



Analisis Regenerative Braking Motor Listrik BLDC 10 KW Menggunakan Perekam Sinyal Mobil Listrik PW 6001-16

Marcelinus Sebastian Kurniawan¹, Sriyono², Ramdhani³, Tatang Permana⁴

^{1,2,3,4} Pendidikan Teknik Otomotif, Fakultas Pendidikan Teknik dan Industri, Universitas Pendidikan Indonesia

¹marcelinussebsatian.28@upi.edu, ²sriyono@upi.edu, ³ramdhani@upi.edu, ⁴permana@upi.edu

Abstrak

Efisiensi energi merupakan aspek krusial dalam pengembangan kendaraan listrik untuk mengoptimalkan jarak tempuh baterai. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis performa pengereman regeneratif (regenerative braking) pada motor listrik Brushless DC (BLDC) berdaya 10 kW menggunakan instrumen penganalisis daya presisi tinggi. Pengujian dilakukan di atas mesin chassis dynamometer (Dynojet) dengan tiga variasi simulasi beban kendaraan, yaitu tanpa penumpang, setengah penumpang, dan penuh penumpang, di mana masing-masing skenario dilakukan sebanyak tiga kali pengulangan (run) dengan interval perekaman data setiap 2 detik menggunakan Power Analyzer PW6001-16. Hasil analisis menunjukkan bahwa efisiensi pengereman regeneratif optimal justru dicapai pada kondisi setengah penumpang dengan efisiensi sebesar 14,32% dan penghematan energi rata-rata sebesar 4,44 Wh. Kondisi tanpa penumpang menghasilkan efisiensi sebesar 13,55% dengan energi regeneratif rata-rata -5,98 Wh. Sementara itu, kondisi penuh penumpang menunjukkan penurunan efisiensi yang signifikan menjadi 7,93% dengan energi regeneratif -5,32 Wh, meskipun total konsumsi energi aktifnya paling tinggi sebesar 67,13 Wh. Terjadi malfungsi pembacaan mekanis pada sensor kecepatan (RPM) selama beban penuh akibat getaran ekstrem di atas roller dyno, namun parameter kelistrikan tetap terekam secara akurat. Selain itu, ditemukan bahwa batas daya pengereman regeneratif maksimum konstan pada kisaran -1,21 kW hingga -1,23 kW di seluruh variasi pengujian sebagai bentuk proteksi sistem pengendali kendaraan. Penelitian ini menyimpulkan bahwa penambahan beban kendaraan tidak selalu meningkatkan efisiensi pengereman regeneratif karena adanya batasan torsi elektrik motor dan dominasi pengereman mekanis pada beban puncak..

Kata Kunci: Motor BLDC 10 Kw, Pengereman Regeneratif, Power Analyzer PW6001-16, Chassis Dynamometer, Efisiensi Energi.

Abstrak

Energy efficiency is a crucial aspect of electric vehicle development to optimize battery driving range. This study aimed to analyze the performance of regenerative braking on a 10 kW Brushless DC (BLDC) electric motor using a high-precision power analyzer. The test was conducted on a chassis dynamometer (Dynojet) machine under three simulated vehicle load variations: no passenger, half passenger, and full passenger. Each scenario underwent three repetitions (runs) with a 2-second data logging interval using the PW6001-16 Power Analyzer. Data analysis indicates that optimal regenerative braking efficiency is achieved under the half-passenger condition, reaching 14.32% with an average recovered energy of 4.44 Wh. The no-passenger condition yields an efficiency of 13.55% with an average regenerative energy of -5.98 Wh. Meanwhile, the full-passenger condition shows a significant efficiency drop to 7.93% (-5.32 Wh regenerative energy), despite having the highest active energy consumption of 67.13 Wh. A mechanical reading malfunction occurred in the speed sensor (RPM) during the full-load test due to extreme vibration on the dyno, but electrical parameters remained accurately recorded. Furthermore, the maximum regenerative braking power is found to be constantly limited to a range of -1.21 kW to -1.23 kW across all variations as a controller system protection mechanism. This study concludes that increasing vehicle load does not always enhance regenerative braking efficiency due to electric motor torque limits and the dominance of mechanical braking at peak loads.

Kata Kunci: 10 Kw BLDC Motor, Regenerative Braking, Power Analyzer PW6001-16, Chassis Dynamometer, Energy Efficiency.

1. Pendahuluan

Perkembangan teknologi kendaraan listrik berkembang sangat pesat dalam beberapa tahun terakhir sebagai solusi atas krisis energi fosil dan polusi lingkungan. Salah satu Kkomponen vital yang menentukan performa dan daya jelajah kendaraan listrik adalah efisiensi pemanfaatan energi pada sistem penggerak. Motor listrik jenis Brushless DC (BLDC) berdaya 10 kW banyak diaplikasikan pada prototipe maupun mobil listrik karena memiliki keunggulan berupa efisiensi yang tinggi, kepadatan daya yang baik, serta perawatan yang minim. Namun,

kapasitas baterai yang terbatas masih menjadi tantangan utama, sehingga diperlukan teknologi pendukung untuk memulihkan energi yang terbuang selama kendaraan beroperasi.

Sistem pengereman regeneratif (regenerative braking) merupakan metode mekanis-elektris yang memanfaatkan motor BLDC sebagai generator sesaat ketika kendaraan melakukan deselerasi atau pengereman. Energi kinetik yang dihasilkan oleh massa kendaraan yang bergerak diubah kembali menjadi energi listrik, yang kemudian dialirkan melalui controller untuk mengisi ulang daya baterai. Secara teoretis, besaran energi kinetik dipengaruhi langsung oleh kecepatan kendaraan dan massa total kendaraan. Perubahan beban kendaraan akibat variasi jumlah penumpang diproyeksikan akan memengaruhi dinamika deselerasi dan efisiensi pengembalian energi ke dalam sistem penyimpanan.

Meskipun prinsip dasar pengereman regeneratif telah banyak diketahui, karakteristik pengembalian energi ini pada kondisi riil dengan beban yang bervariasi seringkali menunjukkan hasil yang kompleks. Pada kondisi beban penuh, torsi pengereman yang dibutuhkan menjadi jauh lebih besar, sehingga seringkali melibatkan kombinasi antara pengereman mekanis konvensional dan pengereman elektrik. Fenomena ini menimbulkan pertanyaan mengenai titik optimal efisiensi sistem pengereman regeneratif ketika kendaraan beroperasi pada variasi beban yang berbeda. Untuk menganalisis fenomena transisi energi berdurasi singkat tersebut secara akurat, diperlukan alat perekam sinyal kelistrikan beresolusi tinggi dengan tingkat presisi yang valid. Penggunaan instrumen perekam sinyal mobil listrik Power Analyzer PW6001-16 menjadi solusi krusial dalam penelitian ini. Alat ini mampu mencatat perubahan arus searah (DC), daya aktif, akumulasi energi positif saat motoring, hingga akumulasi energi negatif saat deselerasi dengan interval perekaman yang sangat rapat. Melalui data log yang komprehensif, fluktuasi parameter kelistrikan dan mekanis selama fase pengereman dapat diidentifikasi secara empiris.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis secara mendalam pengaruh simulasi variasi beban muatan kendaraan di atas mesin chassis dynamometer terhadap daya puncak pengereman regeneratif, total energi yang berhasil dipulihkan, serta tingkat efisiensi sistem pada motor BLDC 10 kW..

2. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental kuantitatif dengan melakukan pengujian performa kendaraan listrik yang ditenagai oleh motor Brushless DC (BLDC) berkapasitas 10 kW. Pengujian dilakukan di atas mesin chassis dynamometer (Dynojet) untuk mendapatkan hasil yang terkontrol tanpa pengaruh variabel lingkungan eksternal seperti hambatan aerodinamis. Untuk merekam data kelistrikan dan mekanis secara real-time, penelitian ini menggunakan instrumen penganalisis daya (Power Analyzer) Hioki PW6001-16 yang terhubung langsung pada sistem kelistrikan antara baterai, controller, dan motor listrik. Instrumen ini diatur untuk melakukan data logging dengan interval perekaman setiap 2 detik.

Skenario pengujian dibagi ke dalam tiga variasi simulasi beban untuk merepresentasikan kondisi operasional kendaraan sehari-hari: Variasi 1 (tanpa beban penumpang tambahan), Variasi 2 (beban setengah kapasitas penumpang), dan Variasi 3 (beban penuh penumpang). Simulasi beban ini diaplikasikan melalui penyesuaian nilai inersia (inertia load) pada roller mesin dyno. Guna memastikan keandalan dan validitas data (repeatability), setiap variasi beban diuji sebanyak tiga kali pengulangan (run). Kendaraan diakselerasi di atas roller dyno hingga mencapai kecepatan puncak tertentu, kemudian dilakukan pengereman secara konstan hingga roller berhenti total.

Parameter yang diekstraksi dari alat uji meliputi Arus DC (CH1), Daya Aktif (CH2), Energi Positif Konsumsi (CH3), Energi Negatif Regeneratif (CH4), dan Kecepatan Putaran Motor/RPM (CH7). Perlu dicatat bahwa pada pengujian simulasi beban penuh (Variasi 3), terjadi malfungsi pembacaan pada sensor kecepatan mekanis (RPM) akibat getaran berlebih pada sasis saat kendaraan dibebani inersia puncak di atas mesin dyno, sehingga instrumen PW6001-16 mencatat nilai nol. Meskipun demikian, hal ini tidak memengaruhi validitas hasil penelitian karena metrik utama untuk analisis efisiensi difokuskan murni pada parameter kelistrikan yang terekam secara sempurna.

Data hasil pengujian kemudian diekspor ke dalam format CSV dan dianalisis. Efisiensi pengereman regeneratif dihitung menggunakan rasio antara nilai absolut energi negatif yang dikembalikan ke baterai berbanding dengan total energi positif yang dikonsumsi saat fase motoring/akselerasi.

Di mana P adalah Daya Aktif sistem (Watt) yang direpresentasikan pada channel CH2, V_{DC} adalah tegangan bus (Volt), dan I_{DC} adalah arus DC (Ampere) pada channel CH1. Nilai daya (P) akan positif saat fase motoring dan berubah menjadi negatif saat sistem melakukan regenerative braking. Energi total (E) kemudian dihitung oleh alat ukur melalui integrasi daya terhadap waktu (Persamaan 2) dengan interval perekaman ketat setiap 2 detik ($\Delta t = 2$ detik).

$$P = V_{DC} \times I_{DC} (1)$$

Desain eksperimen dibagi menjadi tiga skenario simulasi beban yang merepresentasikan penggunaan riil kendaraan. Simulasi beban diatur dengan memodifikasi pembebanan inersia (inertia load) secara mekanis dan komputasional pada roller dynamometer, di mana energi kinetik inersia rotasi yang harus diserap motor ditunjukkan pada Persamaan 3.

$$E = \int P(t) dt(2)$$

di mana E_{rot} adalah energi kinetik rotasi (Joule), J merupakan momen inersia total sistem roller dyno ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$), dan ω adalah kecepatan sudut (rad/s) yang berkorelasi dengan RPM mekanis (CH7). Ketiga variasi pembebanan (J) tersebut meliputi:

1. Variasi 1 (Tanpa Penumpang): Roller dyno diatur pada nilai inersia dasar yang setara dengan bobot kosong kendaraan (curb weight).
2. Variasi 2 (Setengah Penumpang): Roller dyno diberikan tambahan beban inersia yang merepresentasikan 50% dari kapasitas angkut maksimal (payload) kendaraan.
3. Variasi 3 (Beban Penuh): Roller dyno diberikan beban inersia maksimal yang merepresentasikan kendaraan terisi penuh (Gross Vehicle Weight).

Prosedur operasional standar (SOP) pengujian pada setiap variasinya dilakukan melalui tiga tahapan utama: (1) Kendaraan diakselerasi dari kondisi diam hingga mencapai putaran roller konstan pada target kecepatan tertentu; (2) Tuas akselerator kemudian dilepas sepenuhnya (throttle off) dan sistem rem mekanis diaplikasikan secara perlahan untuk memicu sensor controller agar mengaktifkan fitur regenerative braking; (3) Perekaman data terus dilanjutkan selama fase deselerasi hingga roller dyno berhenti total (0 RPM). Guna memenuhi kaidah keandalan data (repeatability), setiap variasi beban dilakukan sebanyak 3 kali pengulangan (run).

Tingkat efisiensi pengereman regeneratif (η_{reg}) dievaluasi dengan membandingkan besaran energi listrik yang berhasil dikembalikan ke dalam baterai (Energi Regeneratif Negatif, direkam pada CH4) terhadap total energi listrik yang digunakan selama fase akselerasi (Energi Konsumsi Positif, direkam pada CH3). Formulasi matematis untuk efisiensi ini dijabarkan pada Persamaan 4.

$$E_{rot} = \frac{1}{2} J \omega^2(3)$$

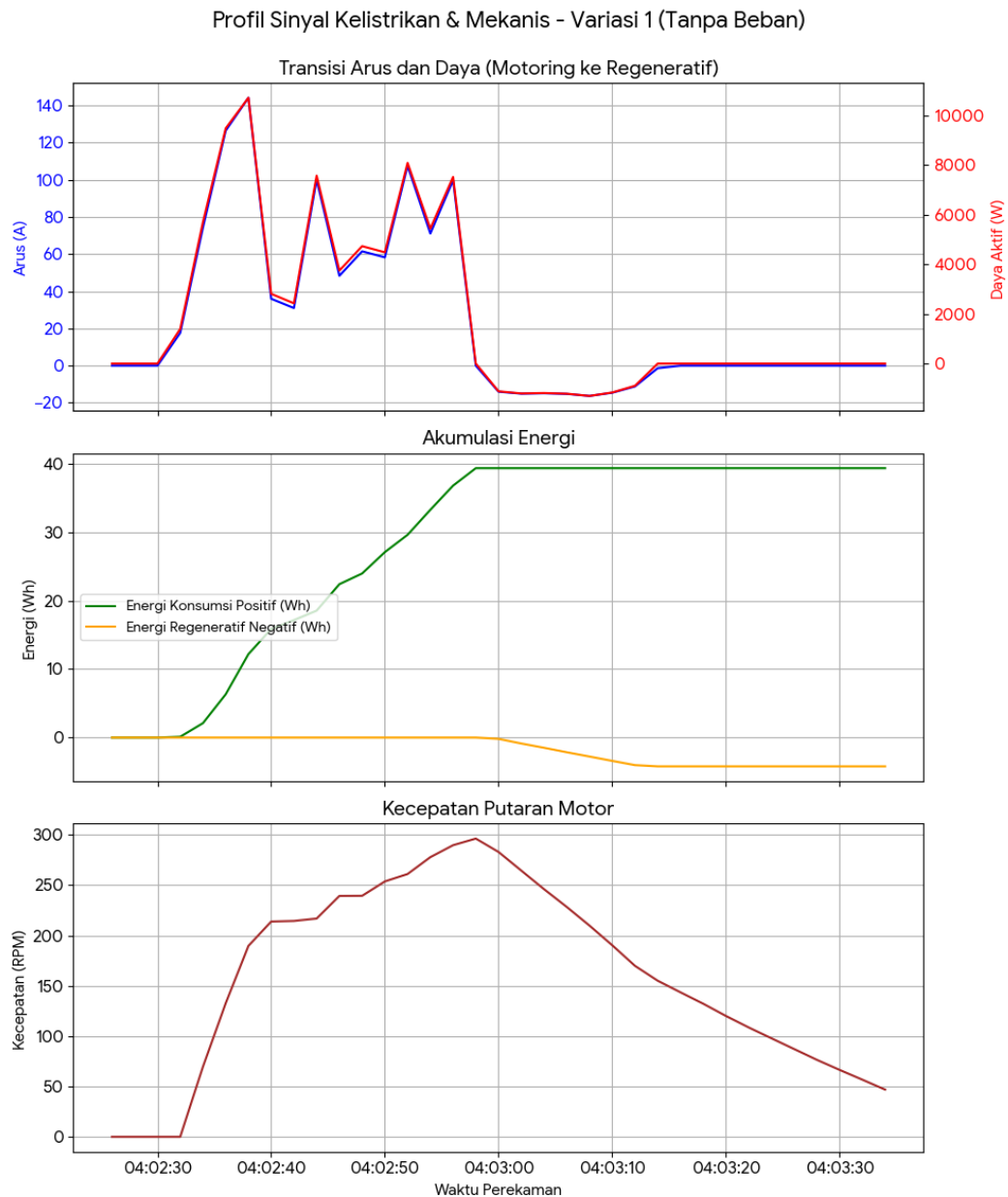
di mana η_{reg} adalah efisiensi regeneratif (%), E_{regen} adalah akumulasi energi pemulihan (Wh) dari data CH4, dan $E_{consumed}$ adalah total energi yang digunakan (Wh) dari data CH3. Perlu dicatat bahwa pada pengujian variasi beban penuh (Variasi 3), besarnya inersia puncak yang tertahan oleh dyno menghasilkan guncangan ekstrem pada sasis kendaraan, yang memicu malfungsi pembacaan sensor putaran (RPM) sehingga terekam bernilai nol. Namun, hal ini dipastikan tidak menganulir validitas temuan utama, mengingat seluruh metrik kelistrikan krusial (Arus, Daya, dan Energi) tetap terekam secara sempurna oleh instrumen Hioki untuk perhitungan efisiensi.

$$\eta_{reg} = |E_{regen} / E_{consumed}| \times 100\%(4)$$

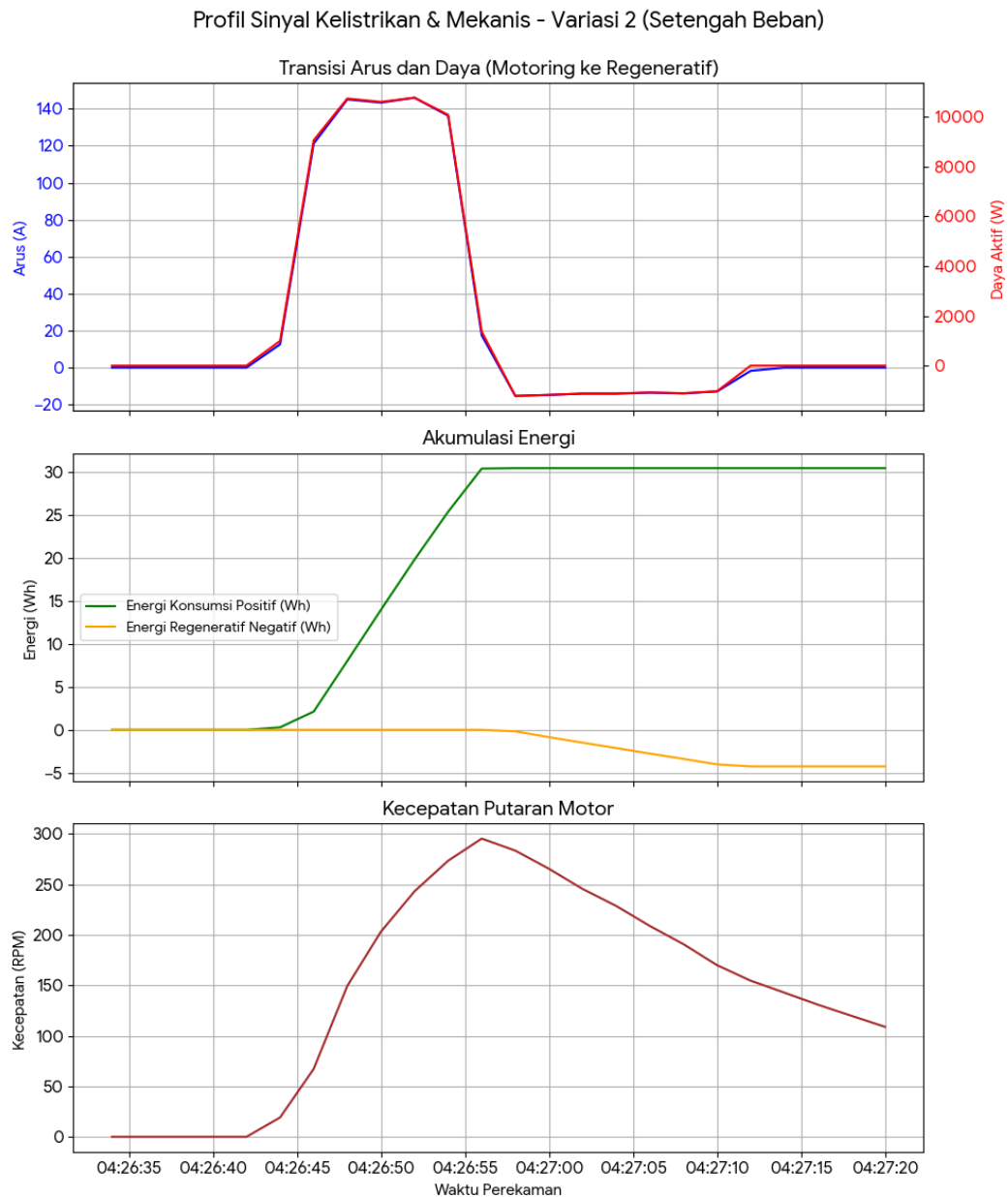
3. Hasil dan Pembahasan

Berdasarkan perekaman sinyal menggunakan PW6001-16, siklus pergerakan motor BLDC 10 kW di atas dynamometer terbagi menjadi dua fase utama yang terlihat jelas pada grafik arus (CH1) dan daya aktif (CH2). Pada fase awal (motoring), motor membutuhkan arus yang besar untuk memutar roller dyno, di mana daya aktif melonjak mencapai puncak maksimum sekitar 10,7 kW hingga 10,9 kW. Fase pengereman regeneratif dimulai ketika tuas akselerator dilepas dan sistem pengereman diaktifkan. Pada titik ini, controller membalikkan fungsi motor BLDC menjadi generator untuk menahan inersia roller. Hal ini dibuktikan dengan perubahan drastis pada pembacaan instrumen di mana arus dan daya aktif menembus angka di bawah nol (negatif) yang mengindikasikan pengisian daya ke baterai. Profil perekaman sinyal dari ketiga variasi dapat diamati pada Gambar 1, 2, dan 3.

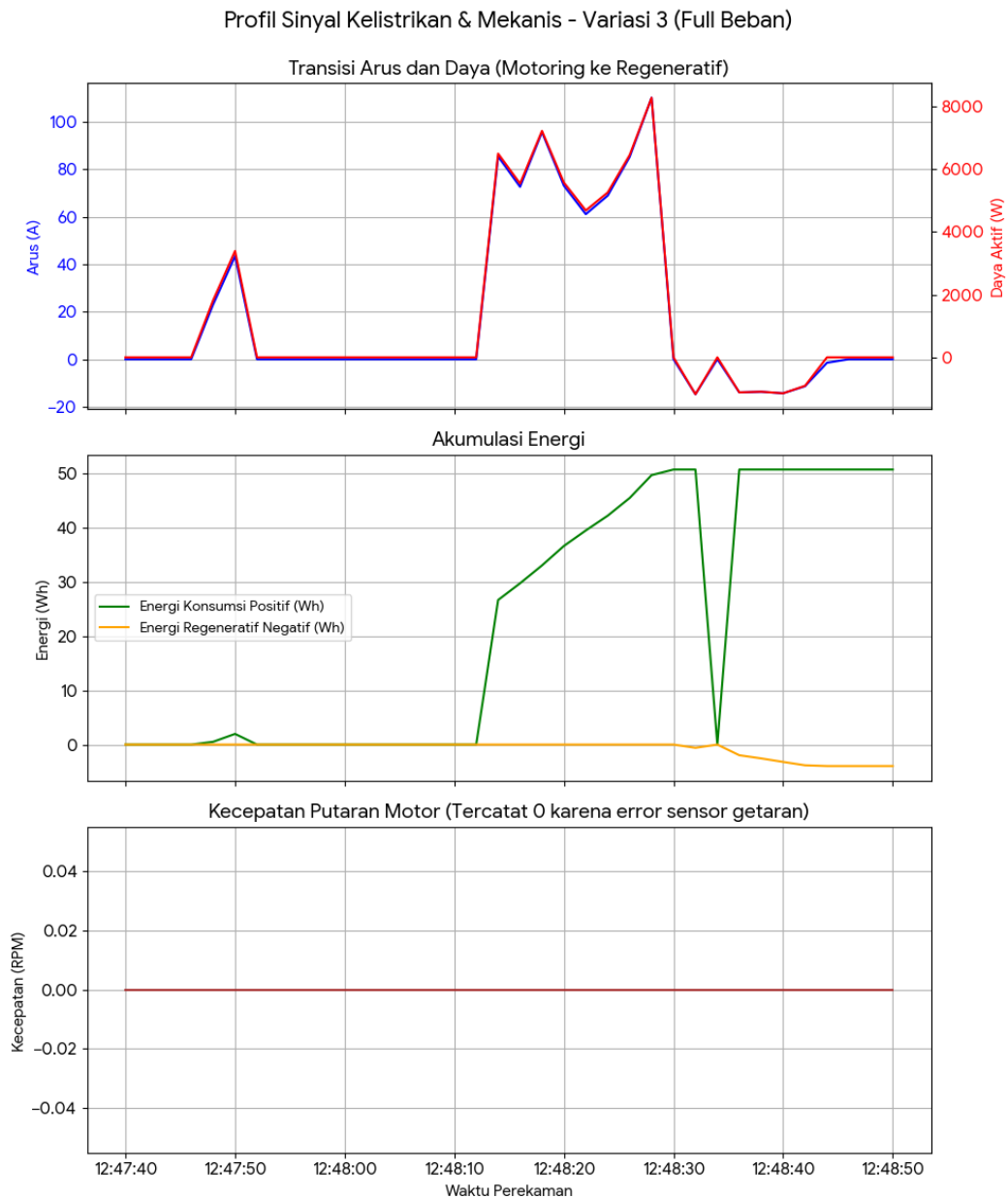
3.1 Karakteristik Siklus Pengereman Regeneratif



Gambar 1. 1Profil Sinyal Kelistrikan & Mekanis (Tanpa Beban)



Gambar 2 1Profil Sinyal Kelistrikan & Mekanis (Setengah Beban)

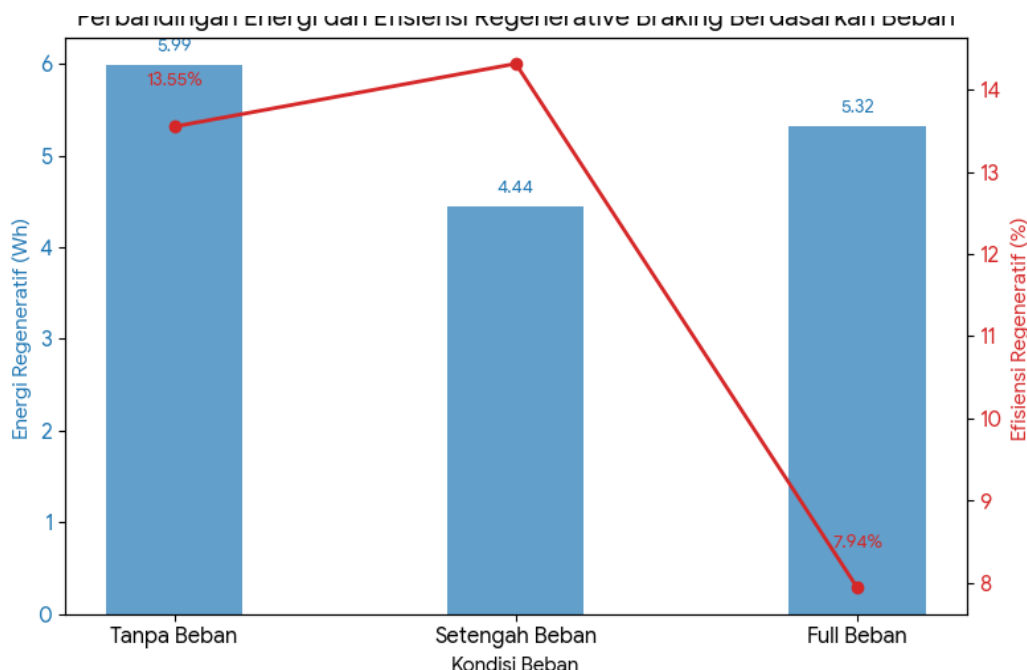


Gambar 3. 1. Profil Sinyal Kelistrikan & Mekanis (Beban Penuh)

3.2 Pengaruh Variasi Beban Terhadap Energi dan Efisiensi

Hasil rekapitulasi nilai rata-rata (mean) dari tiga kali run untuk setiap variasi beban inersia menunjukkan dinamika perpindahan energi yang bervariasi. Rincian hasil pengujian dapat dilihat pada Tabel 1 dan visualisasi perbandingannya pada Gambar 4.

Kondisi Beban	Konsumsi Energi Rata-rata (Wh)	Energi Regeneratif Rata-rata (Wh)	Efisiensi Regeneratif (%)	Daya Puncak Motoring (kW)	Daya Puncak Regenerative (kW)
Tanpa Beban	43,69	-5,99	13,55%	10,81	-1,24
Setengah Beban	31,03	-4,44	14,32%	10,78	-1,22
Beban Penuh	67,14	-5,32	7,94%	8,68	-1,23



Gambar 4. 1 Perbandingan Energi dan Efisiensi Berdasarkan Beban

Bertentangan dengan asumsi teoretis awal bahwa beban yang lebih berat akan menghasilkan energi kinetik dan regeneratif yang berbanding lurus, data empiris dari pengujian dynamometer menunjukkan bahwa efisiensi optimal sistem justru terjadi pada kondisi inersia setengah beban (14,32%). Pada kondisi beban penuh, total konsumsi energi aktif melonjak drastis (67,14 Wh) namun energi yang dikembalikan hanya berkisar -5,32 Wh, menyebabkan efisiensi regeneratif anjlok menjadi hanya 7,94%. Fenomena ini disebabkan oleh batas kemampuan torsi pengereman elektris (braking torque limit) dari motor BLDC. Ketika momentum inersia roller terlalu besar, pengereman elektromagnetik tidak lagi sanggup menahan laju, sehingga sistem mendistribusikan beban pada rem mekanis yang membuang energi kinetik menjadi panas.

3.3 Limitasi Daya Puncak Regeneratif

pengujian menunjukkan nilai yang sangat konstan, yaitu berada di rentang -1,22 kW hingga -1,24 kW. Konsistensi data ini membuktikan bahwa controller motor atau Battery Management System (BMS) memiliki sistem pembatas arus balik (reverse current limiter) untuk mencegah kerusakan sel baterai akibat lonjakan C-rate berlebih saat pengereman terjadi.

4. Kesimpulan

Penelitian ini berhasil menganalisis karakteristik pengereman regeneratif pada motor BLDC 10 kW menggunakan instrumen PW6001-16 melalui pengujian di atas mesin chassis dynamometer. Berdasarkan pengujian, disimpulkan bahwa penambahan beban inersia tidak selalu berbanding lurus dengan peningkatan efisiensi pengereman regeneratif. Titik efisiensi maksimal sebesar 14,32% tercapai pada simulasi variasi setengah beban dengan pemulihan energi sebesar 4,44 Wh. Pada simulasi beban penuh, efisiensi menurun tajam menjadi 7,94% akibat dominasi sistem pengereman mekanis dalam meredam momentum kendaraan yang melampaui batas torsi elektris motor. Sistem kendaraan juga terbukti membatasi daya regeneratif konstan pada kisaran -1,23 kW untuk melindungi kesehatan baterai.

Ucapan Terimakasih

Secara khusus, penulis ingin menyampaikan rasa hormat dan terima kasih yang mendalam kepada Bapak Sriyono,] dan Bapak Ramdani, selaku dosen pembimbing. Di tengah kesibukan beliau berdua, Bapak Sriyono dan Bapak Ramdani senantiasa meluangkan waktu, tenaga, dan pikiran untuk membimbing, memberikan kritik teknis yang

membangun, serta memotivasi penulis. Arahan beliau berdua terutama saat menghadapi kendala teknis dalam pengujian dynamometer dan pengolahan data instrumen PW6001-16 sangatlah berperan penting dalam penyelesaian penelitian ini.

Reference

- Ar Akmaliah, N., & Purwadi, A. (2018). Efisiensi Energi Pada Sistem Regenerative Braking Motor BLDC Untuk Kendaraan Listrik Roda Dua. *Jurnal Elektronika Dan Telekomunikasi*, 18(2), 54-61.
- Arikunto, S. (2010). *Prosedur Penelitian Suatu Pendekatan Praktik*. Jakarta: Rineka Cipta.
- Bose, B. K. (2019). *Modern Power Electronics And AC Drives*. Prentice Hall.
- Cao, J., & Bing, Z. (2019). Intelligent Regenerative Braking Control For Electric Vehicles Based On Fuzzy Logic. *Journal Of Power Electronics*, 19(4), 987-995.
- Ehsani, M., Gao, Y., Longo, S., & Ebrahimi, K. (2018). *Modern Electric, Hybrid Electric, And Fuel Cell Vehicles*. CRC Press.
- Fathurrahman, A., & Widodo, P. (2021). Analisis Efisiensi Regenerative Braking Pada Prototipe Mobil Listrik. *Jurnal Teknik Otomotif*, 5(2), 45-52.
- Gaza, F. R., & Ramadhan, M. I. (2024). Evaluasi Penggunaan Power Analyzer Pada Pengujian Motor Listrik Sinkron Magnet Permanen. *Jurnal Listrik Dan Otomasi*, 9(1), 32-40.
- Heydari, S., Fajri, P., & Sabzehgar, R. (2020). Maximizing Regenerative Braking Energy Recovery Of Electric Vehicles Through Dynamic Low-Speed Cutoff Point Detection. *IEEE Transactions On Vehicular Technology*, 69(1), 264-274.
- Hidayat, T., & Nugroho, S. (2020). Simulasi Dan Analisis Pembebanan Inersia Pada Chassis Dynamometer Untuk Pengujian Traksi Mobil Listrik. *Jurnal Teknik Mesin*, 12(3), 112-119.
- Husain, I. (2021). *Electric And Hybrid Vehicles: Design Fundamentals*. CRC Press.
- Kurniawan, A. (2022). Optimasi Torsi Pengereman Regeneratif Motor BLDC Menggunakan Metode Kontrol Fuzzy Logic. *Jurnal Otomotif Dan Energi*, 6(2), 78-85.
- Larminie, J., & Lowry, J. (2012). *Electric Vehicle Technology Explained*. John Wiley & Sons.
- Nian, X., Peng, F., & Zhang, H. (2014). Regenerative Braking System Of Electric Vehicle Driven By Brushless DC Motor. *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, 61(10), 5798-5808.
- Nugroho, A., & Saputra, H. (2022). Studi Eksperimental Sistem Pengisian Balik Energi Listrik Pada Penggerak BLDC Motor. *Jurnal Energi Dan Manufaktur*, 15(1), 22-28.
- Pratama, R., & Budiman, A. (2023). Pengujian Karakteristik Motor BLDC Menggunakan Chassis Dynamometer Untuk Aplikasi Mobil Perkotaan. *Jurnal Teknik Mesin Indonesia*, 18(2), 104-111.
- Qiu, C., & Wang, G. (2016). New Control Strategy Of Regenerative Braking System For Electric Vehicles. *Automotive Engineering*, 38(7), 812-819.
- Setiawan, I. (2023). Performa Torsi Dan Daya Pengereman Motor BLDC Untuk Kendaraan Niaga Ringan. *Jurnal Inovasi Mesin Dan Kelistrikan*, 11(1), 12-20.
- Utomo, S. B., & Wibowo, T. (2021). Implementasi Perekam Sinyal Untuk Monitoring Daya Bus DC Pada Sistem Traksi Listrik. *Jurnal Teknologi Kelistrikan*, 12(2), 89-96.
- Wijaya, M. C., & Sukma, D. (2022). Analisis Pengaruh Kecepatan Dan Beban Inersia Terhadap Arus Pengisian Regenerative Braking. *Jurnal Arus Elektro*, 8(3), 145-151.
- Wong, J. Y. (2022). *Theory Of Ground Vehicles*. John Wiley & Sons.
- Xu, G., Xu, K., Zheng, C., & Zahid, T. (2011). Fully Regenerative Braking Strategy For Electric Vehicles. *Journal Of Zhejiang University Science A*, 12, 307-316.
- Yoong, M. K., Gan, Y. H., Gan, G. D., Leong, C. K., Phuan, Z. Y., Cheah, B. K., & Ho, J. H. (2010). Studies Of Regenerative Braking In Electric Vehicle. *IEEE International Conference On Sustainable Energy Technologies*, 1-6.
- Zainuri, M. A., & Handoko, S. (2024). Pengukuran Akurasi Perekaman Energi Listrik Pada Pengujian Motor Controller Traksi Mobil Listrik. *Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, 10(2), 99-106.
- Zhang, L., & Chen, X. (2020). Evaluation Of Regenerative Braking Energy Recovery For Electric Vehicles On A Chassis Dynamometer. *Energies*, 13(14), 3652.
- Zhu, F., & El-Refaie, A. M. (2019). Control Strategies For Brushless DC Motors In Automotive Regenerative Braking Applications. *IEEE Transactions On Industry Applications*, 55(5), 4812-4821.