

Perancangan Kontroler Motor BLDC (*BRUSHLESS DIRECT CURRENT*) dengan *Regenerative Braking*

1st Muhammad Fadil
Fakultas Teknik Elektro
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia

mfadil@student.telkomuniversity.ac.id

2nd Angga Rusdinar
Fakultas Teknik Elektro
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia

anggarusdinar@telkomuniversity.ac.id

3rd Irwan Purnama
Fakultas Teknik Elektro
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia

irwanp@telkomuniversity.ac.id

Abstrak — Perkembangan kendaraan listrik menuntut sistem penggerak motor yang efisien dan hemat energi. Salah satu teknologi pendukungnya adalah regenerative braking, yaitu proses mengubah energi kinetik saat pengereman menjadi energi listrik yang disalurkan kembali ke baterai. Tugas Akhir ini bertujuan merancang kontroler motor BLDC (Brushless Direct Current) yang mampu melakukan regenerative braking dengan pengujian selama 5 detik untuk menganalisis hubungan antara kecepatan motor dan energi yang diregenerasikan. Sistem dirancang dengan pengendalian sinyal PWM pada driver motor BLDC serta integrasi rangkaian boost converter untuk mengatur aliran energi balik. Pengujian dilakukan pada berbagai kecepatan motor dengan pengamatan sinyal PWM, back-EMF, dan arus induktor menggunakan osiloskop. Data dianalisis berdasarkan perbandingan daya keluar dari motor dengan daya yang masuk kembali ke baterai. Hasil menunjukkan sistem mampu meregenerasi energi secara efektif dengan efisiensi maksimum mencapai 56,65%. Semakin tinggi kecepatan motor, semakin besar daya yang berhasil dikembalikan. Sistem ini menunjukkan potensi sebagai solusi hemat energi dalam sistem penggerak kendaraan listrik berbasis motor BLDC.

Kata kunci : Motor BLDC, Regenerative Braking, Boost Converter, Efisiensi Energi, PWM.

I. PENDAHULUAN

Dalam beberapa tahun terakhir, penggunaan motor listrik, khususnya motor BLDC (Brushless DC), semakin meningkat seiring dengan berkembangnya teknologi kendaraan listrik (EV) [1]. Motor BLDC dipilih karena memiliki efisiensi yang tinggi, dan kerugian daya pada sumber listrik lebih sedikit dibandingkan dengan jenis motor listrik yang lain [2]. Penggunaan motor BLDC dalam aplikasi kendaraan listrik tidak hanya memberikan kinerja dengan efisiensi yang tinggi, tetapi juga dapat meningkatkan keandalan secara keseluruhan, yang merupakan faktor penting dalam memperpanjang jarak tempuh kendaraan.

Salah satu tantangan dalam penggunaan motor BLDC adalah mengoptimalkan proses regenerative braking. Teknologi regenerative braking adalah mekanisme yang mengurangi kecepatan kendaraan dengan mengubah sebagian energi kinetiknya menjadi bentuk energi lain yang berguna, seperti arus listrik [3]. Motor BLDC, dalam mode regenerative braking, dapat bertindak sebagai generator yang mengubah energi mekanik menjadi energi listrik [4].

Penelitian menunjukkan bahwa penerapan regenerative braking dapat meningkatkan efisiensi jarak tempuh yang lebih efisien dibandingkan dengan kendaraan listrik tanpa sistem regenerative braking [5].

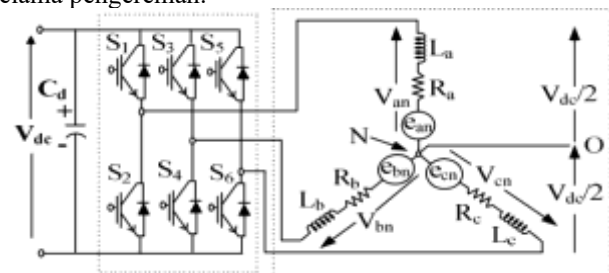
Pengendalian motor BLDC dengan regenerative braking memerlukan sistem pengontrol yang mampu mengelola aliran energi secara efektif antara motor dan baterai. Hal ini penting untuk memastikan bahwa energi yang dihasilkan selama pengereman tidak menyebabkan kelebihan beban pada baterai atau komponen lain, serta untuk menjaga transisi yang halus antara mode pengereman dan akselerasi. Pada penelitian ini, sensor Hall digunakan untuk membaca posisi rotor motor BLDC, yang memungkinkan pengontrol untuk mengatur arus dan tegangan secara presisi berdasarkan posisi rotor [6]. Sensor ini telah terbukti efektif dalam menjaga sinkronisasi arus dengan posisi rotor, sehingga meningkatkan kinerja sistem secara keseluruhan.

II. KAJIAN TEORI

A. Kajian Teori

1. Inverter Tiga Fasa

Inverter tiga fasa dengan enam mode pensaklaran menggunakan enam saklar elektronik, seperti MOSFET atau IGBT, untuk mengubah tegangan DC menjadi tegangan AC tiga fasa. Saklar ini bekerja secara bergantian dalam enam mode, dan masing-masing mode memiliki siklus sinusoidal 60 derajat. Modulasi lebar pulsa (PWM) adalah teknik yang digunakan untuk mengatur pola pensaklaran untuk menghasilkan gelombang AC yang terpisah 120° antar fase. Sistem ini banyak digunakan pada motor BLDC untuk mengontrol kecepatan dan arah putaran serta mendukung fungsi regenerative braking, yang meningkatkan efisiensi energi dengan mengembalikan energi kinetik ke sumber DC selama pengereman.



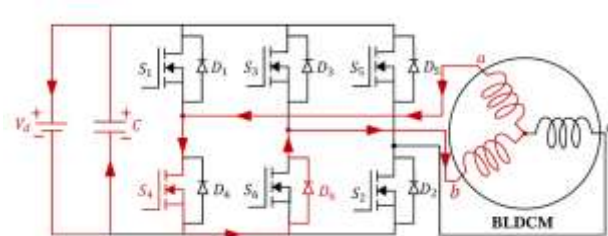
GAMBAR 1

Rangkaian Inverter Tiga Fasa

2. Regenerative Braking

Regenerative braking adalah teknologi yang memungkinkan pemulihan energi kinetik, yang seharusnya hilang selama proses pengereman, menjadi energi listrik yang dapat disimpan kembali ke dalam baterai atau digunakan lebih lanjut untuk menggerakkan kendaraan listrik (EV) [7]. Pada motor BLDC (Brushless DC Motor), sistem ini bekerja dengan mengubah motor menjadi generator selama pengereman. Dengan begitu, energi kinetik diubah menjadi energi listrik dan kemudian disalurkan kembali ke baterai, yang meningkatkan efisiensi energi serta jarak tempuh kendaraan listrik [1][2].

Pada aplikasi kendaraan listrik, regenerative braking pada motor BLDC melibatkan komponen seperti pengontrol daya dan inverter untuk mengelola aliran energi secara optimal [8]. Beberapa studi menunjukkan bahwa teknologi ini mampu meningkatkan efisiensi jarak tempuh kendaraan listrik hingga <1% selama 4 detik [3], terutama dalam kondisi lalu lintas perkotaan dengan perubahan kecepatan yang sering terjadi. Ini juga memperpanjang daya tahan serta umur pakai baterai kendaraan.



GAMBAR 2

Rangkaian Rectifier Body Diode MOSFET

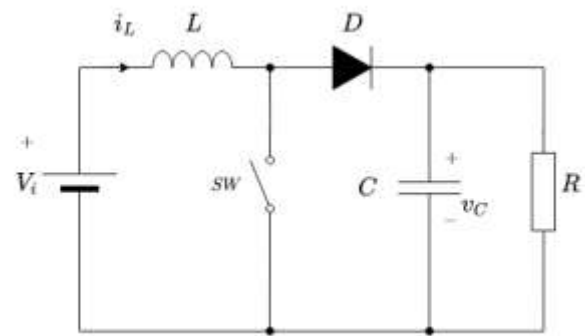
Pada saat motor BLDC beroperasi sebagai penggerak, transistor driver berfungsi untuk mengatur aliran arus dari sumber tegangan DC menuju lilitan stator sesuai dengan pola komutasi, sehingga menghasilkan medan magnet yang mampu memutar rotor. Namun, ketika motor dipaksa berputar oleh energi mekanik eksternal, seperti pada kondisi pengereman regeneratif, rotor dengan magnet permanen akan menimbulkan gaya gerak listrik balik (back-EMF) yang berbentuk tegangan AC tiga fasa. Dalam keadaan tersebut, transistor driver bersama dengan dioda internal MOSFET berperan sebagai penyearah, sehingga tegangan AC yang dihasilkan oleh stator dapat dikonversi menjadi tegangan DC dan dialirkan kembali ke sumber energi, yaitu baterai. Apabila motor berputar maju, urutan fasa back-EMF mengikuti arah normal sehingga arus dapat disearahkan masuk ke baterai.

3. DC-DC Boost Converter

DC-DC converter digunakan untuk menyesuaikan tegangan DC dari satu level ke level lain yang diinginkan, baik dengan menaikkan (step-up) maupun menurunkan tegangan (step-down). Alat ini memainkan peran penting dalam berbagai aplikasi, termasuk kendaraan listrik (EV) dan sistem energi terbarukan, karena memungkinkan penyediaan tegangan yang tepat untuk masing-masing komponen tanpa membuang energi.

Dalam motor BLDC yang digunakan pada kendaraan listrik, DC-DC converter memastikan tegangan yang diterima sesuai dengan kebutuhan operasional motor. Konverter ini juga meningkatkan efisiensi energi dengan mengatur suplai daya sesuai beban dan kecepatan motor. Konverter DC-DC

tersedia dalam berbagai konfigurasi, seperti buck, boost, dan buck-boost, yang memberikan efisiensi yang lebih baik dalam konversi daya.



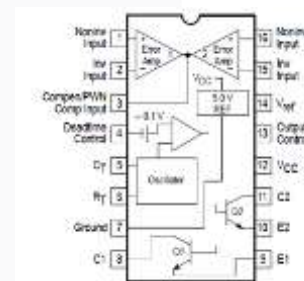
GAMBAR 3

Rangkaian DC-DC Boost Converter

B. Komponen

1. TL494

IC TL494 adalah pengontrol boost converter sinkron yang dirancang untuk aplikasi daya tinggi dengan efisiensi tinggi. Untuk aplikasi seperti regenerative braking pada motor BLDC, IC ini sangat cocok untuk menangani tegangan input yang cukup luas hingga 41V dan mengatur output daya dengan presisi. TL494 mendukung mode sinkron, yang berarti lebih efisien sistem dengan mengurangi kehilangan daya selama proses konversi. Selain itu, IC ini memiliki fitur perlindungan terhadap overvoltage dan overcurrent sehingga sistem aman selama operasi pengereman regeneratif. TL494 membantu memastikan bahwa energi yang terbuang selama pengereman dimaksimalkan dengan mengatur arus balik ke baterai secara efisien dan stabil.

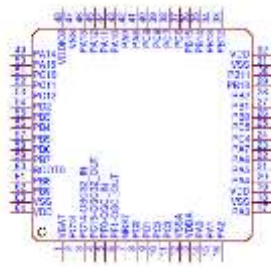


GAMBAR 4

IC TL494

2. STM32G431RBT6

Dalam pembuatan kontroler BLDC ini terdapat mikrokontroler STM32G431RBT6 yang berguna dalam mengontrol setiap kegiatan pada kontroler yang dirancang seperti mengontrol perputaran motor BLDC dan mengontrol perpindahan mode regenerative braking. Pemilihan mikrokontroler STM32G431RBT6 dikarenakan mikrokontroler ini memiliki core frekuensi yang cukup besar diangka 170 MHz yang mampu melakukan switch arus dengan sangat cepat.

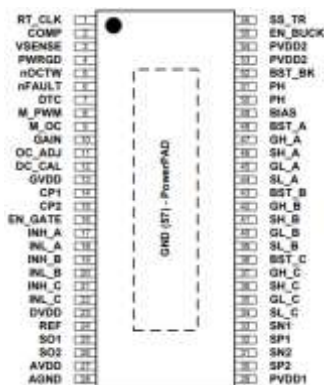


GAMBAR 5

Mikrokontroler STM32G431RBT6

3. Gate Driver DRV8302

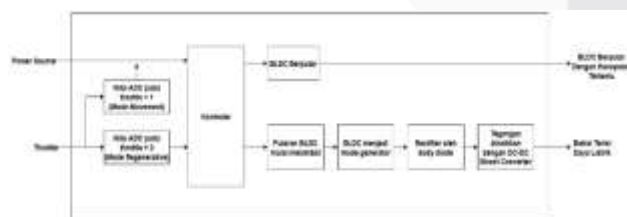
Gate driver DRV8302 adalah komponen penggerak MOSFET yang dirancang khusus untuk aplikasi motor brushless DC (BLDC) berdaya tinggi. Komponen ini memiliki fitur lengkap, seperti driver gate 3-fase untuk MOSFET, deteksi arus internal, serta kemampuan komunikasi PWM atau analog yang fleksibel. Selain itu, DRV8302 dilengkapi dengan proteksi termal, proteksi overcurrent, dan undervoltage lockout, yang membuat sistem Anda lebih aman dan andal dalam berbagai kondisi operasi. Kemampuan driver ini untuk mengendalikan MOSFET dengan cepat dan presisi memungkinkan pengaturan daya yang optimal selama proses regenerative braking.



GAMBAR 6

Driver IC Gate DRV8302

A. Desain Sistem



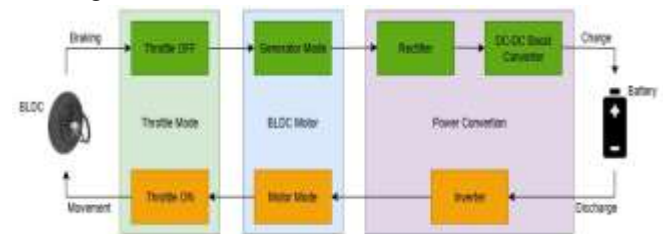
GAMBAR 5

Diagram Fungsi

Tujuan dari desain perancangan sistem ini adalah untuk menguji apakah sistem regenerative braking dapat bekerja dengan memberikan daya listrik dan dapat disimpan kembali ke baterai. Pengujian ini dilakukan menggunakan metode Back-EMF, yang juga menunjukkan kinerja kontroler dalam memberikan daya ke baterai, dan menentukan kapan kontroler berpindah ke mode regenerative braking atau mode menggerakkan motor BLDC. Selain itu didalam kontroler di

berikan proteksi sensor arus, agar menjaga kontroler pada saat lonjakan arus yang besar disaat motor BLDC dijalankan.

B. Diagram Blok

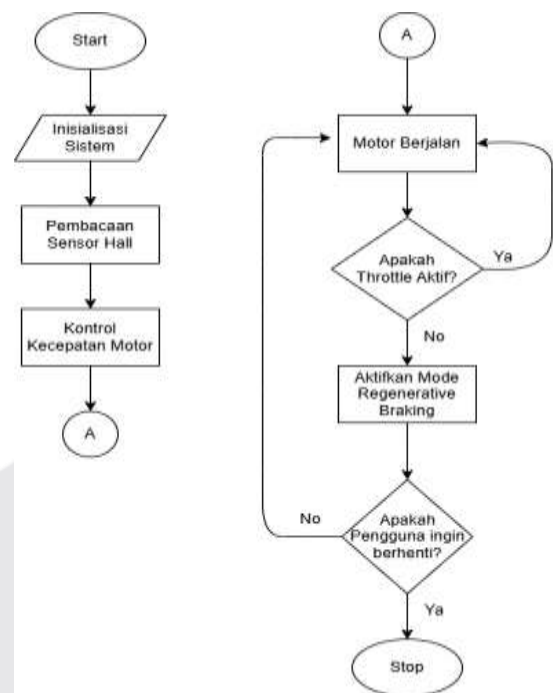


GAMBAR 7

Diagram Blok

Kontroler BLDC dirancang untuk melakukan proses regenerative braking dengan memberikan respons pengguna melalui pergerakan throttle. Jika throttle ON, kontroler akan berada dalam mode pergerakan motor BLDC, dan jika throttle OFF, kontroler akan berpindah ke mode regenerative braking. Ini dapat dicapai dengan sistem kontrol yang baik melalui pemrosesan mikrokontroler STM32.

C. Flowchart



GAMBAR 8

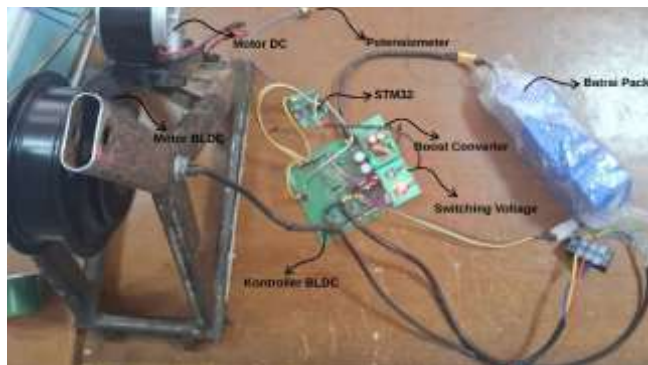
Flow Chart Sistem

Flowchart ini menggambarkan alur kerja sistem kontrol motor BLDC dengan fitur regenerative braking. Proses dimulai dengan inisialisasi sistem, diikuti oleh pembacaan sensor Hall untuk mendeteksi posisi rotor. Berdasarkan pembacaan tersebut, sistem melakukan kontrol kecepatan motor. Selanjutnya, motor mulai berjalan dan sistem secara terus-menerus memeriksa apakah throttle masih aktif. Jika throttle aktif, motor tetap beroperasi normal. Namun, jika throttle tidak aktif, maka sistem secara otomatis mengaktifkan mode regenerative braking untuk mengubah energi kinetik menjadi energi listrik yang dikembalikan ke

baterai. Setelah mode regenerative braking aktif, sistem akan mengecek apakah pengguna ingin berhenti sepenuhnya.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bagian ini membahas perancangan dan pengujian kontroler motor BLDC, gelombang back-EMF, DC-DC Boost Converter, termasuk pengujian terhadap gelombang gate MOSFET, tegangan keluaran, konsumsi arus, switching tegangan, serta efisiensi pengisian baterai selama mode regenerative braking. Pengujian dilakukan dengan menganalisis grafik dan data. Seluruh proses pengujian regenerative braking dilakukan di laboratorium INACOS.



GAMBAR 9

Tampak Sistem Keseluruhan

A. Pengujian Keluaran Kontroler Motor BLDC

Pada pengujian ini, dilakukan pengamatan terhadap hasil keluaran kontroler motor BLDC, yang mencakup parameter seperti waktu, tegangan, arus, dan daya. Pengamatan difokuskan untuk mengevaluasi respons kontroler terhadap sinyal masukan dan kondisi operasional motor dalam berbagai kecepatan.

TABEL 2
Pengujian Kontroler Motor BLDC

| Percobaan ke- | RPM | Waktu (s) | Vout (V) | Iout (A) | Pout (W) |
|------------------|---------------|-----------|--------------|--------------|---------------|
| 1 | 59,5 | 5 | 49,85 | 0,29 | 14,45 |
| 2 | 86,2 | 5 | 49,83 | 0,33 | 16,44 |
| 3 | 112,7 | 5 | 49,83 | 0,37 | 18,43 |
| 4 | 162,7 | 5 | 49,8 | 0,44 | 21,91 |
| 5 | 195,1 | 5 | 49,78 | 0,49 | 24,39 |
| 6 | 243,4 | 5 | 49,76 | 0,57 | 28,36 |
| 7 | 271,8 | 5 | 49,72 | 0,61 | 30,32 |
| 8 | 305,6 | 5 | 49,67 | 0,66 | 32,78 |
| 9 | 331,3 | 5 | 49,62 | 0,71 | 35,23 |
| 10 | 366,9 | 5 | 49,56 | 0,76 | 37,66 |
| Rata-Rata | 213,52 | 5 | 49,74 | 0,523 | 26,001 |

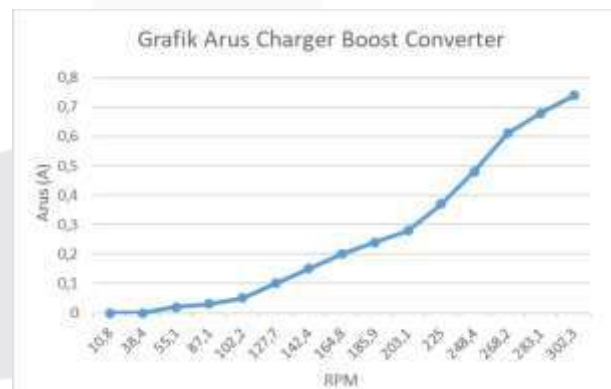
Tabel di atas menunjukkan hasil pengujian kontroler motor BLDC dengan variasi kecepatan (RPM) selama 5 detik. Terlihat bahwa semakin tinggi RPM, arus (I_{out}) dan daya output (P_{out}) turut meningkat. Contohnya, pada RPM 59,5 diperoleh arus 0,29 A dan daya 14,45 W, sedangkan pada RPM 366,9 arus mencapai 0,76 A dan daya 37,65 W. Rata-rata tegangan output adalah 49,73 V, dengan arus 0,523 A dan daya 26,00 W. Hasil ini menunjukkan kontroler bekerja secara efektif mengikuti perubahan kecepatan.

B. Pengujian Regenerative Braking

Pada pengujian ini, DC-DC boost converter dioperasikan dengan diberikan beban berupa baterai 48V untuk mengamati respons arus yang mengalir dari converter saat diberi beban. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk memastikan apakah DC-DC boost converter mampu menangani beban baterai 48V dan melakukan proses pengisian daya (charging) secara efektif.

TABEL 1
Pengujian Regenerative Braking

| Percobaan ke- | RPM | Waktu (s) | Vin (V) | Vout (V) | Iout (A) | Pout (W) |
|------------------|--------------|-----------|-------------|--------------|--------------|--------------|
| 1 | 10,8 | 5 | 1,9 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 38,4 | 5 | 4,8 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 55,1 | 5 | 7,3 | 49,56 | 0,02 | 1,0 |
| 4 | 87,1 | 5 | 10,4 | 49,56 | 0,03 | 1,48 |
| 5 | 102,2 | 5 | 12,3 | 49,56 | 0,05 | 2,47 |
| 6 | 127,7 | 5 | 15,6 | 49,56 | 0,10 | 4,95 |
| 7 | 142,4 | 5 | 17,5 | 49,56 | 0,15 | 7,43 |
| 8 | 164,8 | 5 | 20,4 | 49,56 | 0,20 | 9,91 |
| 9 | 185,9 | 5 | 23,1 | 49,56 | 0,24 | 11,89 |
| 10 | 203,1 | 5 | 25,3 | 49,56 | 0,28 | 13,87 |
| 11 | 225,0 | 5 | 28,1 | 49,56 | 0,37 | 18,33 |
| 12 | 248,4 | 5 | 31,1 | 49,56 | 0,48 | 23,78 |
| 13 | 268,2 | 5 | 33,7 | 49,56 | 0,61 | 30,23 |
| 14 | 283,1 | 5 | 35,5 | 49,56 | 0,68 | 33,70 |
| 15 | 302,3 | 5 | 37,2 | 49,56 | 0,74 | 36,67 |
| Rata-Rata | 162,9 | 5 | 20,2 | 49,56 | 0,263 | 13,04 |



GAMBAR 10

Grafik Arus Charger

Pada grafik ini terlihat bahwa semakin tinggi putaran motor (RPM), maka arus yang dihasilkan oleh boost converter juga semakin besar. Hal ini terlihat dari grafik yang menunjukkan hubungan linier menaik antara RPM dan arus keluaran. Proses ini mencerminkan terjadinya regenerative braking, di mana energi kinetik dari putaran motor dikonversi menjadi energi listrik dan dialirkan kembali untuk mengisi baterai melalui boost converter.

C. Perhitungan Efisiensi Charge oleh Motor BLDC ke Batrai

Dengan mengetahui daya rata-rata yang dikeluarkan oleh motor BLDC dan daya yang regenerasi kembali melalui proses regenerative braking maka kita dapat mencari efisiensi yang dihasilkan pada saat proses regenerative braking yang terjadi dengan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$\eta_{\text{Regen}} = E_{\text{charge}} / E_{\text{bat}} \times 100\% \quad (1)$$

$$E_{\text{charge}} = V_{\text{bat}} \times I_{\text{charge}} \times T = 49,56 \text{ V} \times 0,263 \text{ A} \times 5 = 65,17 \text{ J} \quad (2)$$

$$E_{\text{bat}} = V_{\text{dc}} \times I_{\text{bat}} \times T = 49,74 \text{ V} \times 0,523 \text{ A} \times 5 = 130,07 \text{ J} \quad (3)$$

$$\eta_{\text{Regen}} = 65,17 / 130,07 \times 100\% = 50,10\% \quad (4)$$

Dengan rumus tersebut didapatkan nilai efisiensi energi yang diregenerasi dengan membagi keluaran daya motor BLDC dengan daya masukan oleh regenerative braking, dengan efisiensi sebesar 50,10%. Nilai ini menunjukkan bahwa lebih dari setengah energi kinetik yang dihasilkan oleh motor selama proses pengereman berhasil dikonversi kembali menjadi energi listrik dan dialirkan ke baterai. Efisiensi menunjukkan kinerja sistem yang cukup baik dalam memanfaatkan energi yang seharusnya terbuang, serta berkontribusi terhadap peningkatan efisiensi keseluruhan kendaraan listrik atau sistem yang digunakan.

D. Perhitungan Efisiensi Regenerative Terhadap Discharge Batrai

Dengan mengetahui nilai efisiensi dari batrai ke motor BLDC dan efisiensi dari motor BLDC ke batrai dalam proses regenerative braking maka dapat mengetahui berapa perbandingan efisiensi yang dihasilkan dengan berikut:

$$\eta = \eta_{\text{regen}} / (\eta_{\text{bat}} \rightarrow \eta_{\text{motor}}) \times 100\% \quad (5)$$

$$\eta = (50,10\%) / (93,68\%) \times 100\% \quad (6)$$

$$\eta = 53,47\% \quad (7)$$

Hasil ini menunjukkan hasil perhitungan efisiensi berdasarkan perbandingan antara efisiensi regeneratif dengan efisiensi saat pelepasan energi atau discharge. Dari perhitungan diperoleh bahwa nilai efisiensi regeneratif sebesar 50,10% dan nilai efisiensi discharge sebesar 93,68%. Dengan menggunakan rumus perbandingan, didapatkan efisiensi keseluruhan sebesar 53,47%. Hal ini berarti proses regenerative braking hanya mampu mengembalikan sekitar 53,47% dari energi yang sebelumnya digunakan pada saat discharge.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian sistem regenerative braking pada motor BLDC menggunakan boost converter selama durasi 5 detik, diperoleh bahwa sistem mampu meregenerasi energi listrik secara efektif. Proses ini menunjukkan adanya peningkatan efisiensi energi seiring bertambahnya kecepatan putaran motor. Dengan demikian, rumusan masalah terkait besarnya efisiensi dan pengaruh kecepatan motor terhadap jumlah energi regeneratif telah terjawab melalui pengujian dan perhitungan yang dilakukan. Berikut kesimpulan utama yang dapat diambil:

1. Sistem regenerative braking mampu meregenerasi daya dari motor BLDC kembali ke baterai secara efektif selama proses pengereman, dengan efisiensi rata-rata energi yang dihasilkan sebesar 53,47%.

2. Semakin tinggi kecepatan putaran (RPM) motor, semakin besar arus dan daya yang dapat diregenerasikan.
3. Pada RPM 55,1 diperoleh daya sekitar 1 W, sedangkan pada RPM 302,3 daya meningkat menjadi 36,67 W, menandakan hubungan linier antara RPM dan daya regeneratif.
4. Rata-rata tegangan output sekitar 49,73 V dan arus rata-rata 0,523 A dengan daya rata-rata 26,00 W menunjukkan kinerja sistem yang stabil dan konsisten.

REFERENSI

- [1] N. Mohan, *Electric Machines and Drives: A First Course*, Wiley, 2012.
- [2] C. Sheeba Joice, S. R. Paranjothi, dan V. Jawahar Senthil Kumar, "Digital control strategy for four quadrant operation of three phase BLDC motor with load variations," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 9, no. 2, pp. 974-982, May 2013.
- [3] B. Prasanth, R. Paul, D. Kaliyaperumal, R. Kannan, Y. V. P. Kumar, M. K. Chakravarthi, and N. Venkatesan, "Maximizing Regenerative Braking Energy Harnessing in Electric Vehicles Using Machine Learning Techniques," *Electronics*, vol. 12, no. 5, p. 1119, 2023.
- [4] Naseri, F, Farjah, E, & Ghanbari, T. "An Efficient Regenerative Braking System Based on Battery/Supercapacitor for Electric, Hybrid and Plug-In Hybrid Electric Vehicles with BLDC Motor", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016.
- [5] H. Mamur dan A. K. Candan, "Detailed Simulation of Regenerative Braking of BLDC Motor for Electric Vehicles," *Bilge International Journal of Science and Technology Research*, vol. 4, no. 2, pp. 63-72, 2020.
- [6] N .F. Maulana, Yahya. S, S. M. Ilman, " Perancangan dan Simulasi Kendali Kecepatan Motor BLDC dengan Metode PID Menggunakan Teknik Tanpa Sensor Berbasis Simulink MatLab", *Prosiding the 15th Industrial Research Workshop and National Seminar*, pp. 461- 465, Jul. 2024.
- [7] S. K. Mude, T. Lele, A. Mundle, dan S. Lohi, "Study and Simulation of Regenerative Braking on BLDC Motor for Electric Vehicles", *International Journal of Research and Analytical Reviews (IJRAR)*, vol. 10, no. 2, pp. 14-19, Mei 2023.
- [8] M. Bahrami, H. Mokhtari, and A. Dindar, "Energy regeneration technique for electric vehicles driven by a brushless DC motor," *IET Power Electronics*, vol. 13, no. 1, pp. 21-29, 2019.