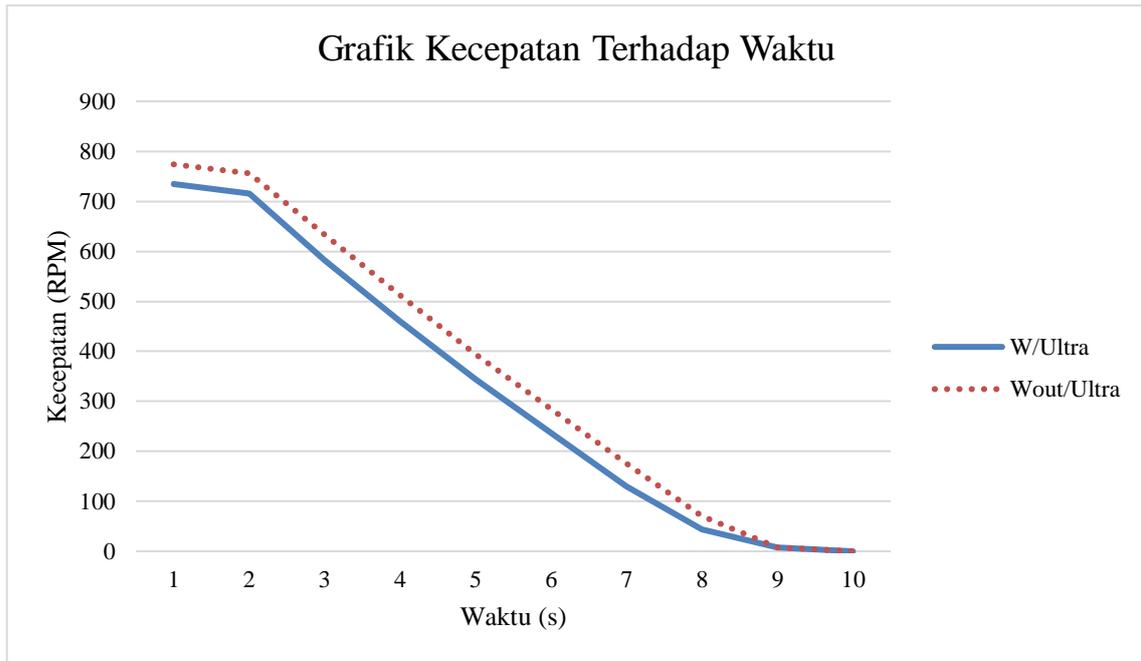


Gambar 10. Grafik Energi Terhadap Waktu - (600 rpm - 2.5 kg)

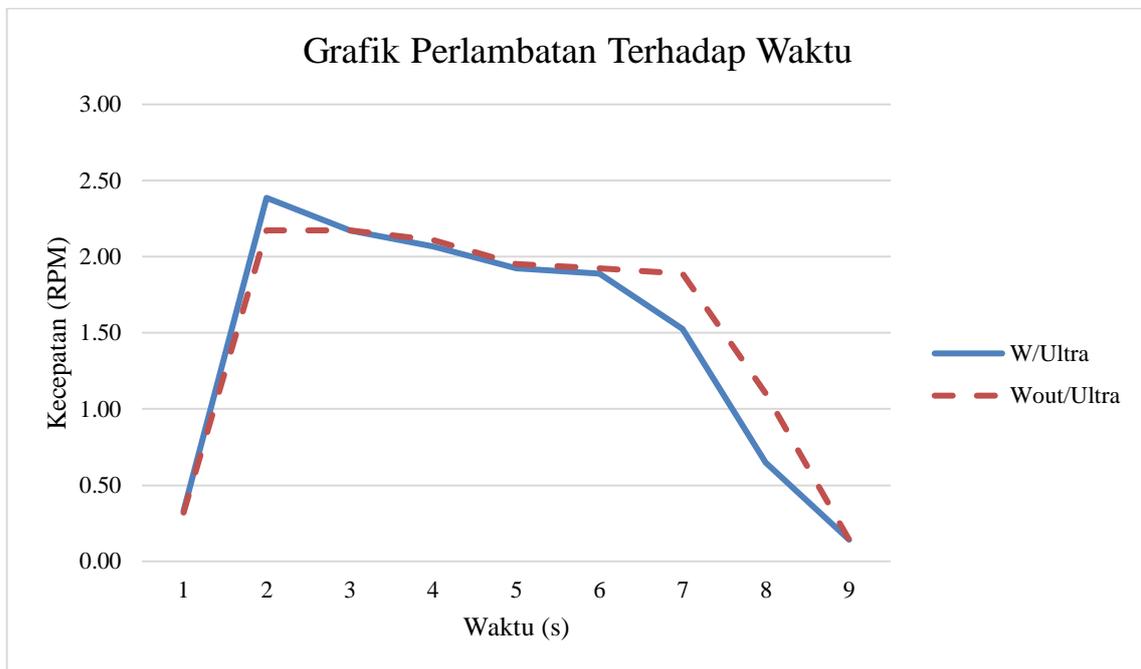
Berdasarkan grafik (6-10) diatas, dapat diketahui bahwa untuk pengujian beban 2.5 kg dengan satu buah ultrakapasitor dan batas kecepatan diatur 600 rpm didapatkan hasil kecepatan tanpa ultrakapasitor dengan satu buah ultrakapsitor tidak memiliki perbedaan yang terlalu berarti. Kedua kondisi sama-sama menempuh waktu 9 detik untuk berhenti. Sedangkan untuk nilai perlambatan yang dihasilkan, keduanya menghasilkan grafik yang relatif sama dengan nilai rata-rata untuk tanpa ultrakapasitor sebesar 1.44 m/s^2 dan dengan ultrakapasitor sebesar 1.45 m/s^2 . Dengan hasil ini, dapat dikatakan bahwa pengujian pertama untuk kecepatan 600 rpm ini tidak memberikan perlambatan yang berarti. Sedangkan untuk arus, tegangan dan energi yang dihasilkan dapat dilihat pada grafik tersebut. Ketiganya ditampilkan dalam hasil tiga kali percobaan. Untuk arus didapatkan nilai tertinggi sebesar 3.6 mA. Sedangkan untuk tegangan menghasilkan nilai tertinggi pada percobaan pertama sebesar 5.95 V. Berdasarkan data arus dan tegangan, didapatkan nilai energi regenerasi terbesar ada pada percobaan pertama sebesar 0.0575434 Joule.

3.3. Kecepatan 700 rpm dengan Satu Buah Ultrakapasitor

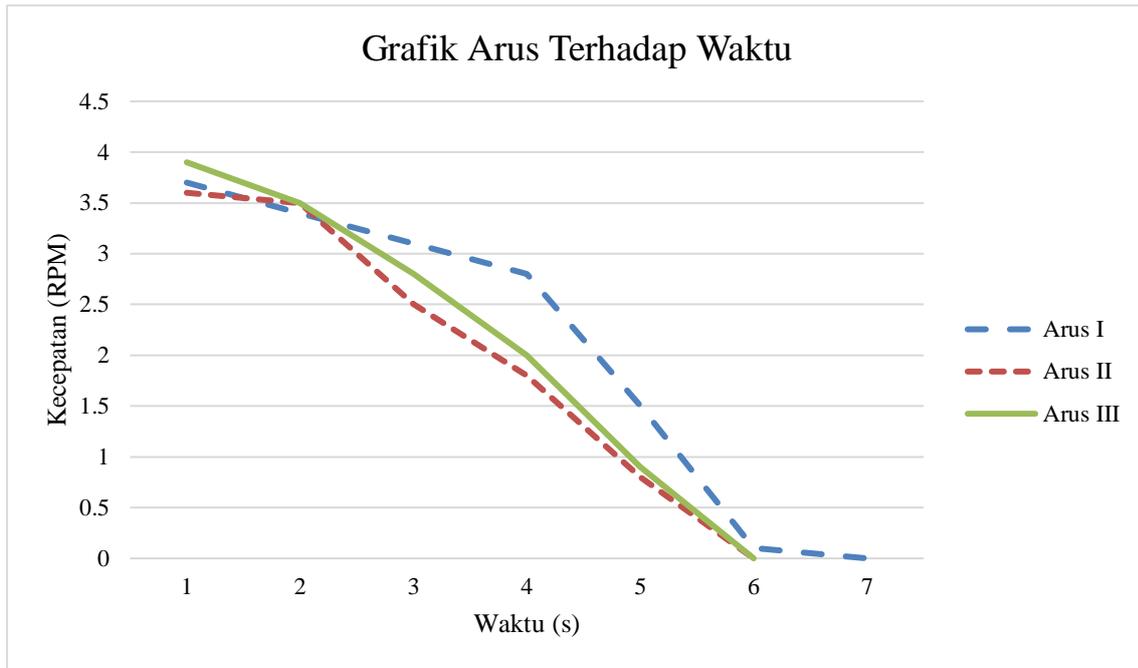
Berdasarkan hasil uji yang dilakukan untuk kecepatan 700 rpm dengan satu buah ultrakapasitor dan beban 2.5 kg didapatkan data sebagai berikut :



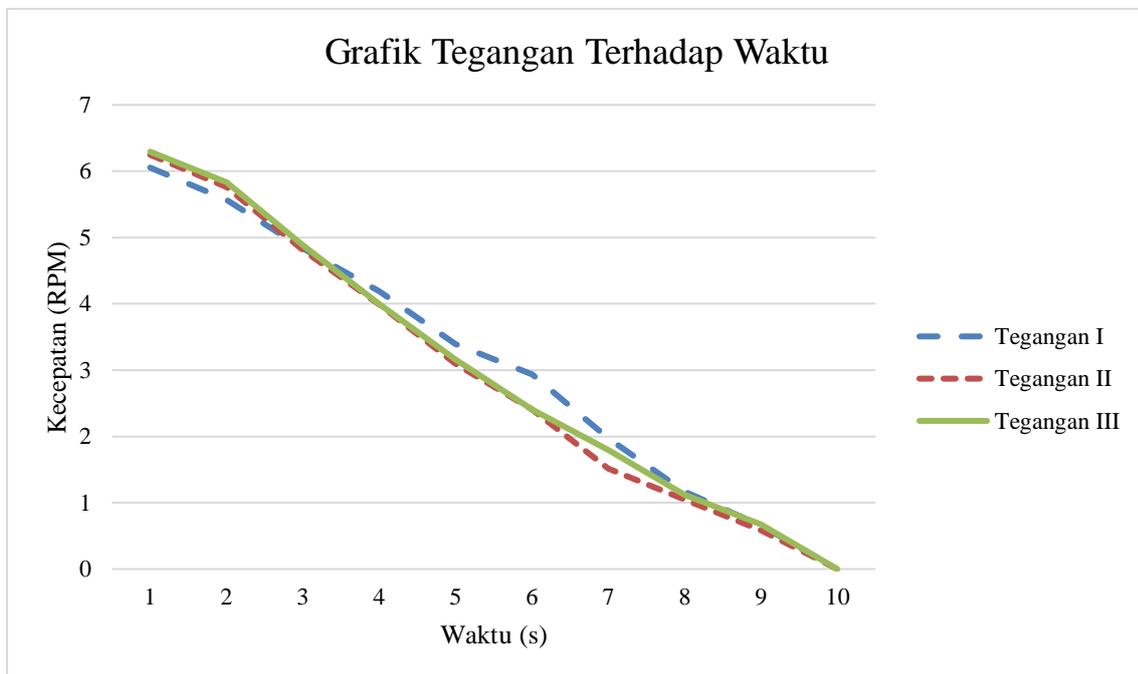
Gambar 11. Grafik Kecepatan Terhadap Waktu - (700 rpm - 2.5 kg)



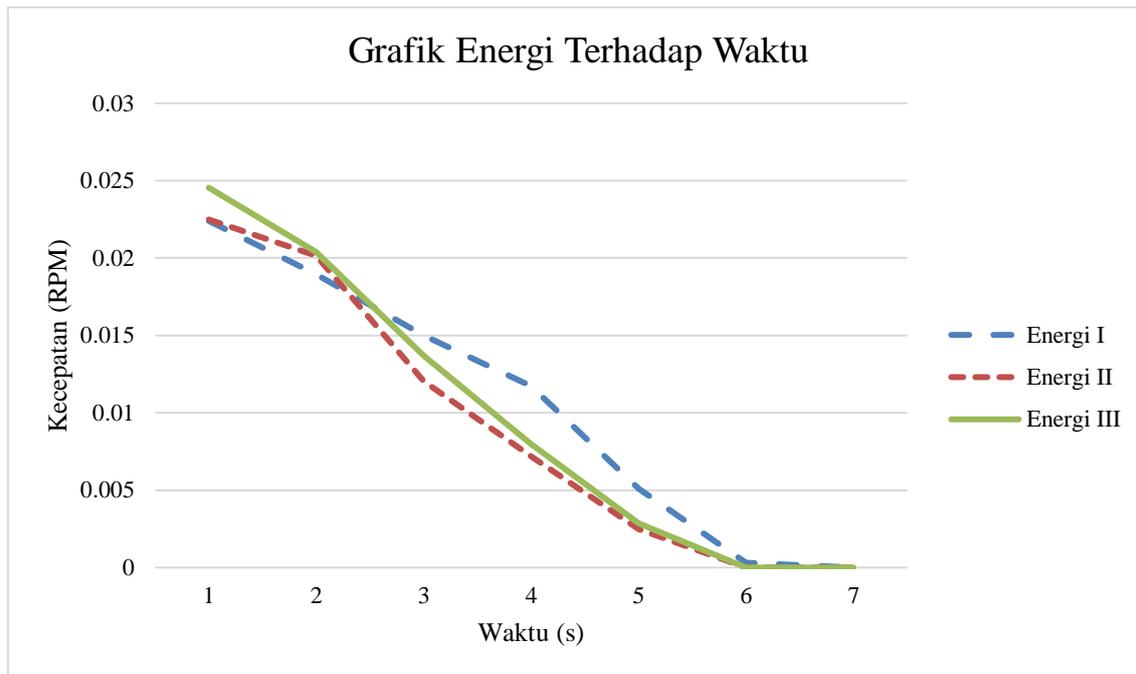
Gambar 12. Grafik Perlambatan Terhadap Waktu - (700 rpm - 2.5 kg)



Gambar 13. Grafik Arus Terhadap Waktu - (700 rpm - 2.5 kg)



Gambar 14. Grafik Tegangan Terhadap Waktu - (700 rpm - 2.5 kg)

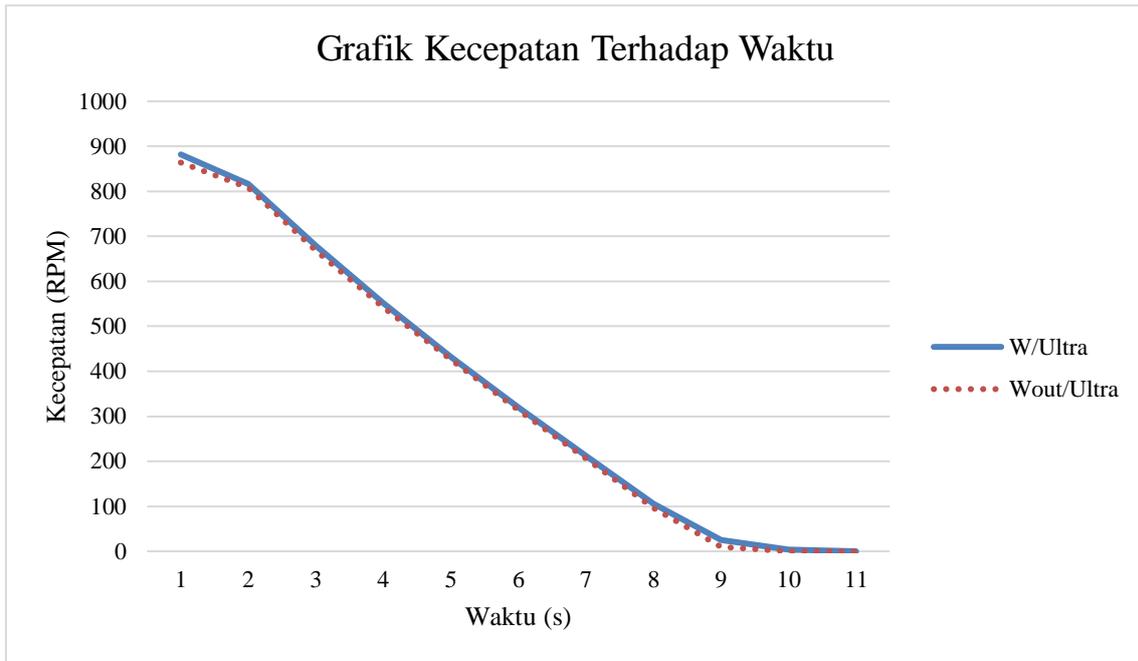


Gambar 15. Grafik Energi Terhadap Waktu - (700 rpm - 2.5 kg)

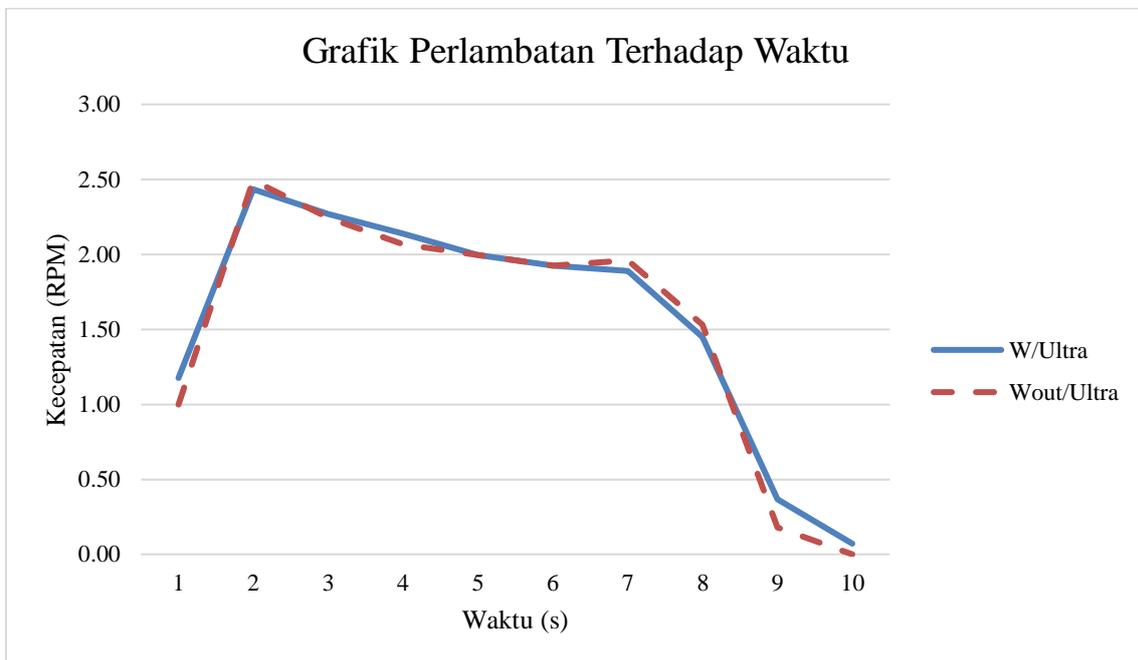
Berdasarkan grafik (11-15) diatas, dapat kita ketahui bahwa untuk pengujian berikutnya dengan beban yang sama namun batas kecepatan ditingkatkan menjadi 700 rpm didapatkan hasil kecepatan tanpa ultrakapasitor dengan satu buah ultrakapasitor tidak memiliki perbedaan yang terlalu berarti. Kedua kondisi sama-sama menempuh waktu 10 detik untuk dapat berhenti total. Sedangkan untuk nilai perlambatan rata-rata yang dihasilkan untuk tanpa ultrakapasitor sebesar 1.45 m/s^2 dan satu buah ultrakapasitor sebesar 1.53 m/s^2 . Dengan hasil ini, dapat dikatakan bahwa pengujian untuk kecepatan 700 rpm dengan beban 2.5 kg ini mendapati nilai perlambatan dengan satu buah ultrakapasitor lebih tinggi daripada tanpa ultrakapasitor. Sedangkan untuk arus, tegangan dan energi yang dihasilkan dapat dilihat pada grafik tersebut. Ketiganya ditampilkan dalam hasil tiga kali percobaan, untuk arus didapatkan hasil tertinggi sebesar 3.9 mA di percobaan ketiga dan tegangan mendapatkan nilai tertinggi sebesar 6.294 V juga di percobaan ketiga. Dari hasil arus dan tegangan, didapatkan nilai energi tertinggi yang dihasilkan sebesar 0.0734487 Joule.

3.4. Kecepatan 800 rpm dengan Satu Buah Ultrakapasitor

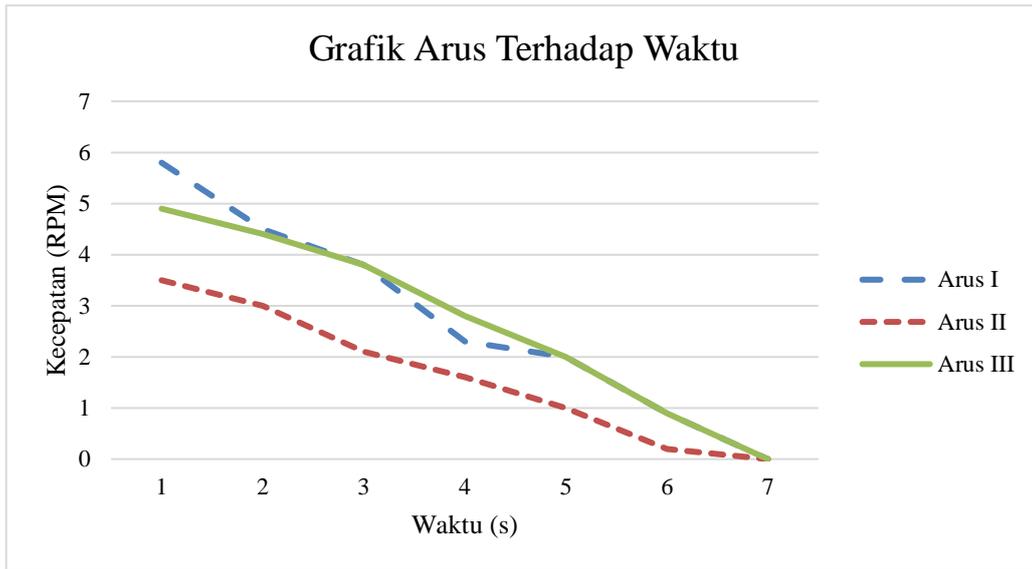
Berdasarkan hasil uji yang dilakukan untuk kecepatan 800 rpm dengan satu buah ultrakapasitor dan beban 2.5 kg didapatkan data sebagai berikut:



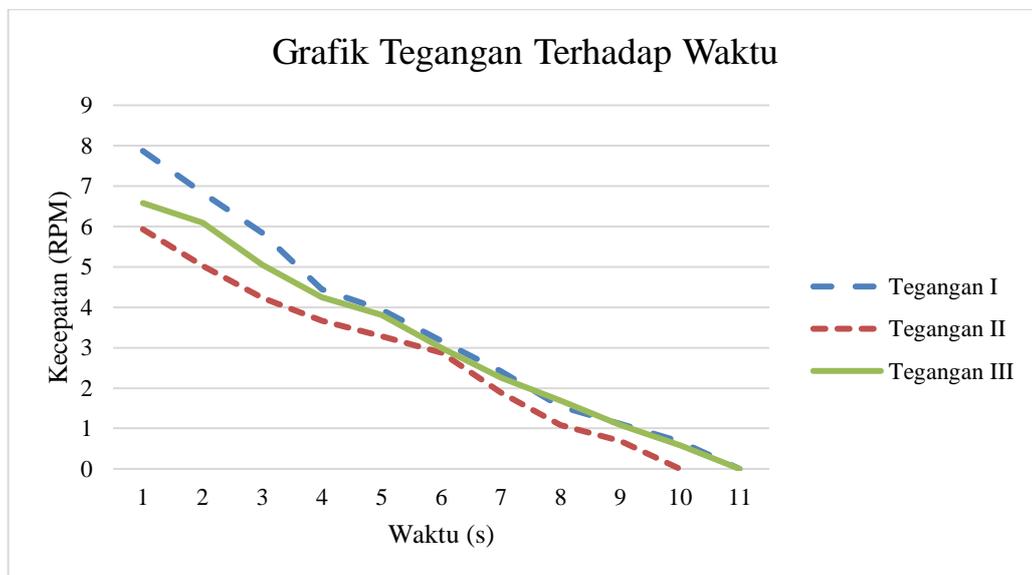
Gambar 16. Grafik Kecepatan Terhadap Waktu - (800 rpm - 2.5 kg)



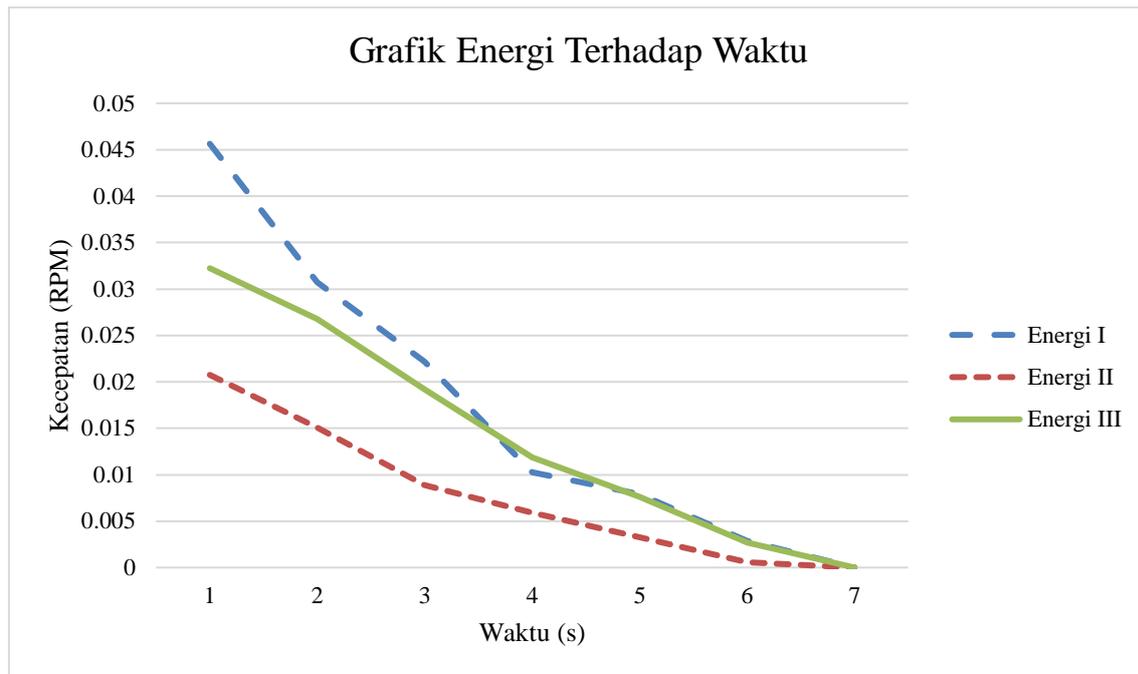
Gambar 17. Grafik Perlambatan Terhadap Waktu - (800 rpm - 2.5 kg)



Gambar 18. Grafik Arus Terhadap Waktu - (800 rpm - 2.5 kg)



Gambar 19. Grafik Tegangan Terhadap Waktu - (800 rpm - 2.5 kg)

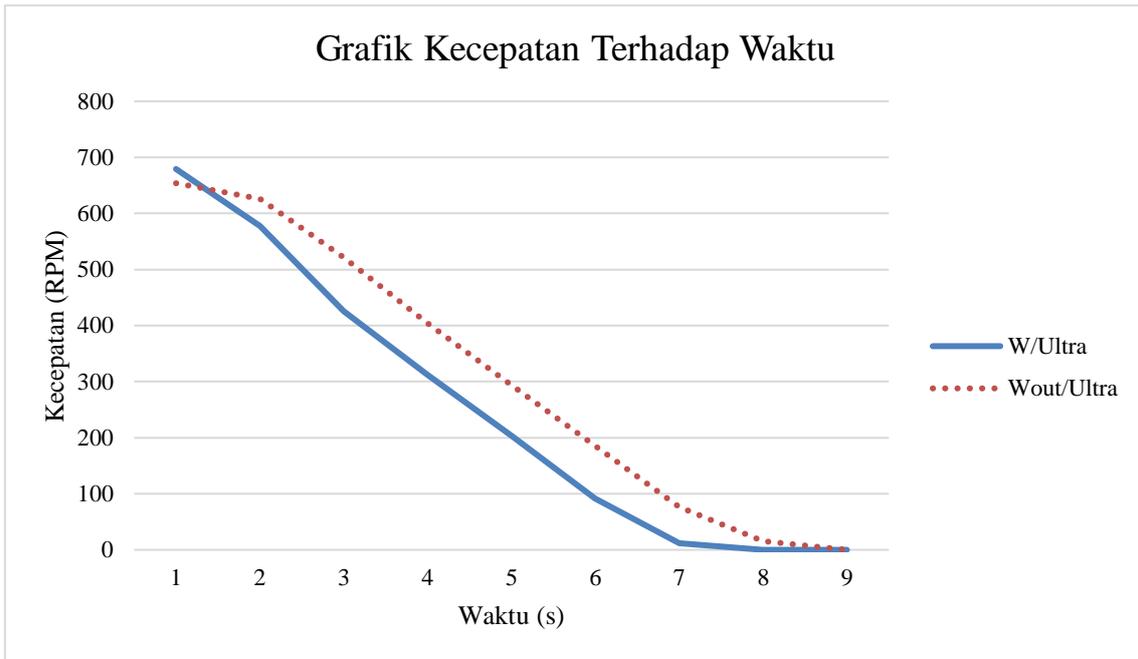


Gambar 20. Grafik Energi Terhadap Waktu - (800 rpm - 2.5 kg)

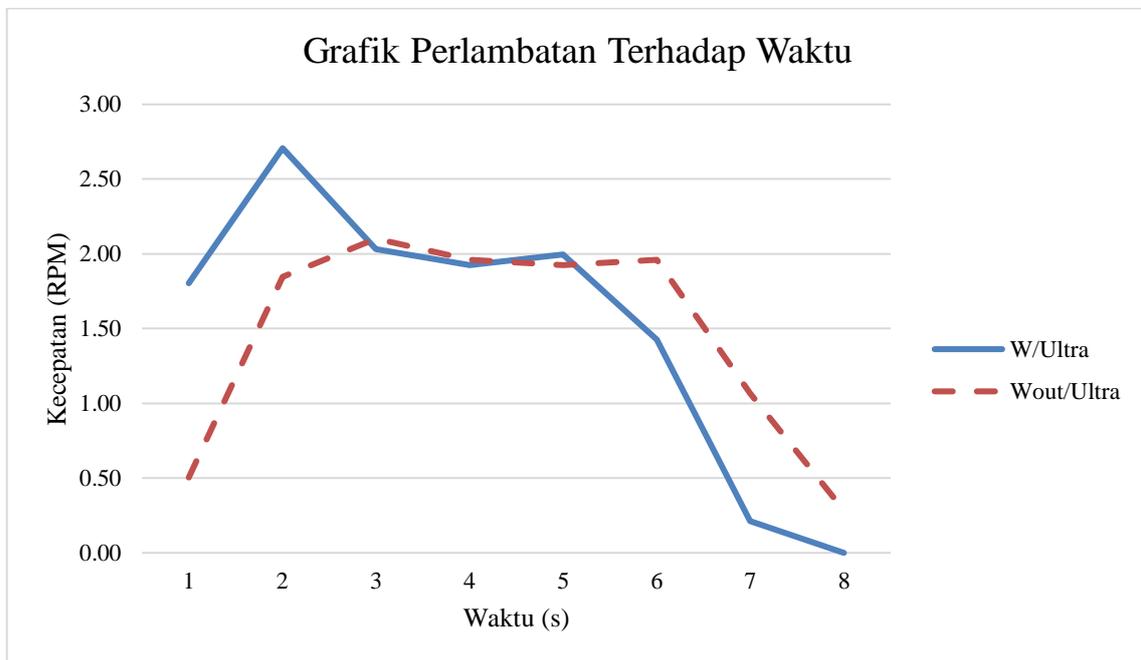
Berdasarkan grafik (16-20) diatas, dapat kita ketahui bahwa untuk pengujian berikutnya dengan beban yang sama namun batas kecepatan ditingkatkan menjadi 800 rpm didapatkan hasil kecepatan tanpa ultrakapasitor dengan satu buah ultrakapasitor tidak memiliki perbedaan yang terlalu berarti. Kedua kondisi sama-sama menempuh waktu 11 detik untuk dapat berhenti total. Sedangkan untuk nilai perlambatan rata-rata yang dihasilkan untuk tanpa ultrakapasitor sebesar 1.54 m/s^2 dan tanpa ultrakapasitor sebesar 1.57 m/s^2 . Dengan hasil ini, dapat dikatakan bahwa pengujian untuk kecepatan 800 rpm dengan beban 2.5 kg ini mendapati nilai perlambatan dengan satu buah ultrakapasitor lebih tinggi daripada tanpa ultrakapasitor. Sedangkan untuk arus, tegangan dan energi yang dihasilkan dapat dilihat pada grafik tersebut. Ketiganya ditampilkan dalam hasil tiga kali percobaan, untuk arus didapatkan hasil tertinggi sebesar 5.8 mA di percobaan ketiga dan tegangan mendapatkan nilai tertinggi sebesar 7.87 V juga dipercobaan ketiga. Dari hasil arus dan tegangan, didapatkan nilai energi tertinggi yang dihasilkan sebesar 0.1195419 Joule.

3.5. Kecepatan 600 rpm dengan Dua Buah Ultrakapasitor Paralel

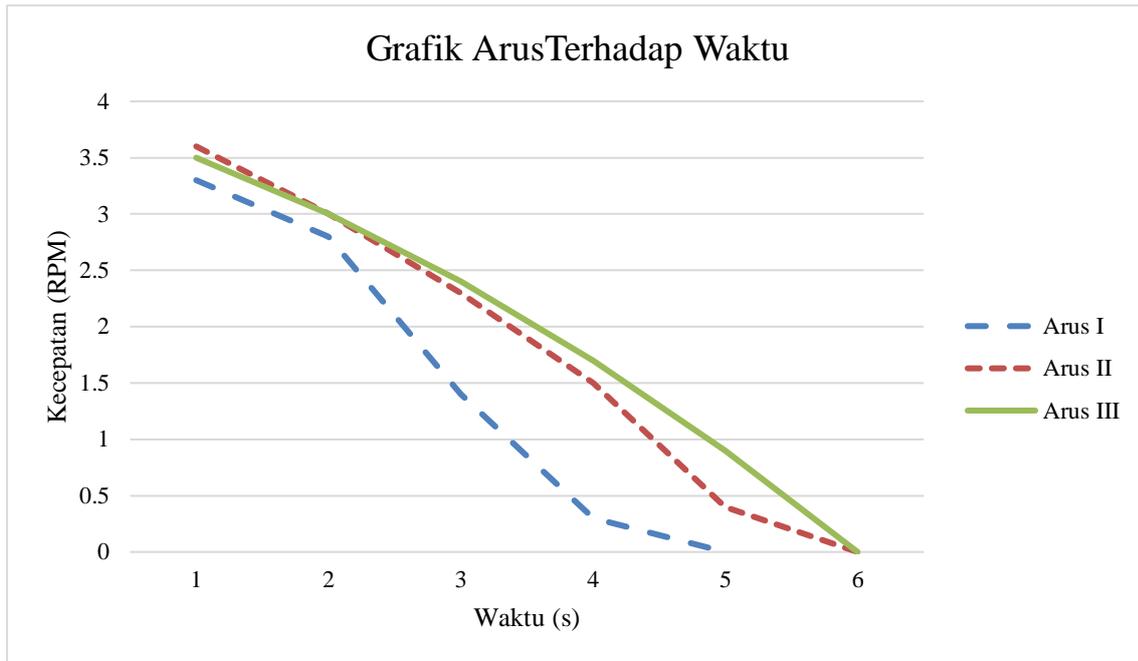
Berdasarkan hasil uji yang dilakukan untuk kecepatan 600 rpm dengan dua buah ultrakapasitor yang dirangkai secara paralel dan beban 2.5 kg didapatkan data sebagai berikut:



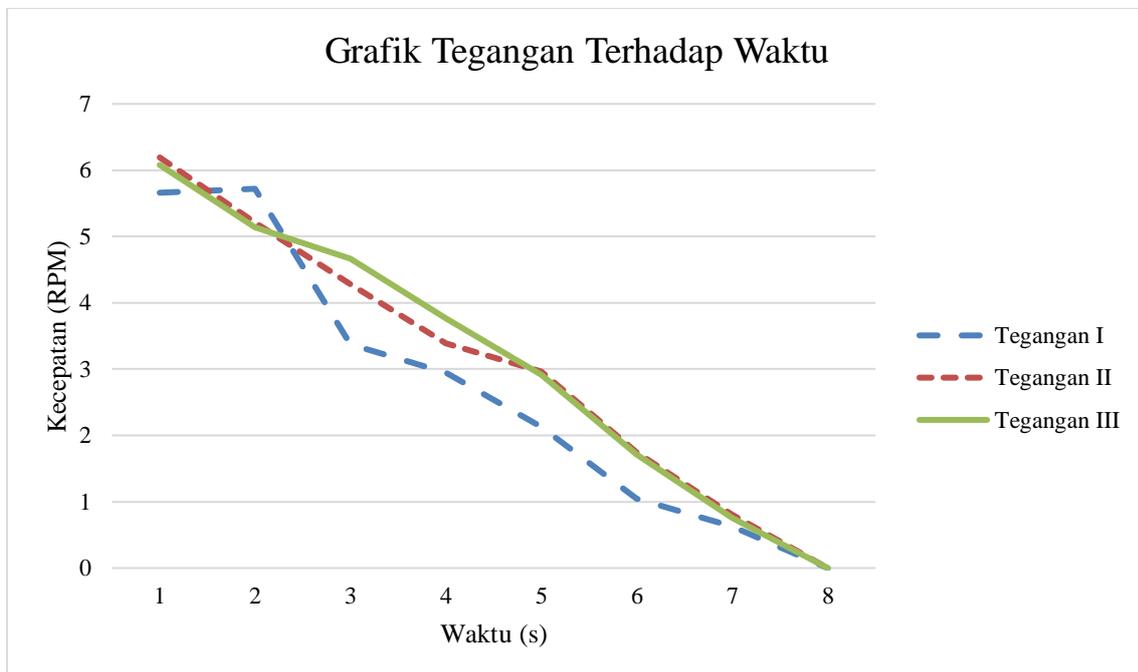
Gambar 21. Grafik Kecepatan Terhadap Waktu - (600 rpm - 2.5 kg)



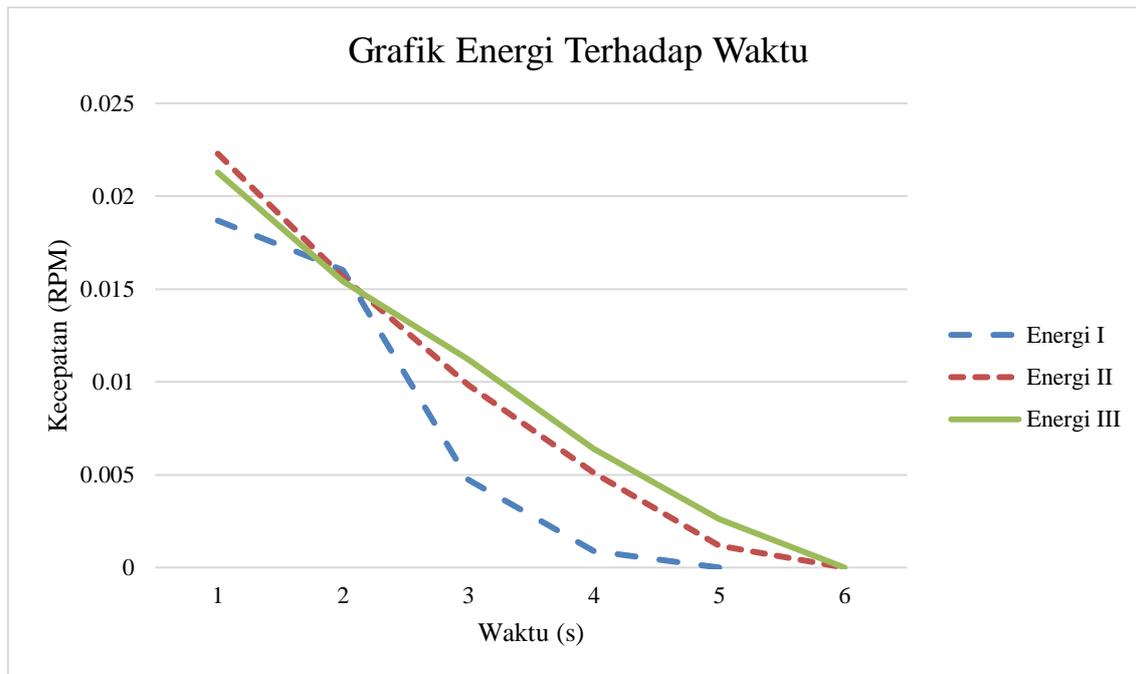
Gambar 22. Grafik Perlambatan Terhadap Waktu - (600 rpm - 2.5 kg)



Gambar 23. Grafik Arus Terhadap Waktu - (600 rpm - 2.5 kg)



Gambar 24. Grafik Tegangan Terhadap Waktu - (600 rpm - 2.5 kg)

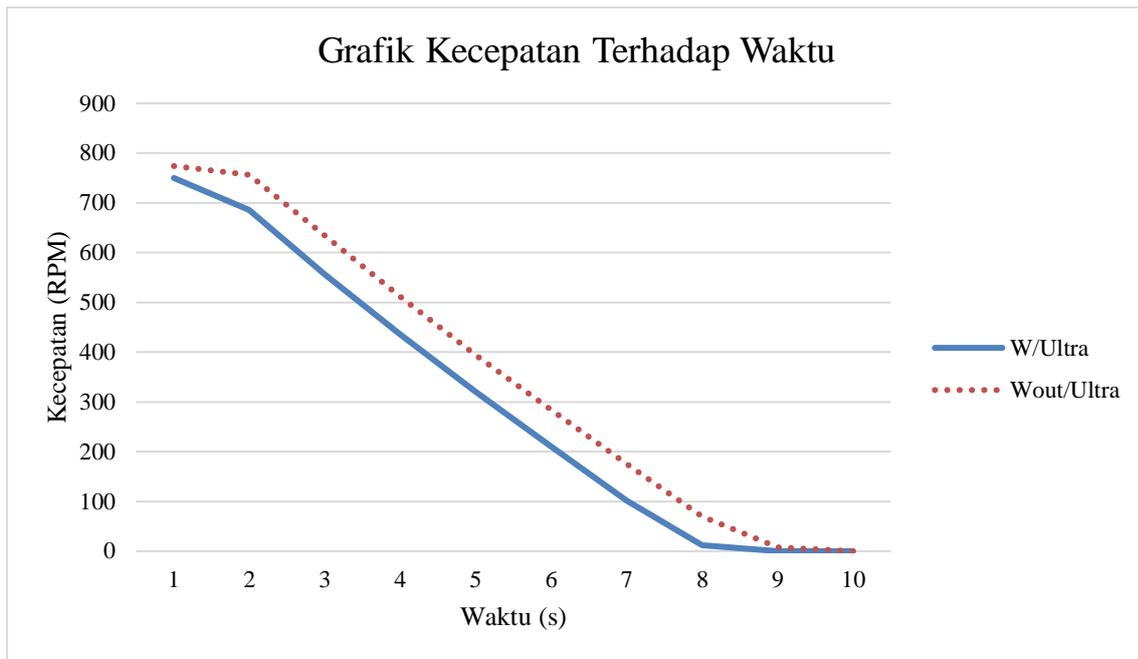


Gambar 25. Grafik Energi Terhadap Waktu - (600 rpm - 2.5 kg)

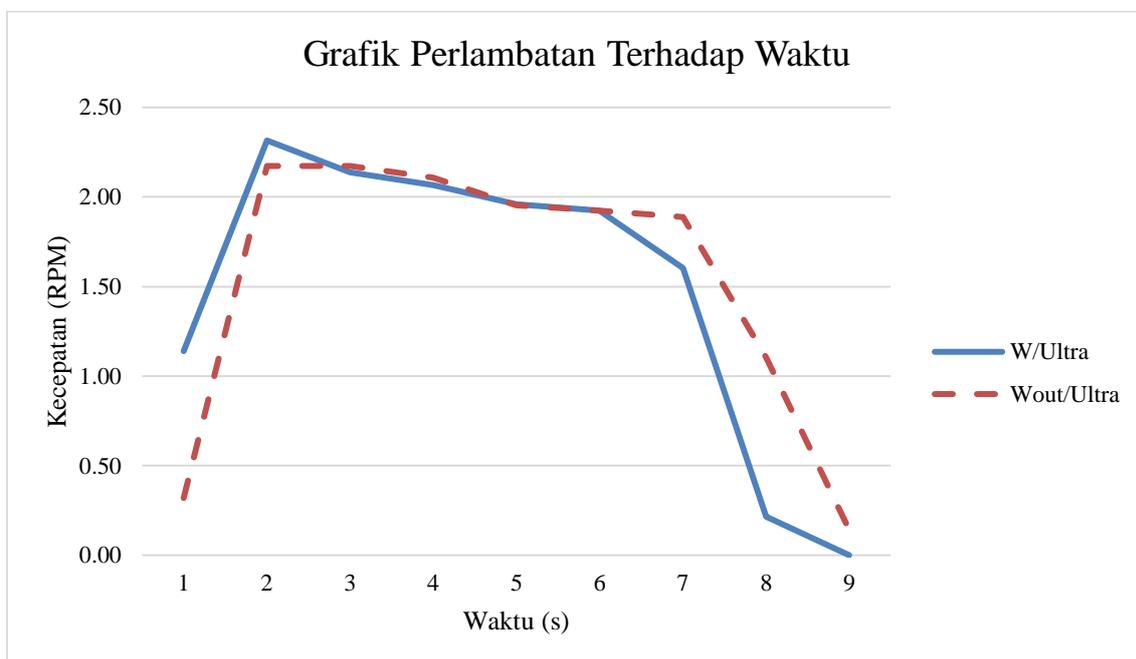
Berdasarkan grafik (21-25) diatas, dapat diketahui bahwa untuk pengujian beban 2.5 kg dengan dua buah ultrakapasitor paralel dan batas kecepatan diatur 600 rpm didapatkan hasil kecepatan tanpa ultrakapasitor dengan satu buah ultrakapsitor memiliki perbedaan. Dengan ultrakapasitor paralel, motor berhenti dalam waktu 8 detik sedangkan tanpa ultrakapasitor selama 9 detik. Untuk nilai perlambatan yang dihasilkan, keduanya menghasilkan grafik yang relatif tidak sama dengan nilai rata-rata untuk tanpa ultrakapasitor sebesar 1.46 m/s^2 dan dengan ultrakapasitor sebesar 1.51 m/s^2 . Dengan hasil ini, dapat dikatakan bahwa pengujian pertama untuk kecepatan 600 rpm mendapati dengan ultrakapasitor paralel nilai perlambatannya lebih tinggi dibandingkan tanpa ultrakapasitor. Sedangkan untuk arus, tegangan dan energi yang dihasilkan dapat dilihat pada grafik tersebut. Ketiganya ditampilkan dalam hasil tiga kali percobaan. Untuk arus didapatkan nilai tertinggi sebesar 3.6 mA. Sedangkan untuk tegangan menghasilkan nilai tertinggi pada percobaan pertama sebesar 6.192 V. Berdasarkan data arus dan tegangan, didapatkan nilai energi regenerasi terbesar ada pada percobaan pertama sebesar 0.05691 Joule.

3.6. Kecepatan 700 rpm dengan Dua Buah Ultrakapasitor Paralel

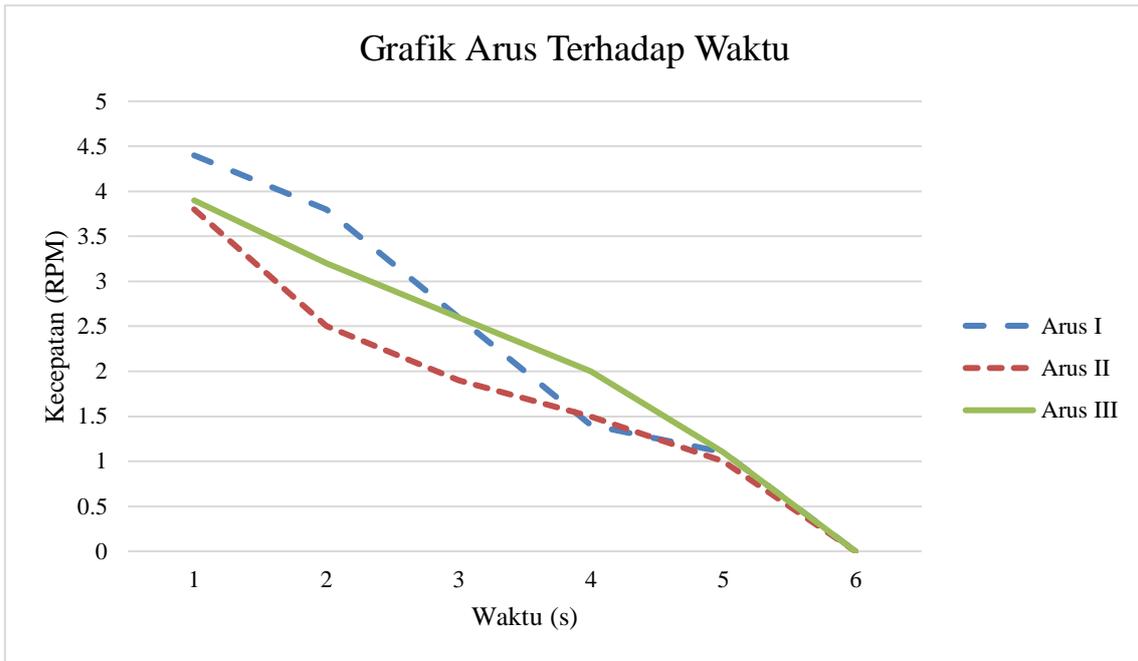
Berdasarkan hasil uji yang dilakukan untuk kecepatan 700 rpm dengan dua buah ultrakapasitor yang dirangkai secara paralel dan beban 2.5 kg didapatkan data sebagai berikut :



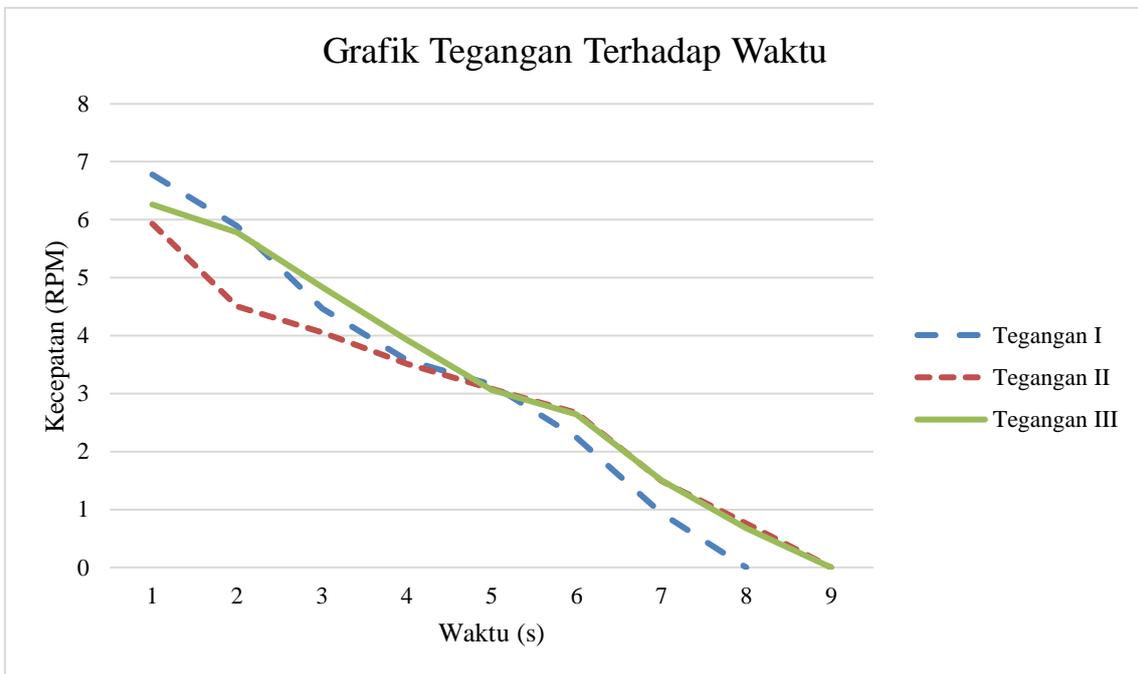
Gambar 26. Grafik Kecepatan Terhadap Waktu - (700 rpm - 2.5 kg)



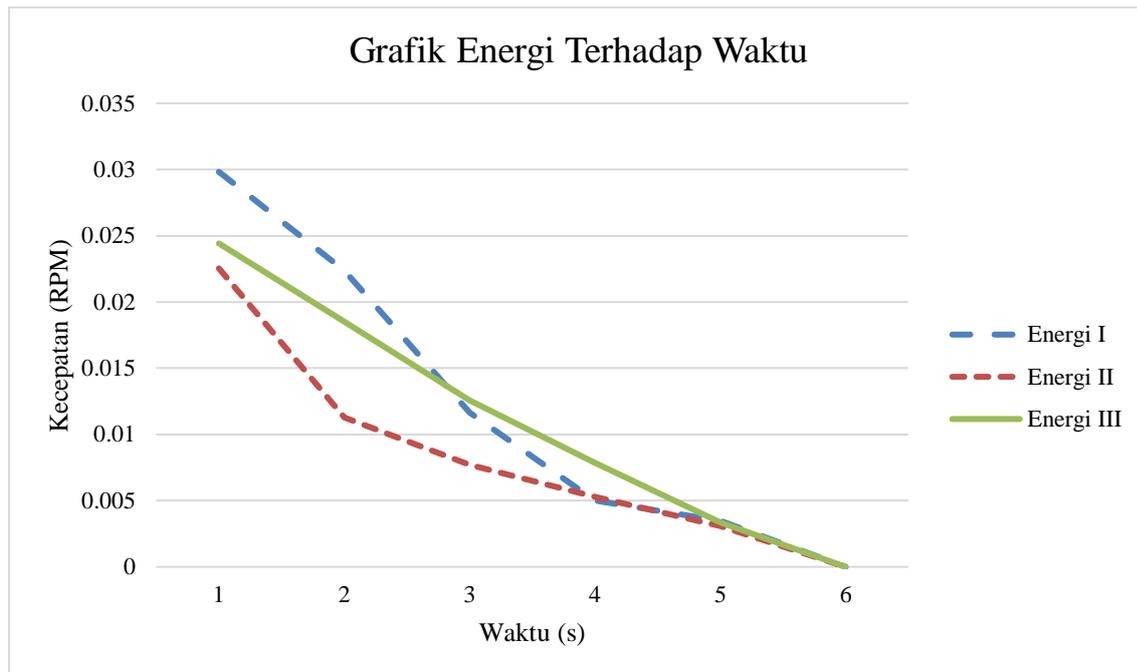
Gambar 27. Grafik Perlambatan Terhadap Waktu - (700 rpm - 2.5 kg)



Gambar 28. Grafik Arus Terhadap Waktu - (700 rpm - 2.5 kg)



Gambar 29. Grafik Tegangan Terhadap Waktu - (700 rpm - 2.5 kg)

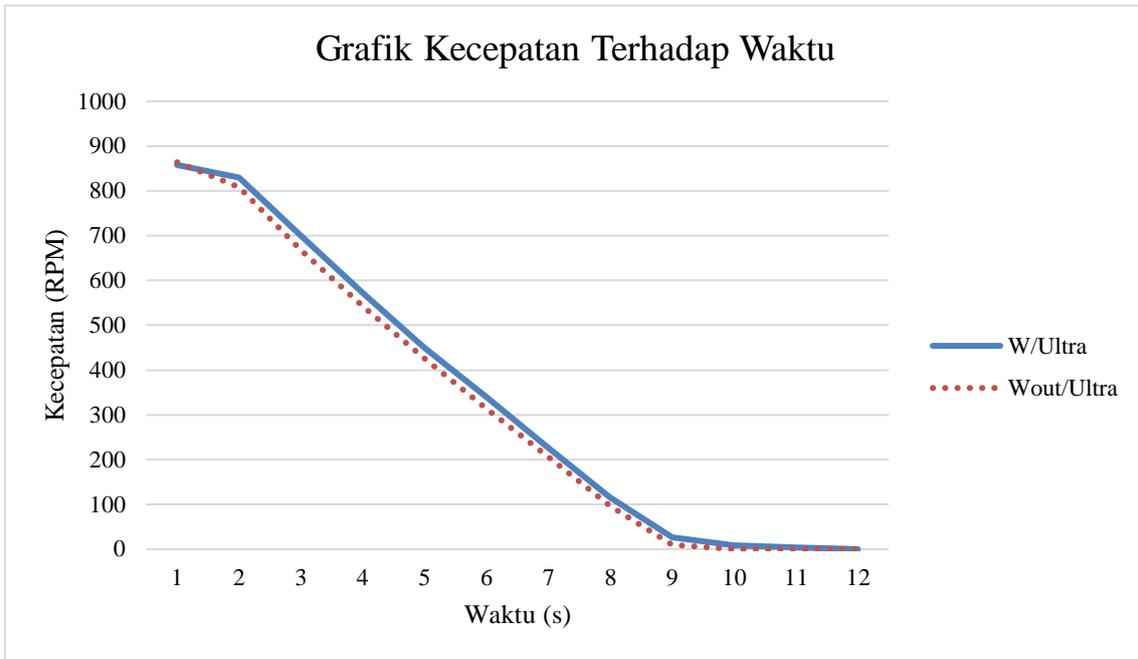


Gambar 30. Grafik Energi Terhadap Waktu - (700 rpm - 2.5 kg)

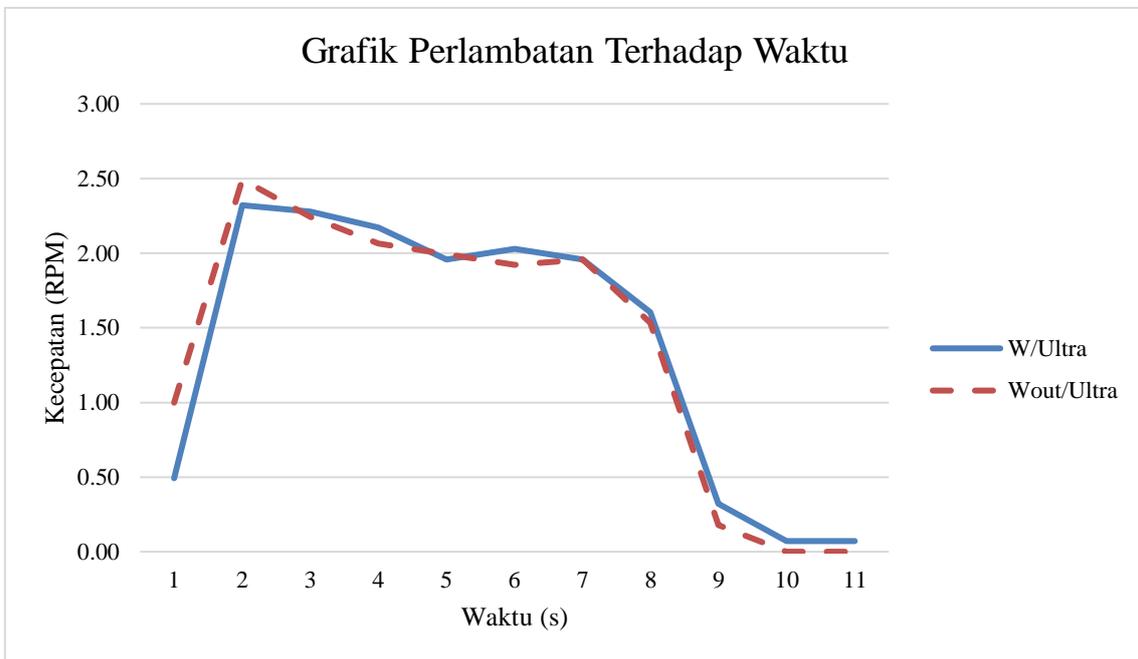
Berdasarkan grafik (26-30) diatas, dapat kita ketahui bahwa untuk pengujian berikutnya dengan beban yang sama namun batas kecepatan ditingkatkan menjadi 700 rpm didapatkan hasil kecepatan tanpa ultrakapasitor dengan dua buah ultrakapasitor paralel memiliki perbedaan. Dengan ultrakapasitor paralel, motor berhenti dalam waktu 9 detik sedangkan tanpa ultrakapasitor selama 10 detik. Sedangkan untuk nilai perlambatan rata-rata yang dihasilkan untuk tanpa ultrakapasitor sebesar $1.39 \text{ (m/s}^2\text{)}$ dan satu buah ultrakapasitor sebesar $1.40 \text{ (m/s}^2\text{)}$. Dengan hasil ini, dapat dikatakan bahwa pengujian untuk kecepatan 700 rpm dengan beban 2.5 kg ini mendapati nilai perlambatan dua buah ultrakapasitor paralel relatif sama dengan tanpa ultrakapasitor. Sedangkan untuk arus, tegangan dan energi yang dihasilkan dapat dilihat pada grafik tersebut. Ketiganya ditampilkan dalam hasil tiga kali percobaan, untuk arus didapatkan hasil tertinggi sebesar 4.4 mA di percobaan ketiga dan tegangan mendapatkan nilai tertinggi sebesar 6.78 V juga di percobaan ketiga. Dari hasil arus dan tegangan, didapatkan nilai energi tertinggi yang dihasilkan sebesar 0.0723164 Joule.

3.7. Kecepatan 800 rpm dengan Dua Buah Ultrakapasitor Paralel

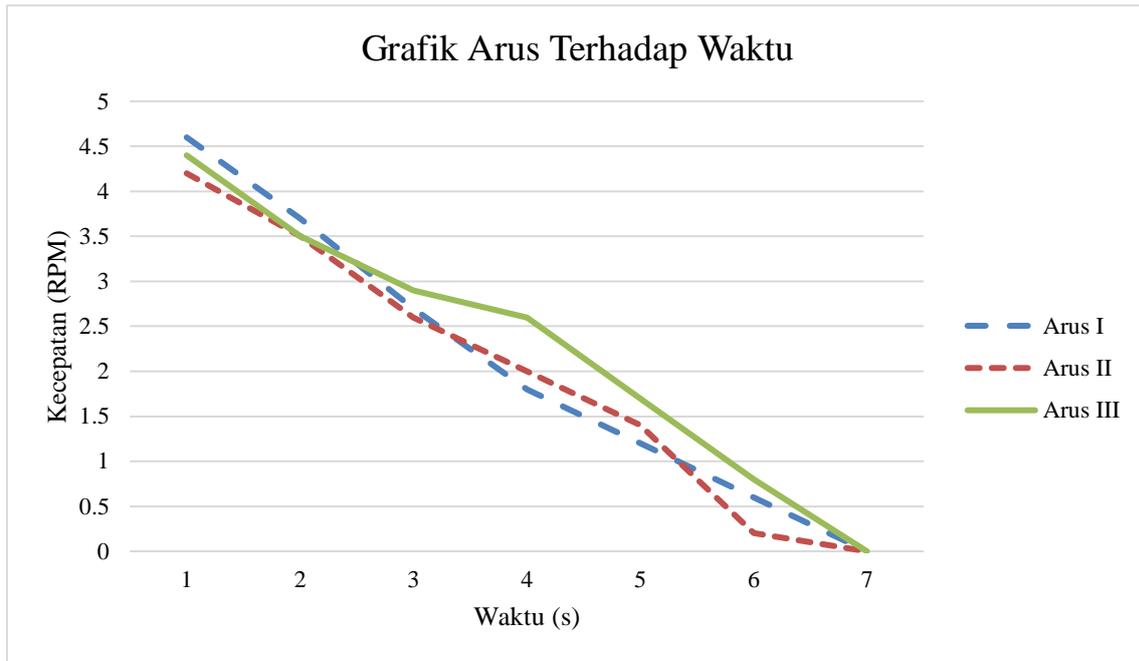
Berdasarkan hasil uji yang dilakukan untuk kecepatan 800 rpm dengan dua buah ultrakapasitor yang dirangkai secara paralel dan beban 2.5 kg didapatkan data sebagai berikut :



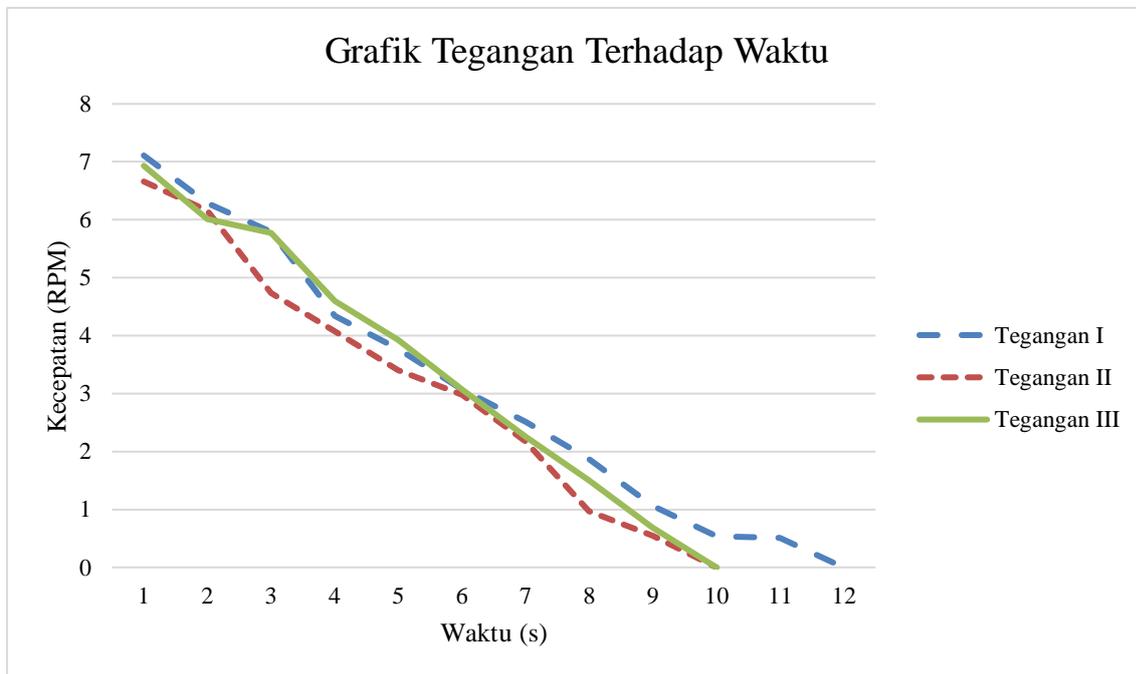
Gambar 31. Grafik Kecepatan Terhadap Waktu - (800 rpm - 2.5 kg)



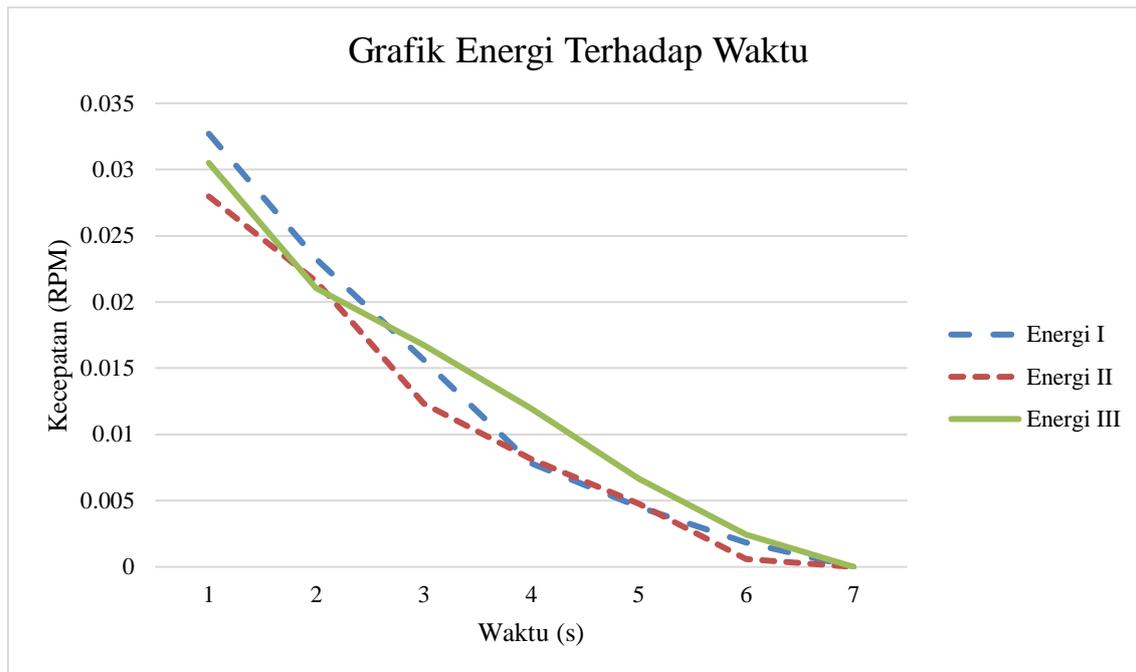
Gambar 32. Grafik Perlambatan Terhadap Waktu - (800 rpm - 2.5 kg)



Gambar 33. Grafik Arus Terhadap Waktu - (800 rpm - 2.5 kg)



Gambar 34. Grafik Tegangan Terhadap Waktu - (800 rpm - 2.5 kg)



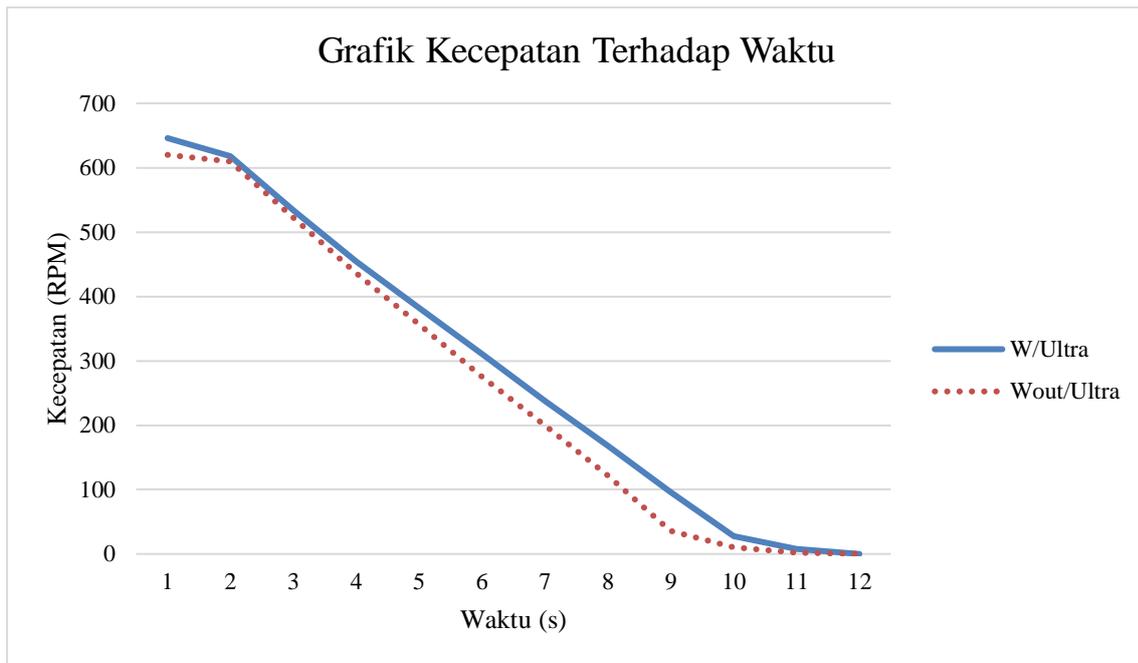
Gambar 35. Grafik Energi Terhadap Waktu - (800 rpm - 2.5 kg)

Berdasarkan grafik (31-35) diatas, dapat kita ketahui bahwa untuk pengujian berikutnya dengan beban yang sama namun batas kecepatan ditingkatkan menjadi 800 rpm didapatkan hasil kecepatan tanpa ultrakapasitor dengan dua buah ultrakapasitor paralel memiliki perbedaan. Dengan ultrakapasitor paralel, motor berhenti dalam waktu 10 detik sedangkan tanpa ultrakapasitor selama 12 detik. Sedangkan untuk nilai perlambatan rata-rata yang dihasilkan untuk tanpa ultrakapasitor sebesar $1.39 \text{ (m/s}^2\text{)}$ dan satu buah ultrakapasitor sebesar $1.40 \text{ (m/s}^2\text{)}$. Dengan hasil ini, dapat dikatakan bahwa pengujian untuk kecepatan 800 rpm dengan beban 2.5 kg ini mendapati nilai perlambatan dua buah ultrakapasitor paralel relatif sama dengan tanpa ultrakapasitor. Sedangkan untuk arus, tegangan dan energi yang dihasilkan dapat dilihat pada grafik tersebut. Ketiganya ditampilkan dalam hasil tiga kali percobaan, untuk arus didapatkan hasil tertinggi sebesar 4.6 mA di percobaan ketiga dan tegangan mendapatkan nilai tertinggi sebesar 7.11 V juga di percobaan ketiga. Dari hasil arus dan tegangan, didapatkan nilai energi tertinggi yang dihasilkan sebesar 0.08937 Joule.

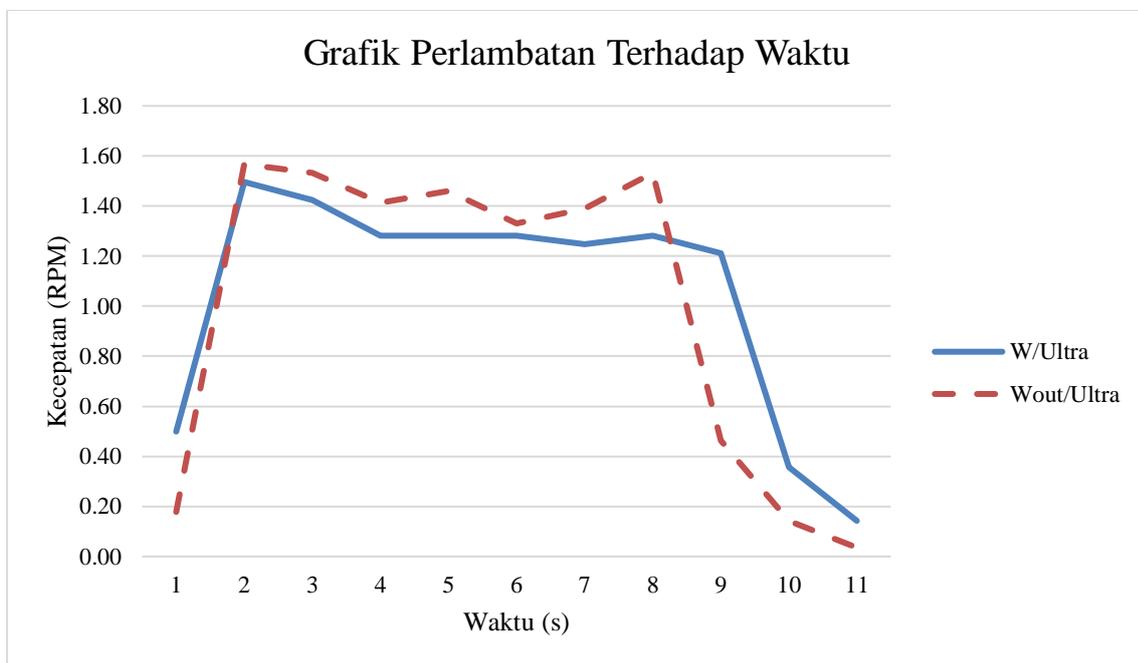
3.8. Pengujian dengan Beban 3.75 kg

Kecepatan 600 rpm dengan Satu Buah Ultrakapasitor

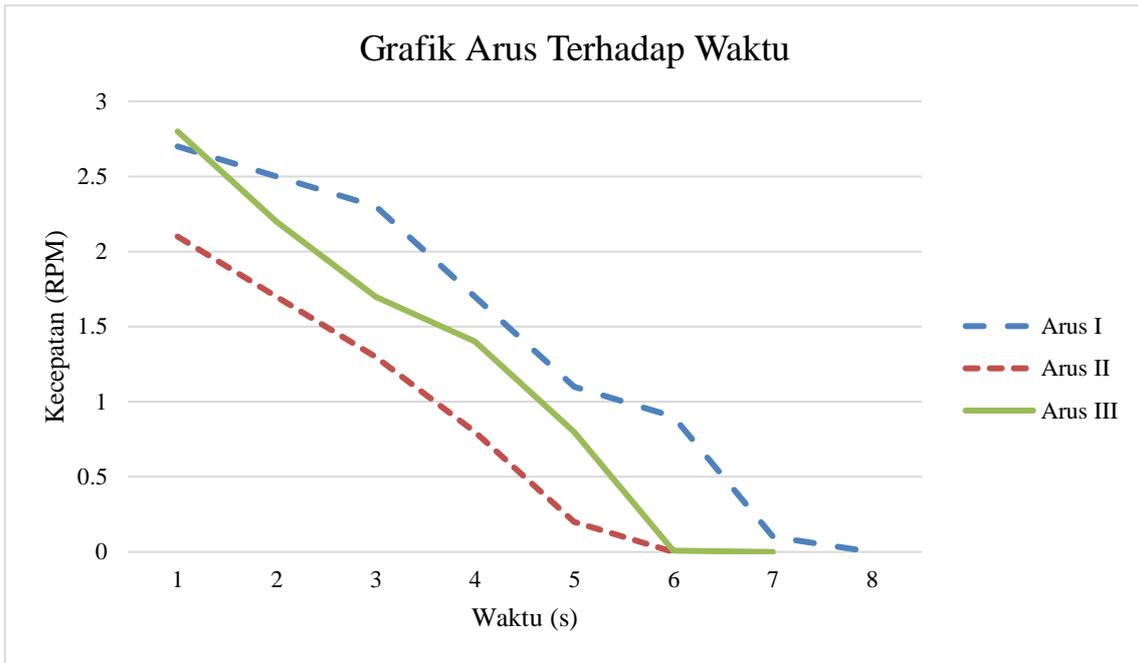
Berdasarkan hasil uji yang dilakukan untuk kecepatan 600 rpm dengan satu buah ultrakapasitor dan beban 3.75 kg didapatkan data sebagai berikut :



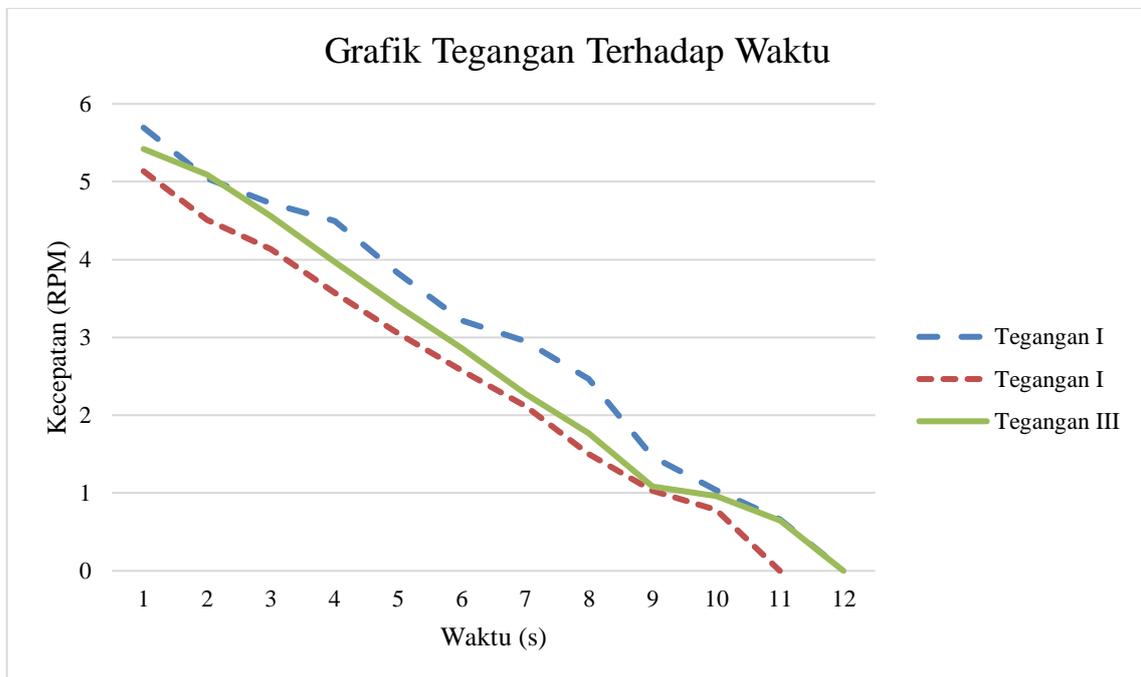
Gambar 36. Grafik Kecepatan Terhadap Waktu - (600 rpm – 3.75 kg)



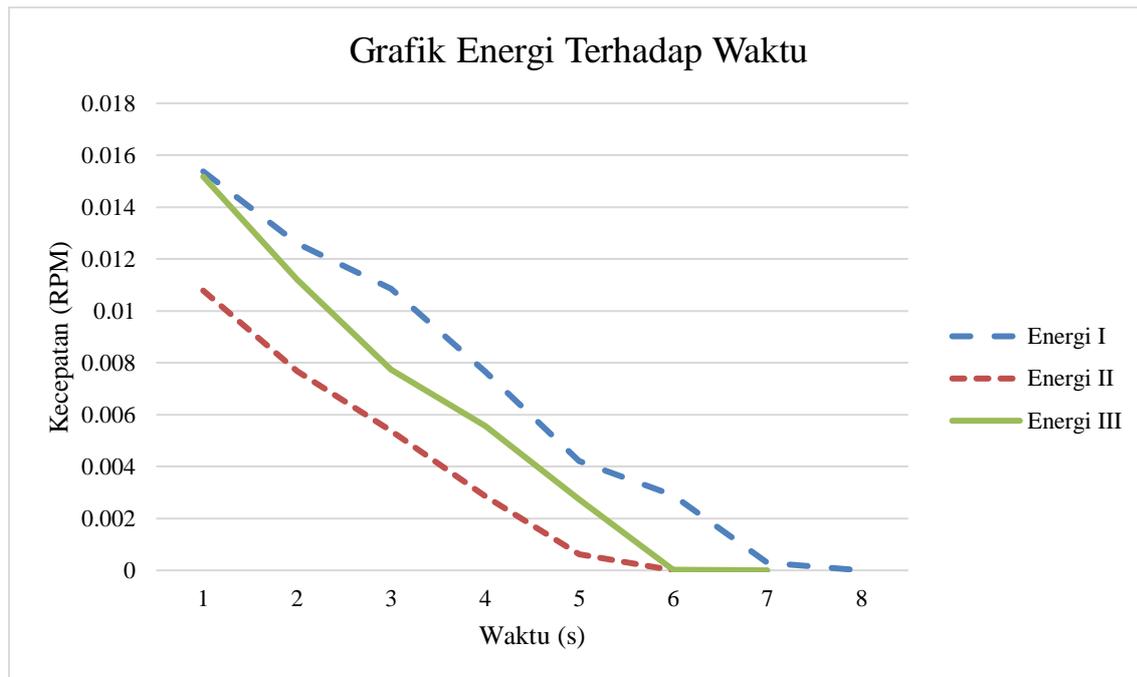
Gambar 37. Grafik Perlambatan Terhadap Waktu - (600 rpm – 3.75 kg)



Gambar 38. Grafik Arus Terhadap Waktu - (600 rpm – 3.75 kg)



Gambar 39. Grafik Tegangan Terhadap Waktu - (600 rpm – 3.75 kg)

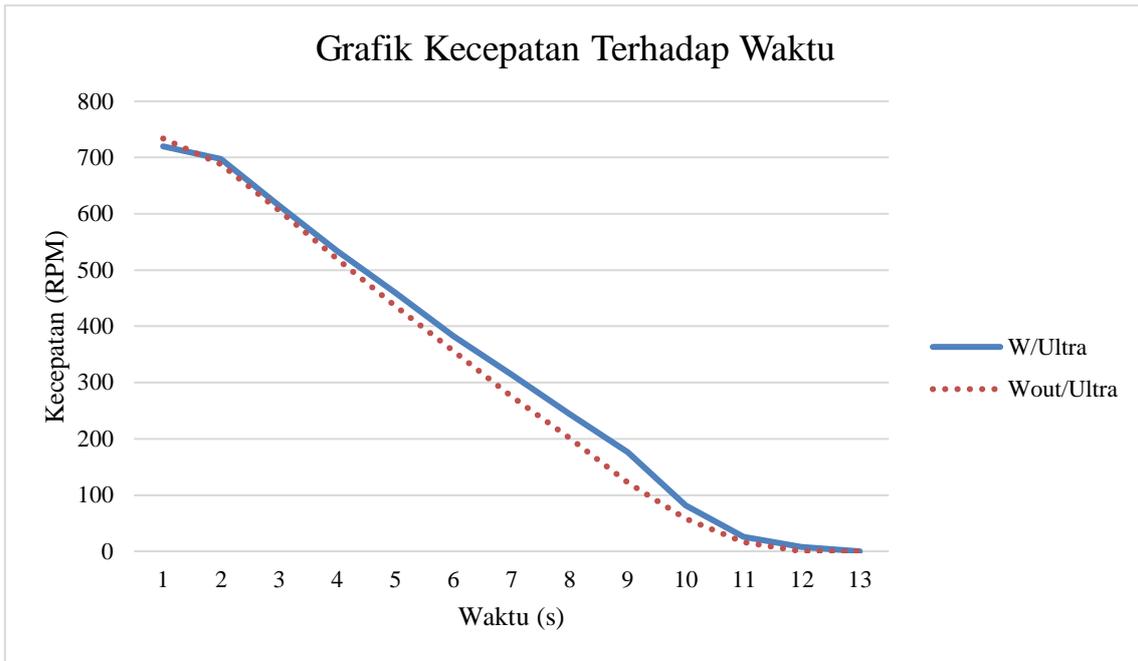


Gambar 40. Grafik Energi Terhadap Waktu - (600 rpm – 3.75 kg)

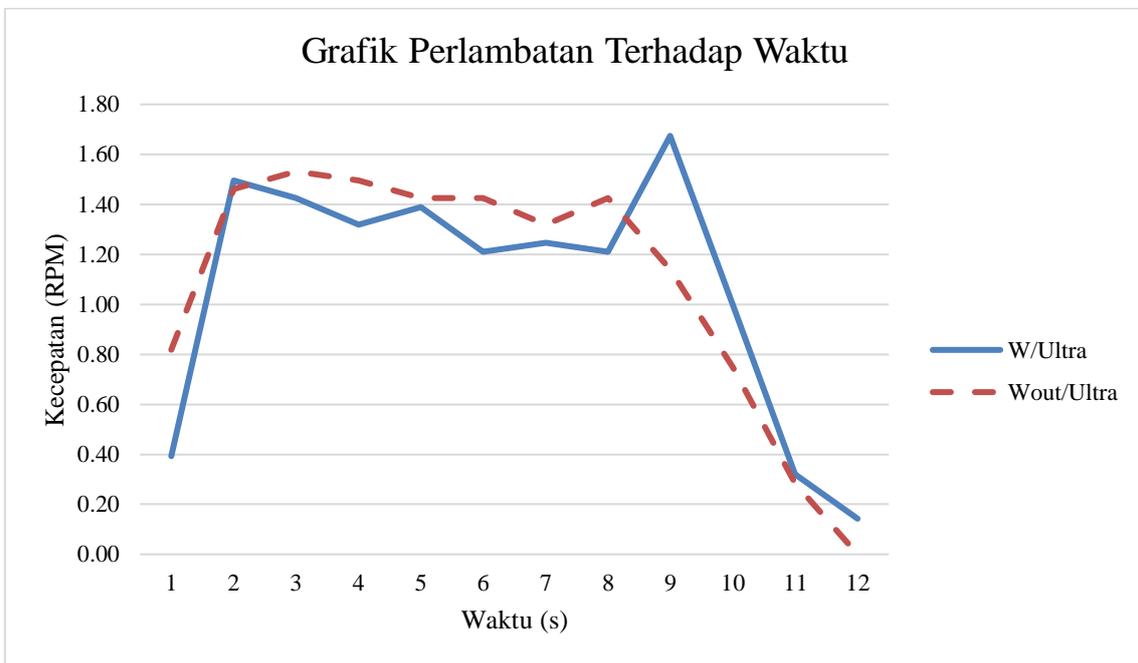
Berdasarkan grafik (36-40) diatas, dapat diketahui bahwa untuk pengujian beban 3.75 kg dengan satu buah ultrakapasitor dan batas kecepatan diatur 600 rpm didapatkan hasil kecepatan tanpa ultrakapasitor dengan satu buah ultrakapsitor tidak memiliki perbedaan yang cukup berarti. Keduanya membutuhkan waktu selama 12 detik untuk berhenti. Untuk nilai perlambatan yang dihasilkan, keduanya menghasilkan grafik yang relatif sama dengan nilai rata-rata untuk tanpa ultrakapasitor sebesar $1.00 \text{ (m/s}^2\text{)}$ dan dengan ultrakapasitor sebesar $1.05 \text{ (m/s}^2\text{)}$. Dengan hasil ini, dapat dikatakan bahwa pengujian pertama untuk kecepatan 600 rpm mendapati dengan ultrakapasitor nilai perlambatannya relatif sama dibandingkan tanpa ultrakapasitor. Sedangkan untuk arus, tegangan dan energi yang dihasilkan dapat dilihat pada grafik tersebut. Ketiganya ditampilkan dalam hasil tiga kali percobaan. Untuk arus didapatkan nilai tertinggi sebesar 2.8 mA. Sedangkan untuk tegangan menghasilkan nilai tertinggi pada percobaan pertama sebesar 5.69 V. Berdasarkan data arus dan tegangan, didapatkan nilai energi regenerasi terbesar ada pada percobaan pertama sebesar 0.062594 Joule.

3.9. Kecepatan 700 rpm dengan Satu Buah Ultrakapasitor

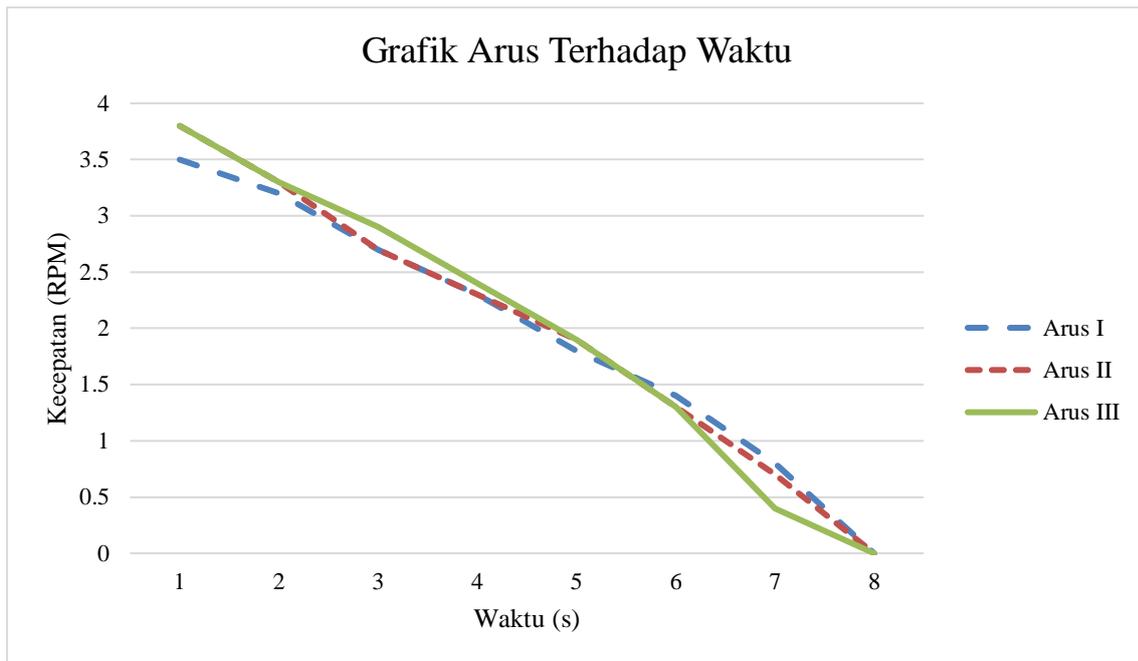
Berdasarkan hasil uji yang dilakukan untuk kecepatan 700 rpm dengan satu buah ultrakapasitor dan beban 3.75 kg didapatkan data sebagai berikut:



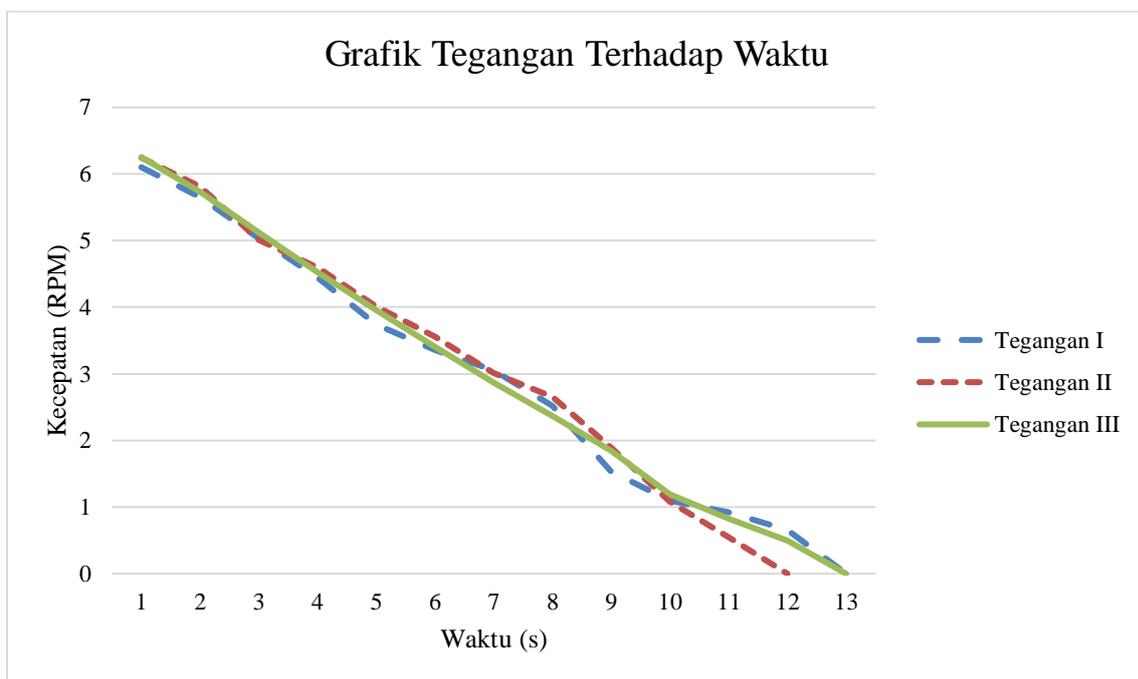
Gambar 41. Grafik Kecepatan Terhadap Waktu - (700 rpm – 3.75 kg)



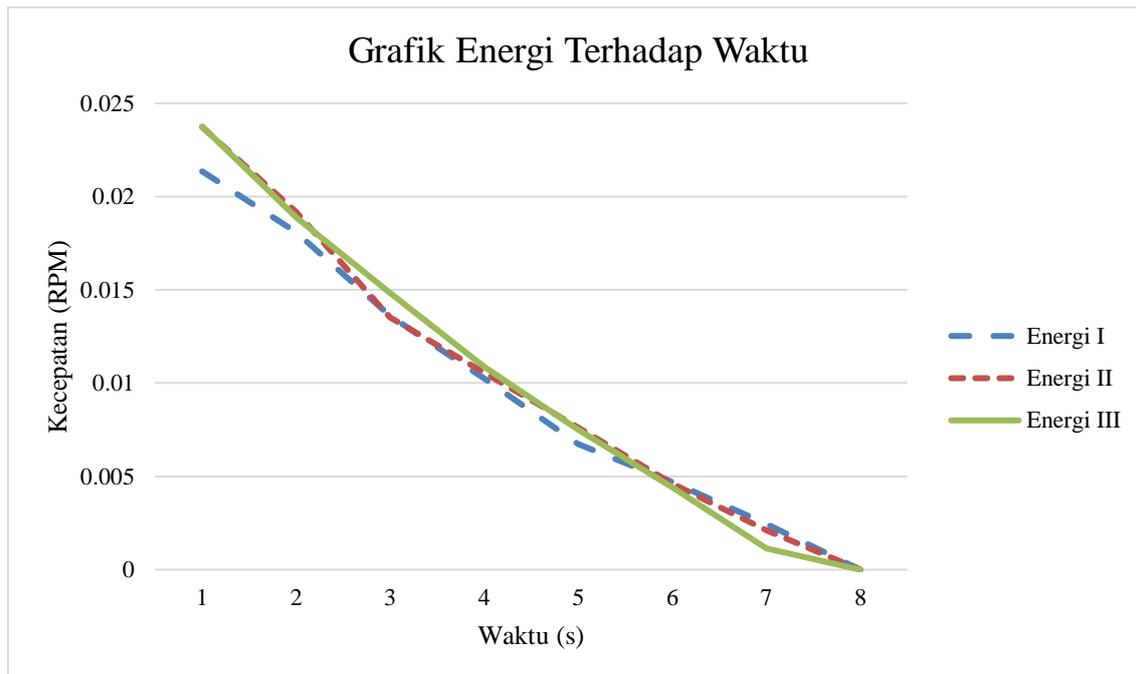
Gambar 42. Grafik Perlambatan Terhadap Waktu - (700 rpm – 3.75 kg)



Gambar 43. Grafik Arus Terhadap Waktu - (700 rpm – 3.75 kg)



Gambar 44. Grafik Tegangan Terhadap Waktu - (700 rpm – 3.75 kg)

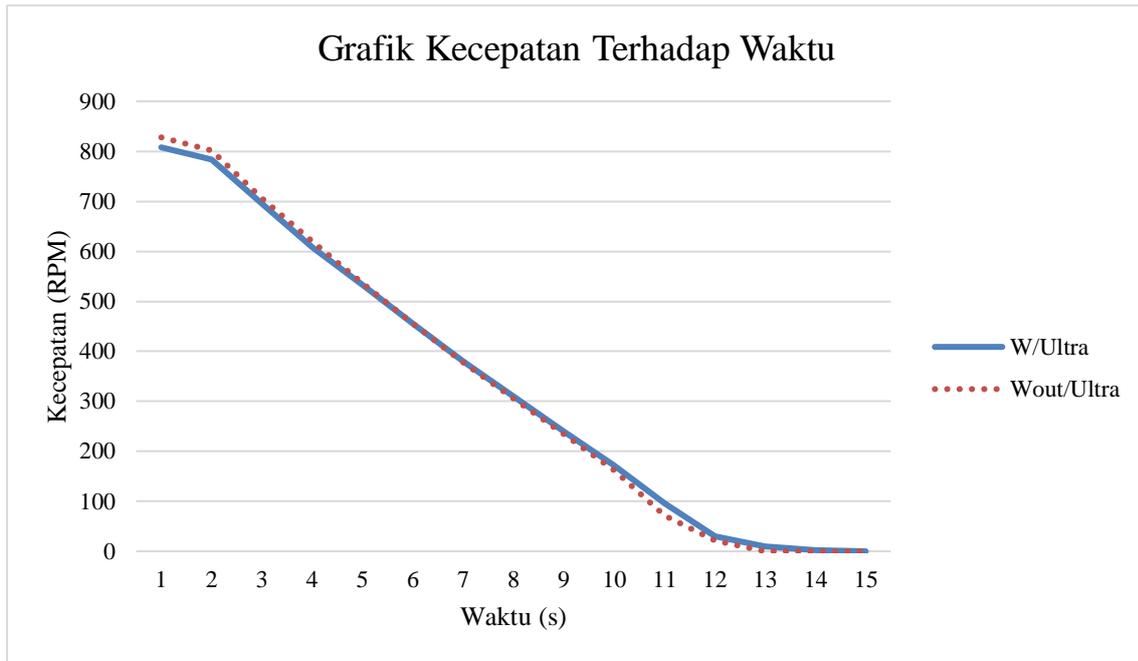


Gambar 45. Grafik Energi Terhadap Waktu - (700 rpm – 3.75 kg)

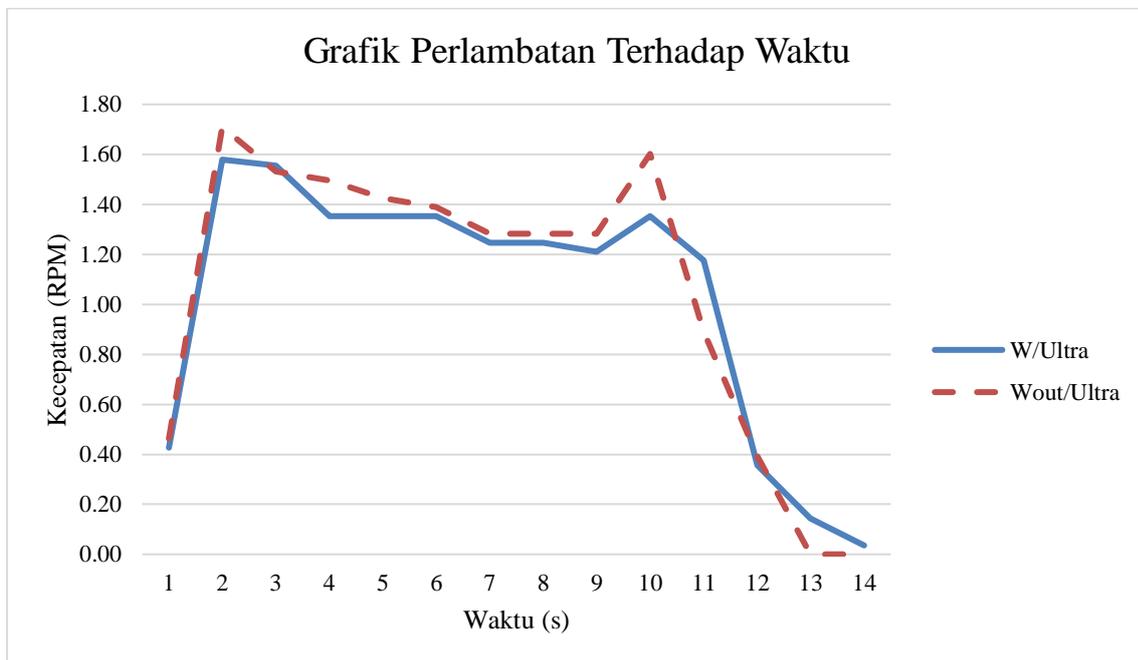
Berdasarkan grafik (41-45) diatas, dapat diketahui bahwa untuk pengujian beban 3.75 kg dengan satu buah ultrakapasitor dan batas kecepatan diatur 700 rpm didapatkan hasil kecepatan tanpa ultrakapasitor dengan satu buah ultrakapasitor memiliki perbedaan. Tanpa ultrakapasitor membutuhkan waktu 12 detik untuk berhenti sempurna sedangkan dengan ultrakapasitor memiliki 11 detik. Untuk nilai perlambatan yang dihasilkan, keduanya menghasilkan grafik yang relatif sama dengan nilai rata-rata untuk tanpa ultrakapasitor sebesar $1.09 \text{ (m/s}^2\text{)}$ dan dengan ultrakapasitor sebesar $1.07 \text{ (m/s}^2\text{)}$. Dengan hasil ini, dapat dikatakan bahwa pengujian ini untuk kecepatan 700 rpm mendapati dengan satu buah ultrakapasitor nilai perlambatannya relatif sama dengan tanpa ultrakapasitor. Sedangkan untuk arus, tegangan dan energi yang dihasilkan dapat dilihat pada grafik tersebut. Ketiganya ditampilkan dalam hasil tiga kali percobaan. Untuk arus didapatkan nilai tertinggi sebesar 3.8 mA. Sedangkan untuk tegangan menghasilkan nilai tertinggi pada percobaan pertama sebesar 6.25 V. Berdasarkan data arus dan tegangan, didapatkan nilai energi regenerasi terbesar ada pada percobaan ketiga sebesar 0.0814482 Joule.

3.10. Kecepatan 800 rpm dengan Satu Buah Ultrakapasitor

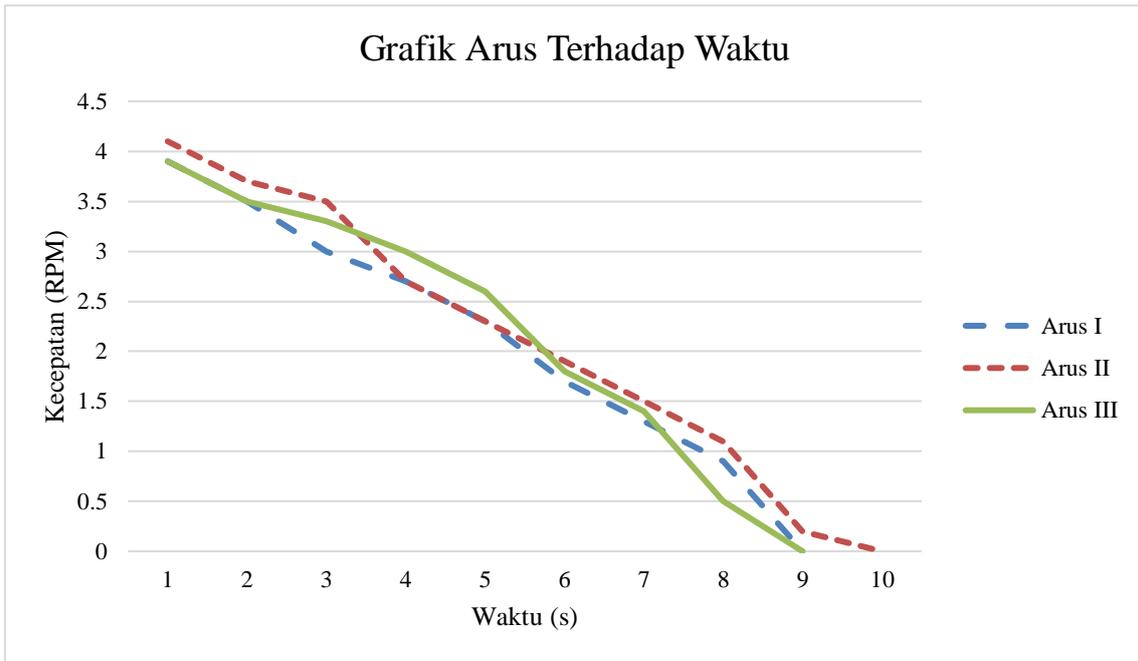
Berdasarkan hasil uji yang dilakukan untuk kecepatan 800 rpm dengan satu buah ultrakapasitor dan beban 3.75 kg didapatkan data sebagai berikut:



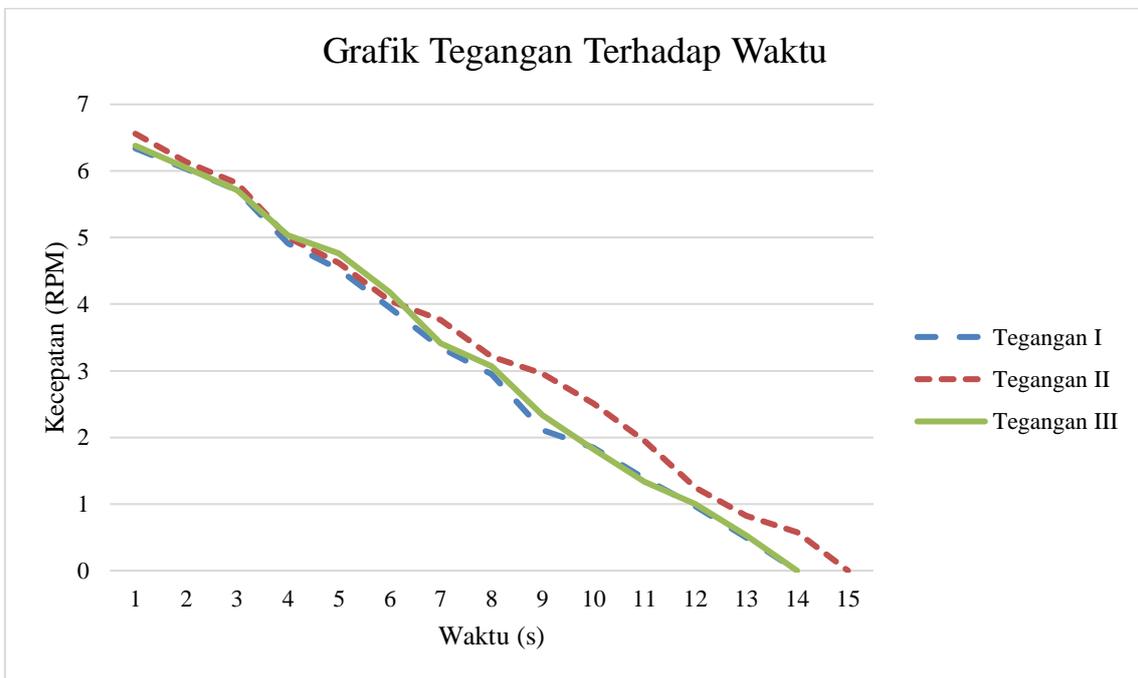
Gambar 46. Grafik Kecepatan Terhadap Waktu - (800 rpm – 3.75 kg)



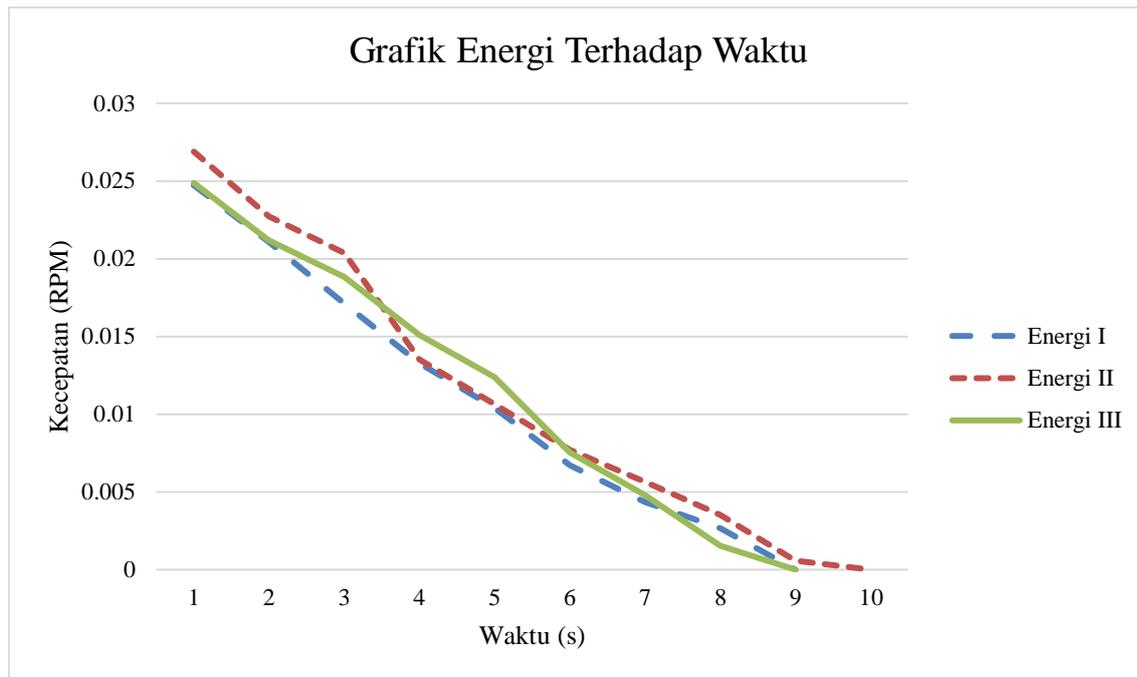
Gambar 47. Grafik Perlambatan Terhadap Waktu - (800 rpm – 3.75 kg)



Gambar 48. Grafik Arus Terhadap Waktu - (800 rpm – 3.75 kg)



Gambar 49. Grafik Tegangan Terhadap Waktu - (800 rpm – 3.75 kg)

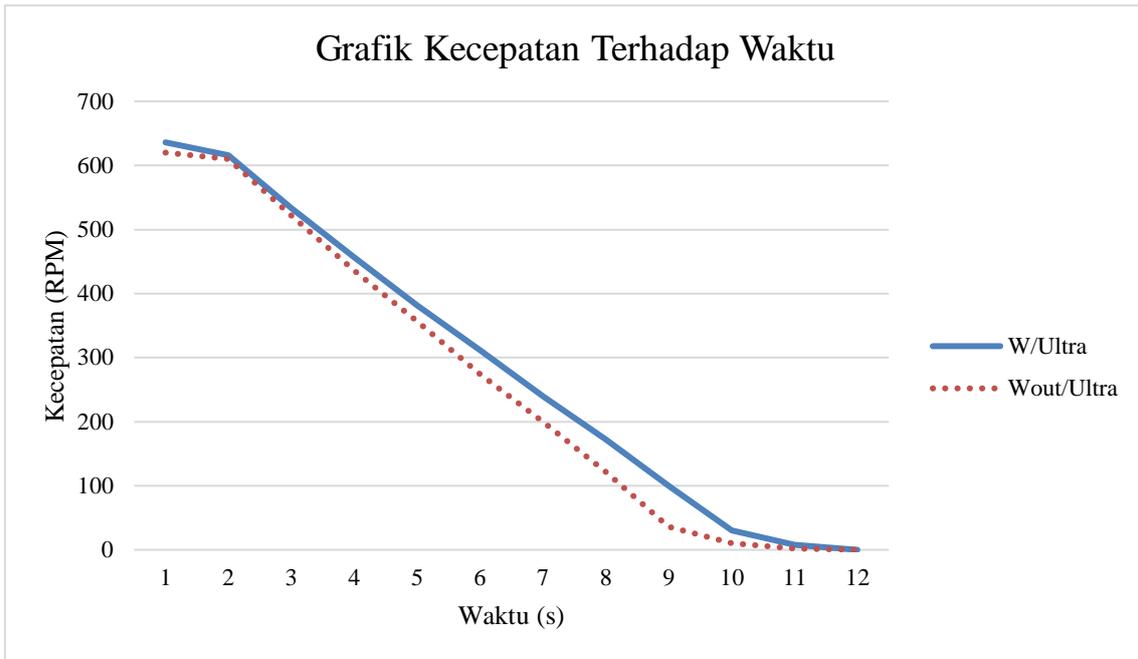


Gambar 50. Grafik Energi Terhadap Waktu - (800 rpm – 3.75 kg)

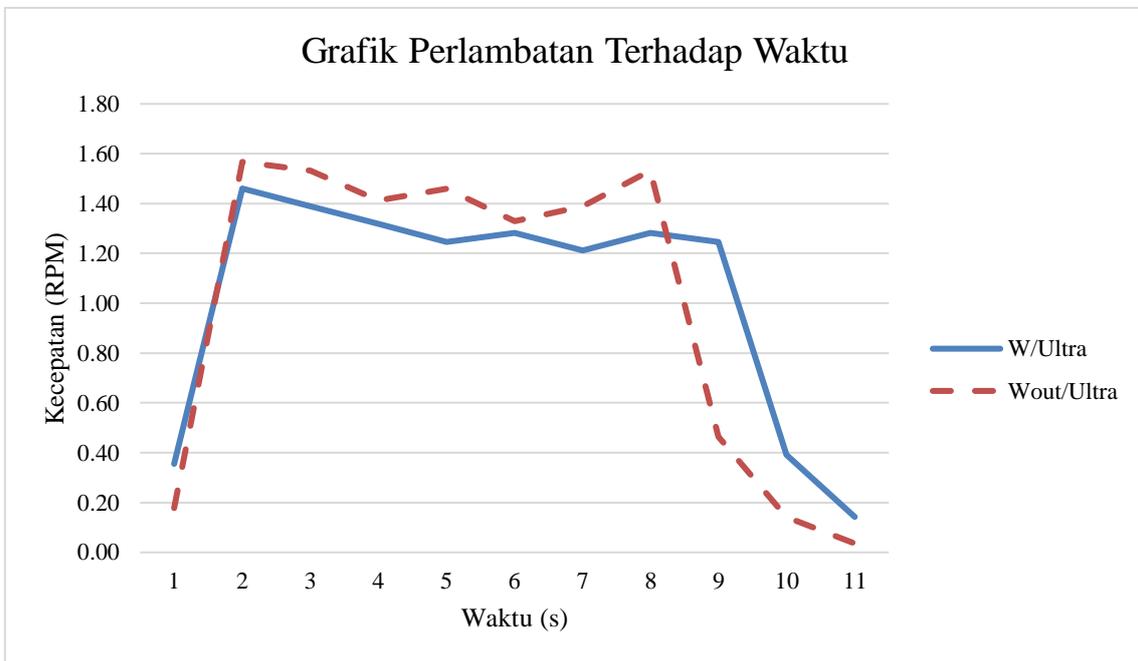
Berdasarkan grafik (46-50) diatas, dapat diketahui bahwa untuk pengujian beban 3.75 kg dengan satu buah ultrakapasitor dan batas kecepatan diatur 800 rpm didapatkan hasil kecepatan tanpa ultrakapasitor dengan satu buah ultrakapsitor memiliki perbedaan. Tanpa ultrakapasitor membutuhkan waktu 15 detik untuk berhenti sempurna sedangkan dengan ultrakapasitor memiliki 13 detik. Untuk nilai perlambatan yang dihasilkan, keduanya menghasilkan grafik yang relatif sama dengan nilai rata-rata untuk tanpa ultrakapasitor sebesar $1.03 \text{ (m/s}^2\text{)}$ dan dengan ultrakapasitor sebesar $1.05 \text{ (m/s}^2\text{)}$. Dengan hasil ini, dapat dikatakan bahwa pengujian ini untuk kecepatan 800 rpm mendapati dengan satu buah ultrakapasitor nilai perlambatannya relatif sama dengan tanpa ultrakapasitor. Sedangkan untuk arus, tegangan dan energi yang dihasilkan dapat dilihat pada grafik tersebut. Ketiganya ditampilkan dalam hasil tiga kali percobaan. Untuk arus didapatkan nilai tertinggi sebesar 4.1 mA. Sedangkan untuk tegangan menghasilkan nilai tertinggi pada percobaan kedua sebesar 6.566 V. Berdasarkan data arus dan tegangan, didapatkan nilai energi regenerasi terbesar ada pada percobaan kedua sebesar 0.1115994 Joule.

3.11. Kecepatan 600 rpm dengan Dua Buah Ultrakapasitor

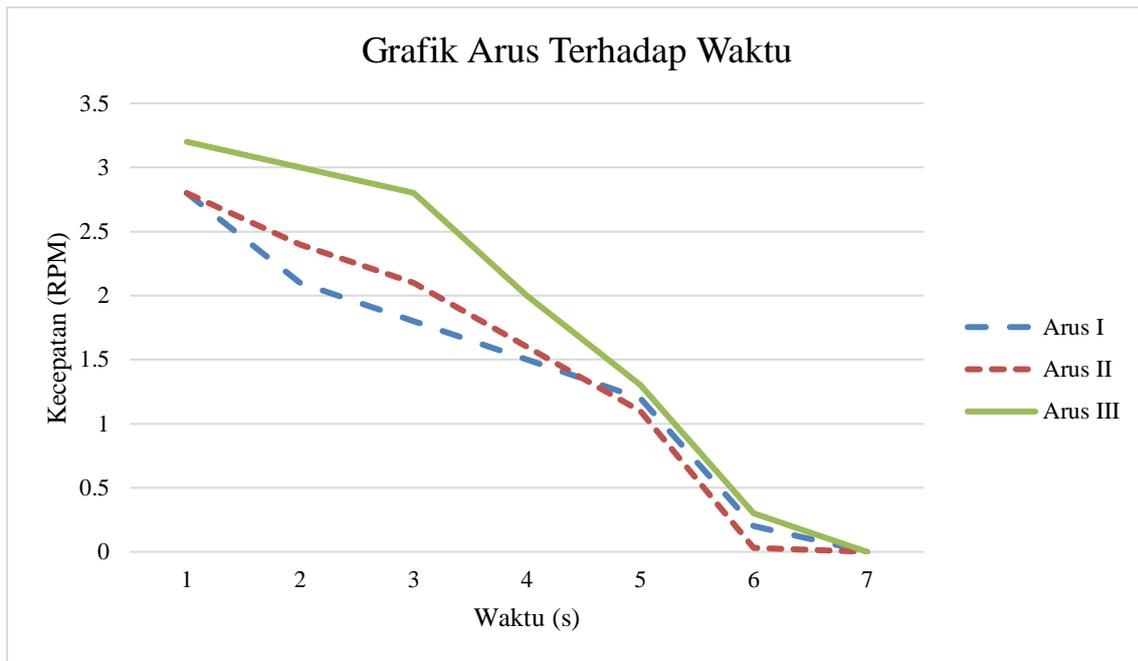
Berdasarkan hasil uji yang dilakukan untuk kecepatan 600 rpm dengan dua buah ultrakapasitor yang dirangkai secara paralel dan beban 3.75 kg didapatkan data sebagai berikut:



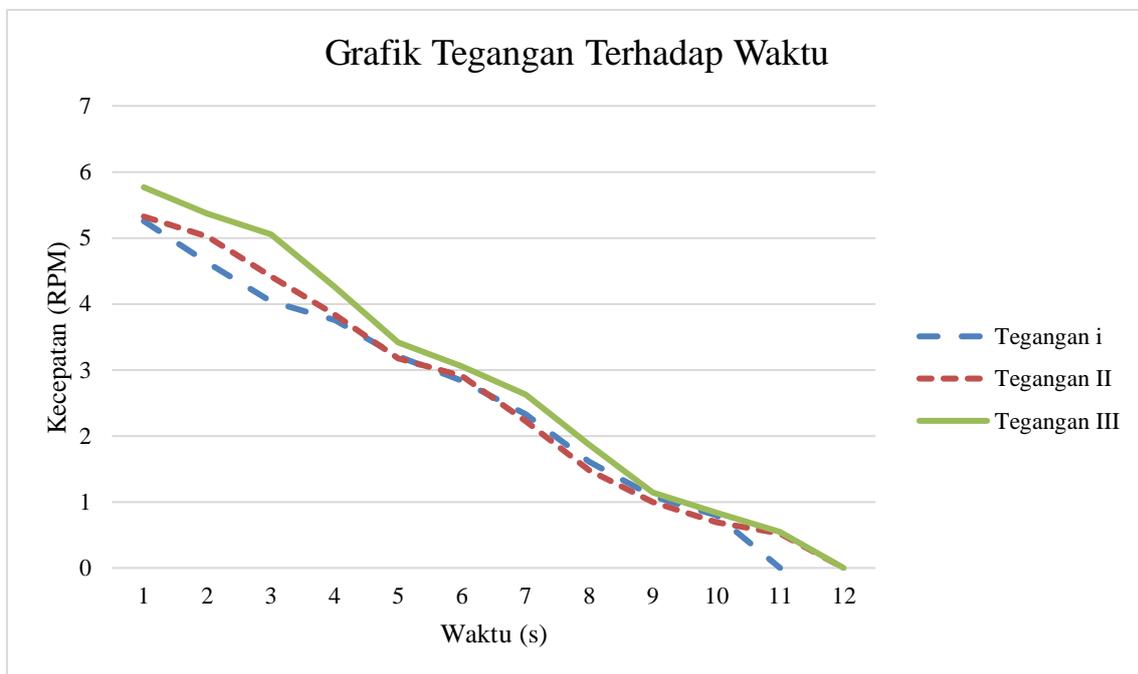
Gambar 51. Grafik Kecepatan Terhadap Waktu - (600 rpm – 3.75 kg)



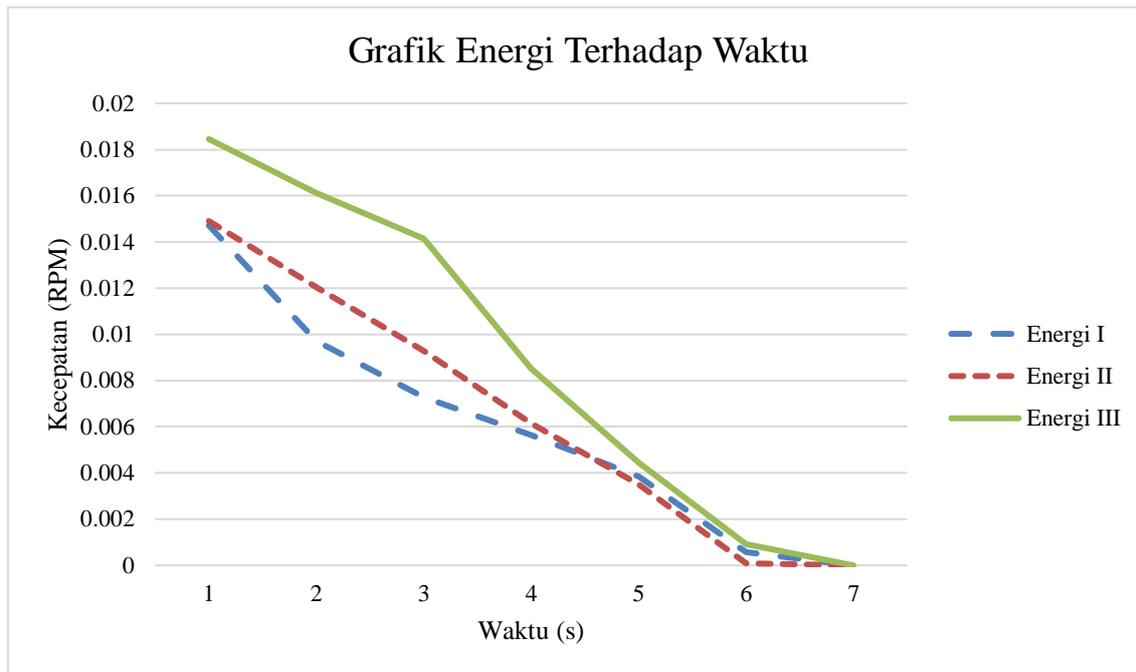
Gambar 52. Grafik Perlambatan Terhadap Waktu - (600 rpm – 3.75 kg)



Gambar 53. Grafik Arus Terhadap Waktu - (600 rpm – 3.75 kg)



Gambar 54. Grafik Tegangan Terhadap Waktu - (600 rpm – 3.75 kg)

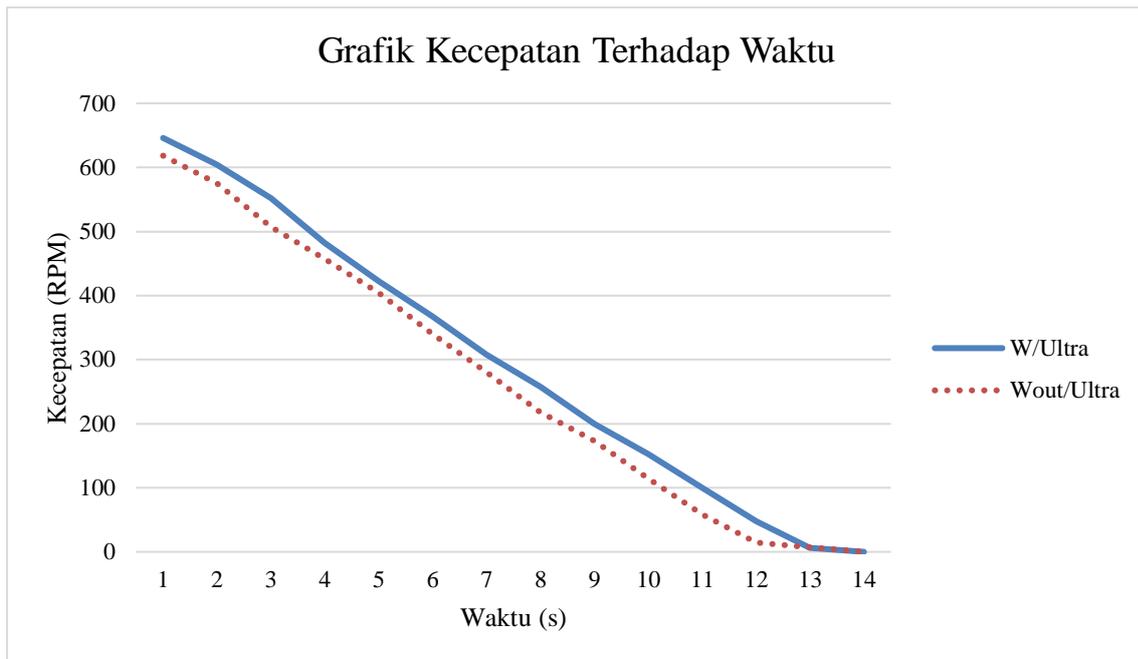


Gambar 55. Grafik Energi Terhadap Waktu - (600 rpm – 3.75 kg)

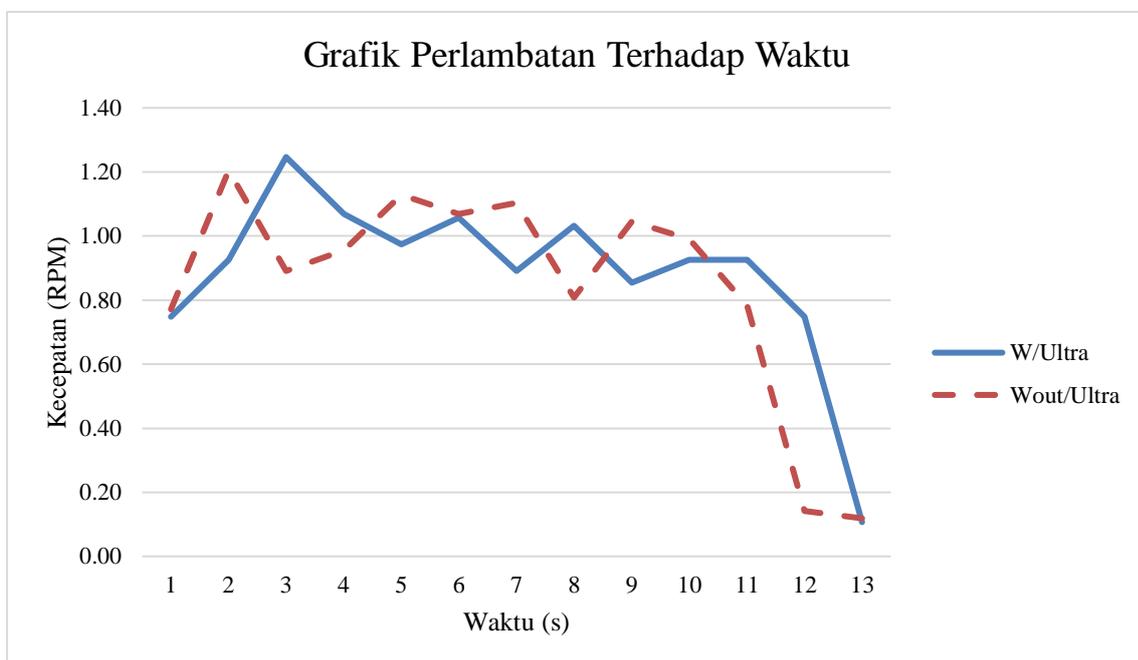
Berdasarkan grafik (51-55) diatas, dapat diketahui bahwa untuk pengujian beban 3.75 kg dengan dua buah ultrakapasitor paralel dan batas kecepatan diatur 600 rpm didapatkan hasil kecepatan tanpa ultrakapasitor dengan satu buah ultrakapasitor tidak memiliki perbedaan yang cukup berarti. Keduanya membutuhkan waktu selama 12 detik untuk berhenti. Untuk nilai perlambatan yang dihasilkan, keduanya menghasilkan grafik yang relatif sama dengan nilai rata-rata untuk tanpa ultrakapasitor sebesar $1.00 \text{ (m/s}^2\text{)}$ dan dengan ultrakapasitor sebesar $1.03 \text{ (m/s}^2\text{)}$. Dengan hasil ini, dapat dikatakan bahwa pengujian pertama untuk kecepatan 600 rpm mendapati dengan ultrakapasitor paralel nilai perlambatannya relatif sama dengan tanpa ultrakapasitor. Sedangkan untuk arus, tegangan dan energi yang dihasilkan dapat dilihat pada grafik tersebut. Ketiganya ditampilkan dalam hasil tiga kali percobaan. Untuk arus didapatkan nilai tertinggi sebesar 3.2 mA. Sedangkan untuk tegangan menghasilkan nilai tertinggi pada percobaan ketiga sebesar 5.76 V. Berdasarkan data arus dan tegangan, didapatkan nilai energi regenerasi terbesar ada pada percobaan ketiga sebesar 0.062594 Joule.

3.12. Kecepatan 600 rpm dengan Dua Buah Ultrakapasitor

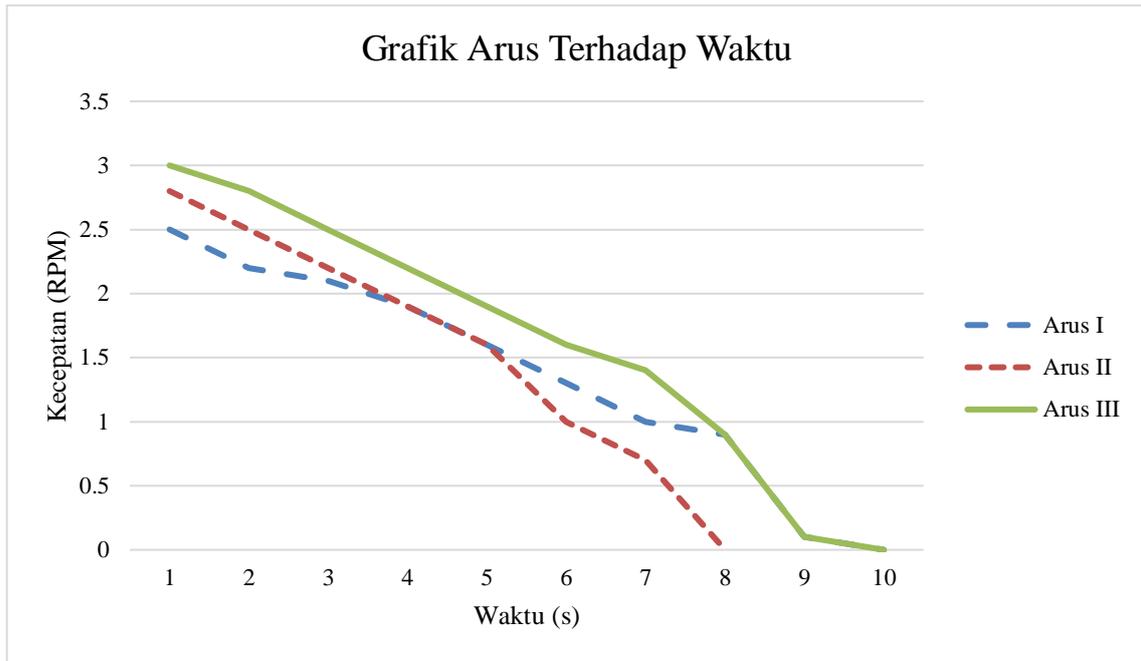
Berdasarkan hasil uji yang dilakukan untuk kecepatan 600 rpm dengan dua buah ultrakapasitor yang dirangkai secara paralel dan beban 5 kg didapatkan data sebagai berikut:



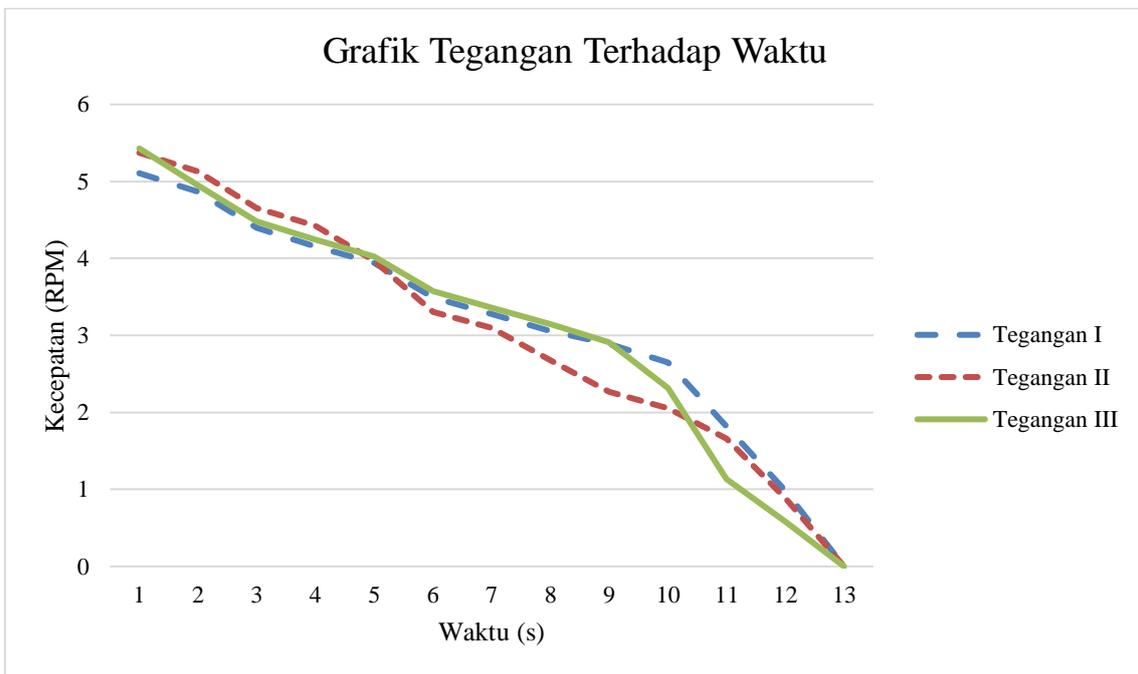
Gambar 56. Grafik Kecepatan Terhadap Waktu - (600 rpm – 5 kg)



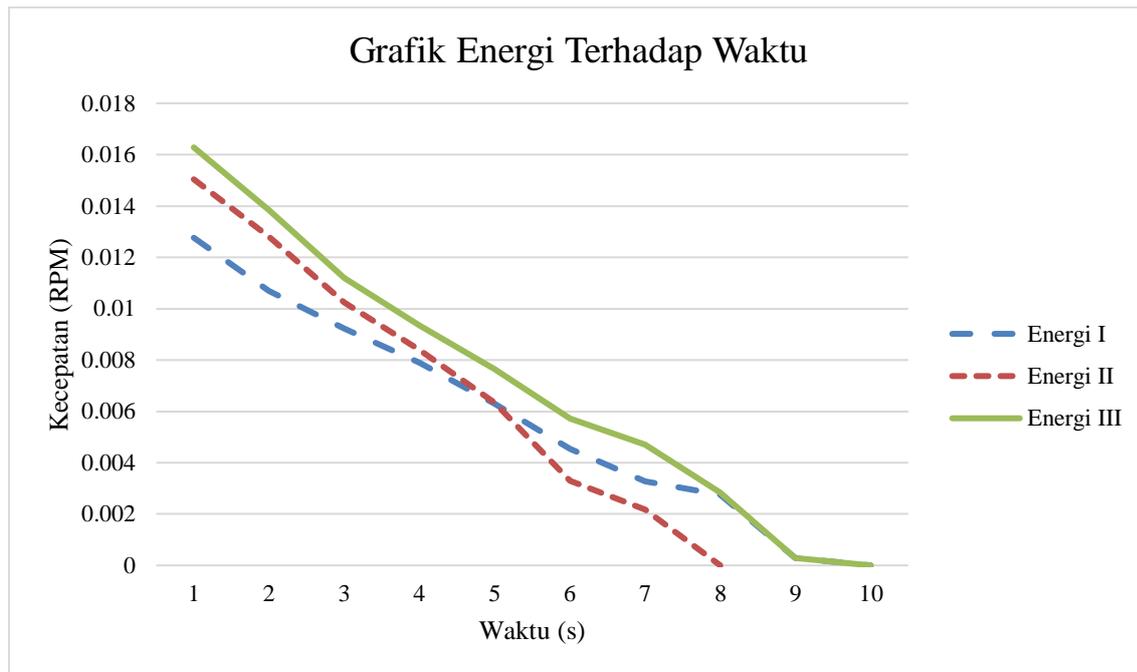
Gambar 57. Grafik Perlambatan Terhadap Waktu - (600 rpm – 5 kg)



Gambar 58. Grafik Arus Terhadap Waktu - (600 rpm – 5 kg)



Gambar 59. Grafik Tegangan Terhadap Waktu - (600 rpm – 5 kg)

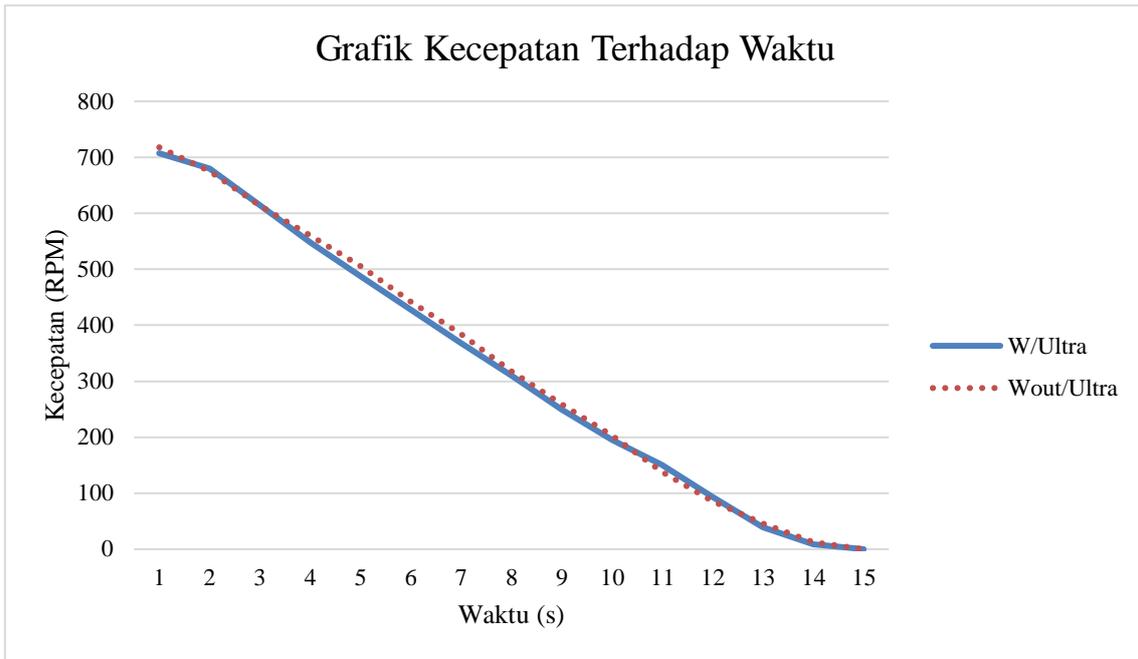


Gambar 60. Grafik Energi Terhadap Waktu - (600 rpm – 5 kg)

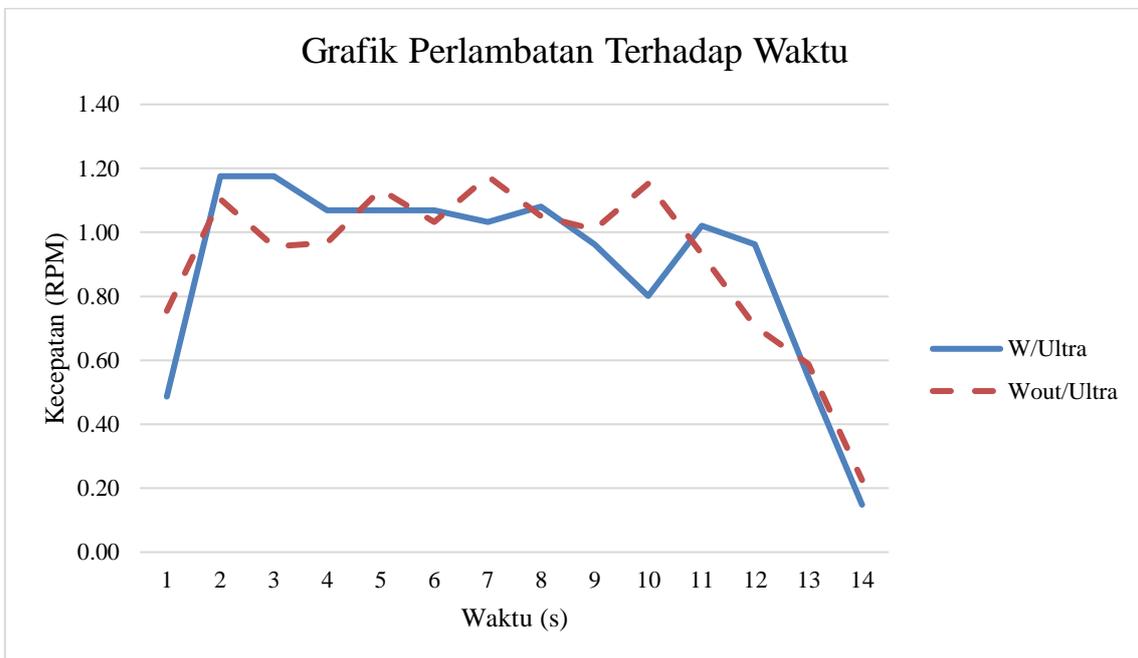
Berdasarkan grafik (56-60) diatas, dapat diketahui bahwa untuk pengujian beban 5 kg dengan dua buah ultrakapasitor paralel dan batas kecepatan diatur 600 rpm didapatkan hasil kecepatan tanpa ultrakapasitor dengan satu buah ultrakapasitor tidak memiliki perbedaan yang cukup berarti. Keduanya membutuhkan waktu 14 detik untuk dapat berhenti total. Untuk nilai perlambatan yang dihasilkan, keduanya menghasilkan grafik yang relatif sama dengan nilai rata-rata untuk tanpa ultrakapasitor sebesar $0.85(m/s^2)$ dan dengan ultrakapasitor sebesar $0.88(m/s^2)$. Dengan hasil ini, dapat dikatakan bahwa pengujian untuk kecepatan 600 rpm mendapati dengan ultrakapasitor paralel nilai perlambatannya lebih tinggi daripada tanpa ultrakapasitor. Sedangkan untuk arus, tegangan dan energi yang dihasilkan dapat dilihat pada grafik tersebut. Ketiganya ditampilkan dalam hasil tiga kali percobaan. Untuk arus didapatkan nilai tertinggi sebesar 3 mA. Sedangkan untuk tegangan menghasilkan nilai tertinggi pada percobaan ketiga sebesar 5.43 V. Berdasarkan data arus dan tegangan, didapatkan nilai energi regenerasi terbesar ada pada percobaan ketiga sebesar 0.0718641 Joule.

3.13. Kecepatan 700 rpm dengan Dua Buah Ultrakapasitor

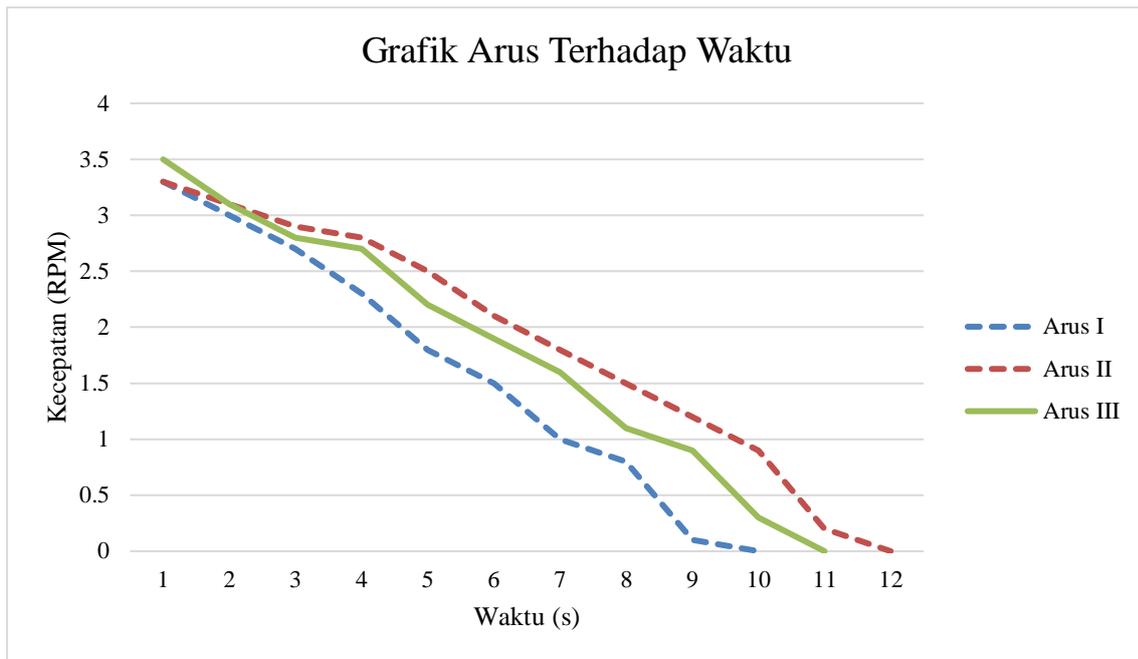
Berdasarkan hasil uji yang dilakukan untuk kecepatan 700 rpm dengan dua buah ultrakapasitor yang dirangkai secara paralel dan beban 5 kg didapatkan data sebagai berikut:



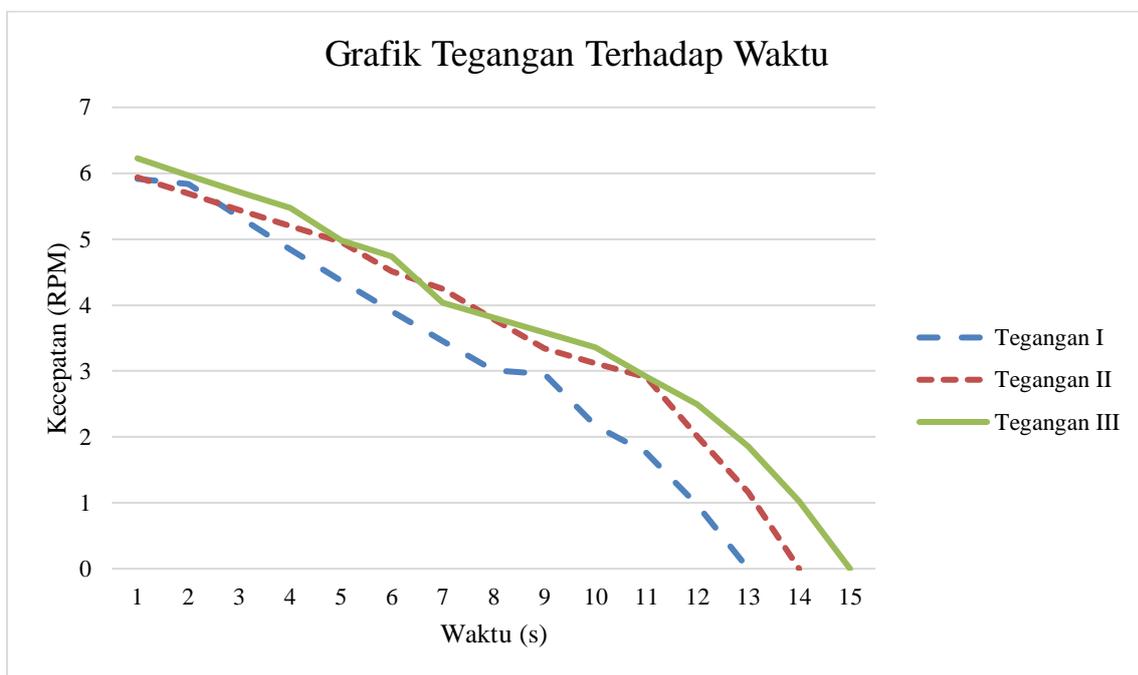
Gambar 61. Grafik Kecepatan Terhadap Waktu - (700 rpm – 5 kg)



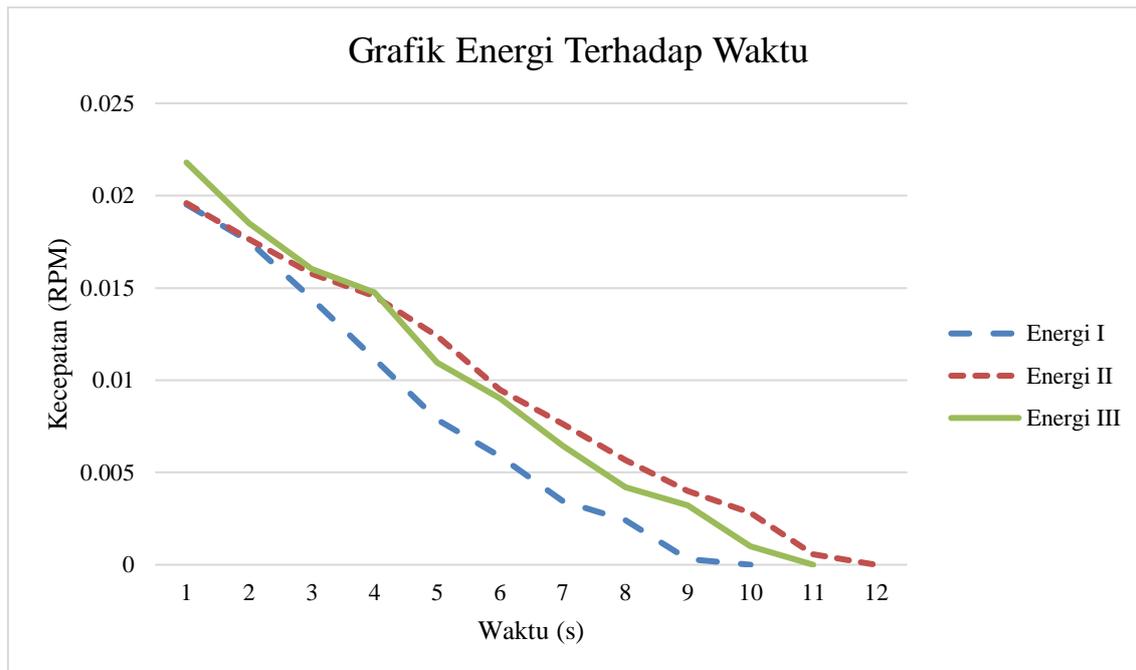
Gambar 62. Grafik Percepatan Terhadap Waktu - (700 rpm – 5 kg)



Gambar 63. Grafik Arus Terhadap Waktu - (700 rpm – 5 kg)



Gambar 64. Grafik Tegangan Terhadap Waktu - (700 rpm – 5 kg)

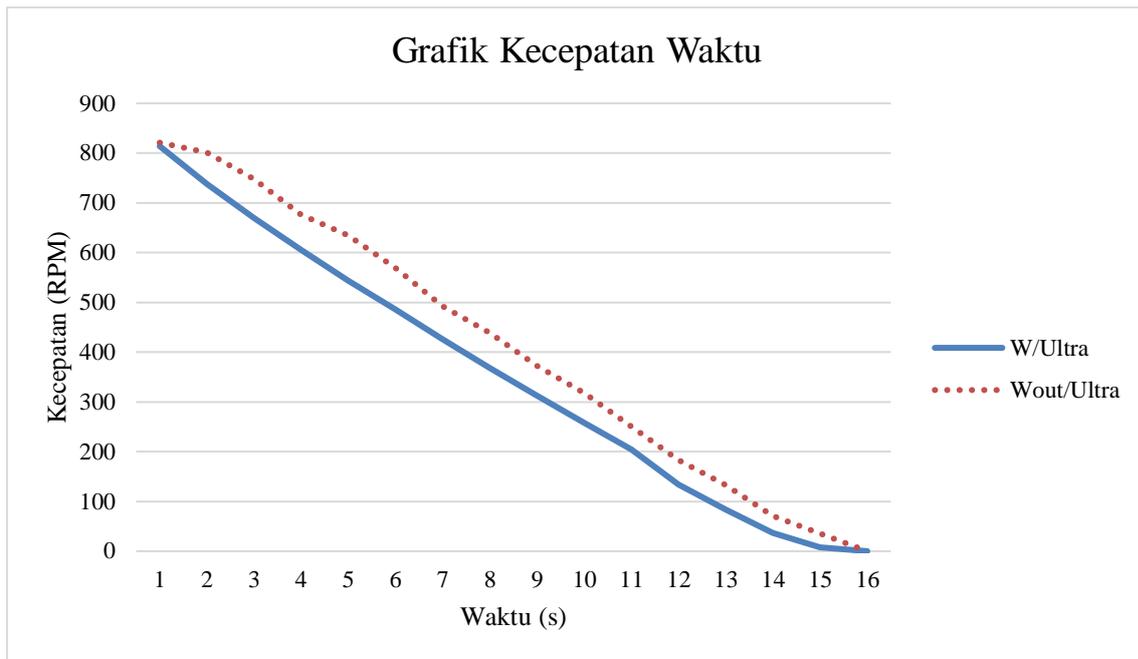


Gambar 65. Grafik Energi Terhadap Waktu - (700 rpm – 5 kg)

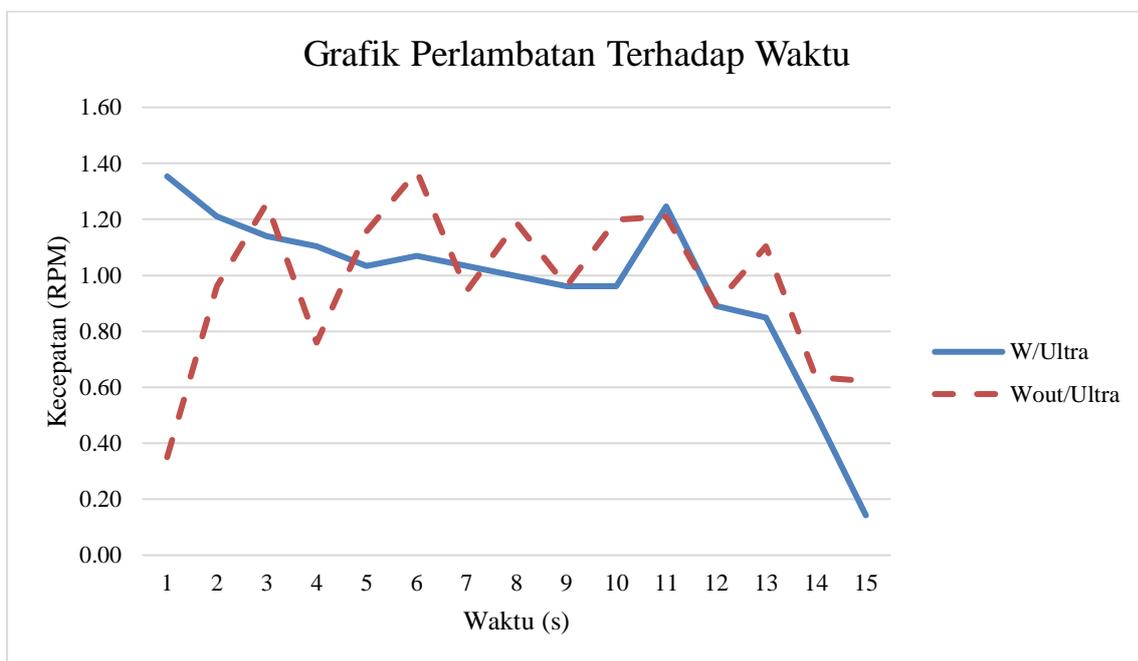
Berdasarkan grafik (61-65) diatas, dapat diketahui bahwa untuk pengujian beban 5 kg dengan dua buah ultrakapasitor paralel dan batas kecepatan diatur 700 rpm didapatkan hasil kecepatan tanpa ultrakapasitor dengan satu buah ultrakapasitor tidak memiliki perbedaan yang cukup berarti. Keduanya membutuhkan waktu 15 detik untuk dapat berhenti total. Untuk nilai perlambatan yang dihasilkan, keduanya menghasilkan grafik yang relatif sama dengan nilai rata-rata untuk tanpa ultrakapasitor sebesar $0.90(m/s^2)$ dan dengan ultrakapasitor sebesar $0.91(m/s^2)$. Dengan hasil ini, dapat dikatakan bahwa pengujian untuk kecepatan 700 rpm mendapati dengan ultrakapasitor paralel nilai perlambatannya lebih tinggi daripada tanpa ultrakapasitor. Sedangkan untuk arus, tegangan dan energi yang dihasilkan dapat dilihat pada grafik tersebut. Ketiganya ditampilkan dalam hasil tiga kali percobaan. Untuk arus didapatkan nilai tertinggi sebesar 3.5 mA. Sedangkan untuk tegangan menghasilkan nilai tertinggi pada percobaan kedua sebesar 5.94 V. Berdasarkan data arus dan tegangan, didapatkan nilai energi regenerasi terbesar ada pada percobaan kedua sebesar 0.1101365 Joule.

3.14. Kecepatan 800 rpm dengan Dua Buah Ultrakapasitor

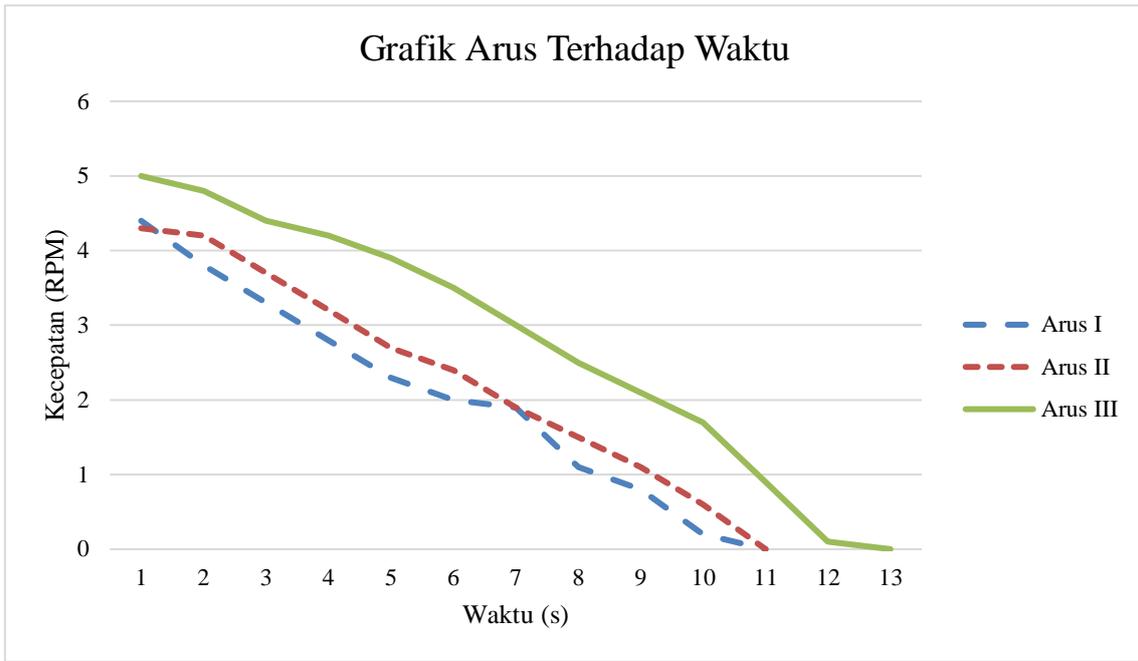
Berdasarkan hasil uji yang dilakukan untuk kecepatan 800 rpm dengan dua buah ultrakapasitor yang dirangkai secara paralel dan beban 5 kg didapatkan data sebagai berikut:



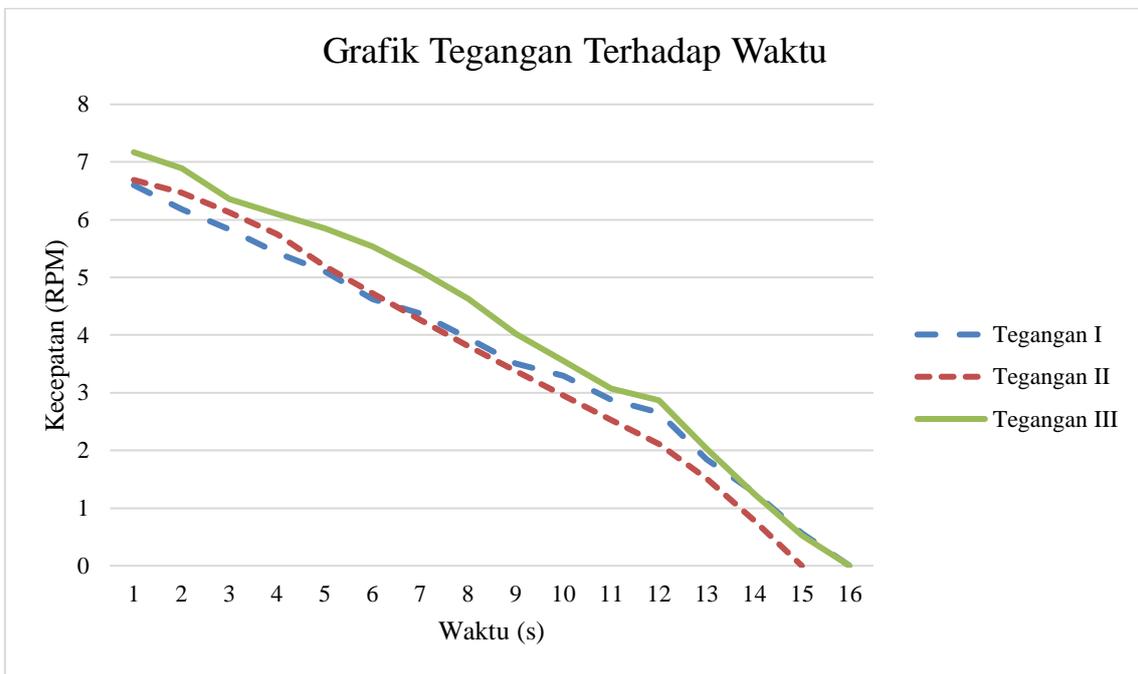
Gambar 66. Grafik Kecepatan Terhadap Waktu - (800 rpm – 5 kg)



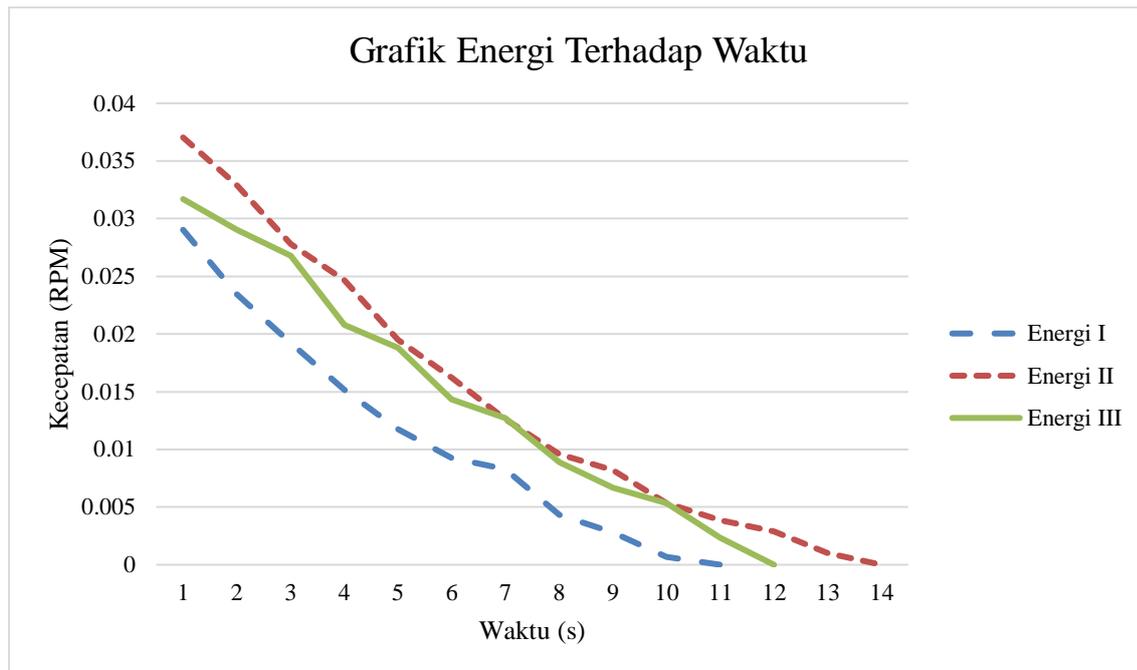
Gambar 67. Grafik Perlambatan Terhadap Waktu - (800 rpm – 5 kg)



Gambar 68. Grafik Arus Terhadap Waktu - (800 rpm – 5 kg)



Gambar 69. Grafik Tegangan Terhadap Waktu - (800 rpm – 5 kg)



Gambar 70.. Grafik Energi Terhadap Waktu - (800 rpm – 5 kg)

Berdasarkan grafik (66-70) diatas, dapat diketahui bahwa untuk pengujian beban 5 kg dengan dua buah ultrakapasitor paralel dan batas kecepatan diatur 800 rpm didapatkan hasil kecepatan tanpa ultrakapasitor dengan satu buah ultrakapasitor tidak memiliki perbedaan yang cukup berarti. Keduanya membutuhkan waktu 16 detik untuk dapat berhenti total. Untuk nilai perlambatan yang dihasilkan, keduanya menghasilkan grafik yang relatif sama dengan nilai rata-rata untuk tanpa ultrakapasitor sebesar $0.97(m/s^2)$ dan dengan ultrakapasitor sebesar $0.97(m/s^2)$. Dengan hasil ini, dapat dikatakan bahwa pengujian untuk kecepatan 800 rpm mendapati dengan ultrakapasitor paralel nilai perlambatannya relatif sama dengan tanpa ultrakapasitor. Sedangkan untuk arus, tegangan dan energi yang dihasilkan dapat dilihat pada grafik tersebut. Ketiganya ditampilkan dalam hasil tiga kali percobaan. Untuk arus didapatkan nilai tertinggi sebesar 5 mA. Sedangkan untuk tegangan menghasilkan nilai tertinggi pada percobaan ketiga sebesar 7.2 V. Berdasarkan data arus dan tegangan, didapatkan nilai energi regenerasi terbesar ada pada percobaan ketiga sebesar 0.2091662 Joule.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian yang dilakukan selama penelitian skripsi dengan judul Kontrol Torque Pengereman Regeneratif pada Sepeda Listrik dengan Integrasi Ultrakapasitor dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Pada penelitian ini, peneliti telah berhasil membuat model uji pengereman regeneratif dengan menggunakan motor BLDC 2000w yang disuplai dengan baterai 65V dan menggunakan dua buah ultrakapasitor 3000F dengan tegangan kerja 2.8V.
2. Pengujian yang dilakukan dalam penelitian ini adalah dengan cara memberikan variasi terhadap 3 faktor yaitu beban, kecepatan dan juga jumlah ultrakapasitor. Untuk beban yang digunakan sebesar 2.5 kg, 3.75 kg dan 5 kg dengan variasi kecepatan sebesar 600 rpm, 700 rpm dan 800 rpm dan setiap faktor beban dan kecepatan di uji dengan 2 kondisi ultrakapasitor yaitu satu ultrakapasitor dan 2 buah ultrakapasitor yang dirangkai secara paralel.

3. Berdasarkan pengujian diatas, didapatkan hasil untuk nilai perlambatan, arus dan tegangan tertinggi dihasilkan dari variasi beban 2.5 kg dengan kecepatan 800 rpm dan satu buah ultrakapasitor dengan nilai berturut-turut adalah sebesar 1.57 m/s^2 selama 11 detik, 5.8 mA dan 7.87 V. Sedangkan untuk energi tertinggi sebesar 0.2091662 Joule yang didapat dari variasi beban 5 kg dengan kecepatan 800 rpm dan ultrakapasitor paralel.

DAFTAR PUSTAKA

1. Biro Komunikasi dan Informasi Publik. (2021). *Kendaraan Listrik Masa Depan Transportasi Indonesia*. Kementerian Perhubungan Republik Indonesia. <http://dephub.go.id/post/read/kendaraan-listrik-masa-depan-transportasi-indonesia>
2. Dani, M., & Priananda, C. W. (2020). *Perancangan dan pengaturan pengereman regeneratif brushless dc sebagai modul pembelajaran*. 1(1).
3. Electronics, R. (2017). *Lm393 Motor Speed Measuring Sensor Module For Arduino*. www.rajguruelectronics.com
4. Farnell. (2013). *Arduino Uno Datasheet*. Datasheets. <https://www.farnell.com/datasheets/1682209.pdf>
5. Fisabili, L. M. (2021). *Rancang Bangun Sistem Peringatan Kebakaran Box Panel Outdoor Menggunakan Arduino Uno Berbasis GSM SIM800L V1*. Institut Teknologi PLN.
6. Khayyam, H., & Bab-Hadiashar, A. (2014). Adaptive intelligent energy management system of plug-in hybrid electric vehicle. *Energy*, 69, 319–335. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.03.020>
7. Latif, M., Valdesio, A., & Muharam, M. (2018). Energi Listrik dari Pengereman Regeneratif Sepeda Motor dengan Menggunakan Dinamo Sepeda. *Jurnal Nasional Teknik Elektro*, 7(2), 90. <https://doi.org/10.25077/jnte.v7n2.503.2018>
8. Li, L., Li, X., Wang, X., Song, J., He, K., & Li, C. (2016). Analysis of downshift's improvement to energy efficiency of an electric vehicle during regenerative braking. *Applied Energy*, 176, 125–137. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.05.042>
9. LSUC. (1993). *LSUC 002R8P 3000F EA*. Datasheets. <https://doi.org/10.1080/09613219308727250>
10. M, A. R. N., Hariyanto, N., & Saodah, S. (2016). Studi Besaran Torca Induksi pada Motor Listrik Hoist Berdasarkan Hasil Perhitungan dan Simulasi. *Jurnal Reka Elkomika*, 4(2), 154–164.
11. Putra, R. P., Hajar, I., & Widyastuti, C. (2021). *Energi dan Kelistrikan : Jurnal Ilmiah Desain Sistem Pengereman Regeneratif Pada Sepeda Listrik Ringkas Energi dan Kelistrikan : Jurnal Ilmiah*. 13(1), 11–19. <https://doi.org/10.33322/energi.v13i1.1058>
12. Qadrdan, M., Jenkins, N., & Wu, J. (2018). Smart grid and energy storage. In *McEvoy's Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications* (Third Edit). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809921-6.00025-2>
13. Qiu, C., & Wang, G. (2016). New evaluation methodology of regenerative braking contribution to energy efficiency improvement of electric vehicles. *Energy Conversion and Management*, 119, 389–398. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.04.044>
14. Saleh, R. (2019). *Perancangan dan Permodelan Sistem Hibrida Baterai-Supercapacitor pada Sistem Konversi Energi Angin (SKEA)*. Skripsi, Teknik Elektro ITS.
15. Soepranto, Shidiq, M., Wibawa, U., & Utomo, T. (2018). Pengereman Regeneratif Motor DC Tanpa Sikat (BLDC) Untuk Pengisian Baterai Pada Sepeda Elektrik. *Jurnal Nasional Teknik Elektro*, 9(1), 1–9.

16. Thowil Afif, M., & Ayu Putri Pratiwi, I. (2015). Analisis Perbandingan Baterai Lithium-Ion, Lithium-Polymer, Lead Acid dan Nickel-Metal Hydride pada Penggunaan Mobil Listrik - Review. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 6(2), 95–99. <https://doi.org/10.21776/ub.jrm.2015.006.02.1>
17. Tohoku Murata Manufacturing Co., L. (2016). *US18650VTC6*. Datasheets. <https://www.murata.com/-/media/webrenewal/products/batteries/cylindrical/pdfs/us18650vtc6-sds.ashx?la=en-US&cvid=20210215080000000000>
18. Y.B. Adyapaka Apatya, A. S. and F. Y. (2017). Design and Prototyping of 3-Phase BLDC Motor. *QiR 2017 - 2017 15th International Conference on Quality in Research (QiR)*, 209–214. <https://doi.org/10.1109/QIR.2017.8168483> YALU. (2019). *High Speed Brushless DC Motor*. <https://www.yalumotor.com/high-speed-brushless-dc-motor/electric-mid-drive-brushless-dc-motor-bm1109-for-ride-on-toy-scooter>