

## **Analisis Efisiensi Sistem *Regenerative Braking* pada Bus Listrik BYD K9 di Rute Transjakarta 1E**

### ***Efficiency Analysis of Regenerative Braking System in BYD K9 Electric Bus on Transjakarta Route 1E***

Muhammad Farrel Apriliant Putra<sup>1\*</sup>, Buang Turasno<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Teknologi Rekayasa Otomotif, Politeknik Keselamatan Transportasi Jalan, Tegal, Indonesia

<sup>2</sup>Teknologi Otomotif, Politeknik Keselamatan Transportasi Jalan, Tegal, Indonesia

<sup>1</sup>21021025@taruna.pktj.ac.id, <sup>2</sup>beturasno@gmail.com,

#### **Abstrak**

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi efisiensi pemulihan daya pada sistem regenerative braking pada bus listrik BYD K9 yang beroperasi di rute Transjakarta 1E. Metode yang digunakan adalah eksperimen kuantitatif melalui observasi langsung pada dashboard bus. Data dikumpulkan dari tiga unit bus dengan karakteristik konsumsi daya tertinggi, terendah, dan rata-rata. Hasil analisis menunjukkan bahwa efisiensi pemulihan daya berkisar antara 36,62% hingga 50,27% tergantung pada kecepatan, gradien jalan, dan perilaku pengemudi. Temuan ini menegaskan kontribusi sistem regenerative braking terhadap penghematan energi dan perluasan jangkauan operasional kendaraan listrik.

Kata kunci: Bus Listrik; Regenerative Braking; Efisiensi Energi; BYD K9; Transjakarta

#### **Abstract**

*This study aims to evaluate the recovery efficiency of the regenerative braking system in BYD K9 electric buses operating on Transjakarta route 1E. The method used is a quantitative experimental approach through direct observation of the vehicle dashboard. Data were collected from three bus units representing the highest, lowest, and average energy consumption. The analysis reveals that energy recovery efficiency ranges from 36.62% to 50.27%, influenced by speed, road gradient, and driver behavior. These findings highlight the significant contribution of regenerative braking systems in reducing energy consumption and extending electric bus operational range.*

*Keywords: Electric Bus; Regenerative Braking; Energy Efficiency; BYD K9; Transjakarta*

#### **1. Pendahuluan**

Peningkatan kebutuhan akan transportasi perkotaan yang berkelanjutan telah mendorong pengembangan armada bus listrik sebagai solusi efisien dan ramah lingkungan. Kendaraan listrik dinilai mampu mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil, menurunkan emisi gas rumah kaca, dan meminimalkan kebisingan lalu lintas di kawasan padat penduduk [1], [2]. Di Indonesia, penerapan bus listrik didukung oleh kebijakan nasional, salah satunya melalui Peraturan Presiden Nomor 55 Tahun 2019 tentang percepatan program kendaraan bermotor listrik berbasis baterai untuk transportasi jalan.

Salah satu solusi untuk meningkatkan efisiensi energi pada kendaraan listrik adalah penerapan teknologi regenerative braking. Teknologi ini memungkinkan kendaraan mengubah energi kinetik yang biasanya hilang saat pengereman menjadi energi listrik yang dapat disimpan kembali ke dalam baterai [3], [4]. Efisiensi sistem regenerative braking dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti kecepatan kendaraan, gradien jalan, kapasitas beban, dan perilaku pengemudi [5], [6]. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa optimalisasi pemanfaatan energi regeneratif dapat meningkatkan jangkauan operasional dan menurunkan konsumsi energi total pada kendaraan listrik [7].

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis efisiensi pemulihan daya pada sistem regenerative braking bus listrik BYD K9 yang beroperasi di rute Transjakarta 1E. Analisis difokuskan pada tiga unit bus dengan karakteristik berbeda, yaitu MYS-23369 (efisiensi tertinggi), MYS-23370 (terendah), dan MYS-22353 (rata-rata). Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap optimalisasi pengelolaan energi dan perawatan kendaraan listrik berbasis data riil operasi harian.

#### **2. Metode**

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif eksperimental dengan pengumpulan data secara observasional terhadap operasional tiga unit bus listrik BYD K9 di rute Transjakarta 1E (Pondok Labu – Blok M). Data diambil langsung dari dashboard kendaraan dan mencakup daya konsumsi, daya hasil regenerative braking, waktu tempuh, kecepatan, dan gradien jalan dengan merekam tampilan dashboard kendaraan yang terdiri dari daya(kW) dan kecepatan (km/h). Data dikumpulkan melalui tabel 1.



Gambar 1 Tampilan *Dashboard* Bus



Gambar 2 Pengambilan Data

Tabel 1 Formulir Pengumpulan Data

| Detik (s) | Daya (kW) |         | Kecepatan (Km/h) | Kemiringan Jalan |
|-----------|-----------|---------|------------------|------------------|
|           | Positif   | Negatif |                  |                  |
| 1         |           |         |                  |                  |
| 2         |           |         |                  |                  |
| 3         |           |         |                  |                  |
| Dst.      |           |         |                  |                  |

Unit bus yang dianalisis dipilih berdasarkan representasi dari efisiensi tertinggi (MYS-23369), efisiensi terendah (MYS-23370), dan efisiensi rata-rata (MYS-22353). Data yang dikumpulkan meliputi satu siklus ritase dari setiap unit. Analisis dilakukan dengan menghitung efisiensi pemulihan daya menggunakan persentase perbandingan antara daya yang dipulihkan dengan total konsumsi daya dengan rumus sebagai berikut :

$$\text{Persentase Konsumsi Daya (\%)} = \frac{\text{Total Penggunaan Daya}}{\text{Daya Baterai}} \times 100 \% \quad (1)$$

$$\text{Efisiensi (\%)} = \frac{\text{Daya Hasil Regenerative Braking}}{\text{Total Konsumsi Daya}} \times 100 \quad (2)$$

Selanjutnya hasil perhitungan selanjutnya dilakukan visualisasi grafik daya dan kecepatan serta pembahasan berdasarkan perbedaan karakteristik pengoperasian masing-masing unit.

### 3. Hasil dan Pembahasan

#### 3.1 Konsumsi Daya dan Daya Regeneratif

Tabel 2 Konsumsi Daya Bus Segmen Halte BPJS Kesehatan Sultan Hasanudin - Taman Martha Tiahahu

| MYS-23369 |                 |         | MYS-22353 |                 |         | MYS-23370 |                 |         |
|-----------|-----------------|---------|-----------|-----------------|---------|-----------|-----------------|---------|
| Daya (Kw) | Kecepatan (Kmh) | GKJ (%) | Daya (Kw) | Kecepatan (Kmh) | GKJ (%) | Daya (Kw) | Kecepatan (Kmh) | GKJ (%) |
| 77        | 7               | 4,0     | 68        | 5               | 4,0     | 78        | 8               | 4,0     |
| 74        | 9               | 4,0     | 76        | 8               | 4,0     | 58        | 9               | 3,9     |

| MYS-23369 |                 |         | MYS-22353 |                 |         | MYS-23370 |                 |         |
|-----------|-----------------|---------|-----------|-----------------|---------|-----------|-----------------|---------|
| Daya (Kw) | Kecepatan (Kmh) | GKJ (%) | Daya (Kw) | Kecepatan (Kmh) | GKJ (%) | Daya (Kw) | Kecepatan (Kmh) | GKJ (%) |
| 72        | 8               | 4,0     | 58        | 8               | 3,9     | 99        | 24              | 3,8     |
| 55        | 8               | 3,9     | 89        | 16              | 3,9     | 130       | 36              | 3,7     |
| 90        | 14              | 3,9     | 112       | 18              | 3,9     | 119       | 37              | 3,7     |
| 94        | 17              | 3,9     | 97        | 24              | 3,8     | 114       | 38              | 3,7     |
| 116       | 16              | 3,9     | 135       | 28              | 3,8     | 134       | 44              | 3,6     |
| 108       | 16              | 3,9     | 134       | 32              | 3,8     | 34        | 45              | 3,6     |
| 95        | 22              | 3,8     | 132       | 35              | 3,7     | 36        | 45              | 3,6     |
| 97        | 25              | 3,8     | 116       | 38              | 3,7     | 28        | 43              | 3,6     |
| 139       | 33              | 3,8     | 126       | 41              | 3,7     | -37       | 43              | 3,6     |
| 121       | 37              | 3,7     | 132       | 44              | 3,6     | -33       | 43              | 3,6     |
| 112       | 40              | 3,7     | 32        | 44              | 3,6     | -69       | 42              | 3,5     |
| 116       | 40              | 3,7     | -38       | 42              | 3,6     | -80       | 37              | 3,5     |
| 127       | 45              | 3,7     | -71       | 40              | 3,5     | -80       | 33              | 3,5     |
| 125       | 42              | 3,7     | -131      | 37              | 3,5     | -80       | 37              | 3,4     |
| 129       | 42              | 3,7     | -105      | 34              | 3,4     | -80       | 24              | 3,4     |
| 125       | 42              | 3,7     | -90       | 30              | 3,4     | -80       | 28              | 3,4     |
| 131       | 41              | 3,6     | -87       | 28              | 3,4     | -80       | 28              | 3,4     |
| -36       | 42              | 3,6     | -48       | 20              | 3,3     | -47       | 20              | 3,3     |
| -71       | 41              | 3,5     | -31       | 18              | 3,3     | -47       | 20              | 3,3     |
| -80       | 39              | 3,5     | 2         | 9               | 3,3     | 3         | 9               | 3,2     |
| -80       | 35              | 3,5     | 6         | 9               | 3,2     | 8         | 9               | 3,2     |
| -80       | 39              | 3,4     | 6         | 9               | 3,2     | 4         | 8               | 3,2     |
| -80       | 29              | 3,4     | 24        | 9               | 3,2     | 9         | 7               | 3,2     |
| -80       | 30              | 3,4     | 100       | 12              | 3,1     | 141       | 20              | 3,1     |
| -49       | 21              | 3,3     | 145       | 18              | 3,1     | 124       | 38              | 2,9     |
| 4         | 6               | 3,3     | 105       | 23              | 3,1     | 128       | 36              | 2,9     |
| 3         | 10              | 3,3     | 130       | 27              | 3,0     | 131       | 32              | 2,9     |
| 1         | 11              | 3,3     | 129       | 30              | 3,0     | 132       | 45              | 2,8     |
| 26        | 10              | 3,2     | 129       | 34              | 3,0     | 89        | 47              | 2,8     |
| 144       | 16              | 3,1     | 127       | 37              | 2,9     | -13       | 43              | 2,7     |
| 103       | 23              | 3,1     | 128       | 33              | 2,9     | -80       | 41              | 2,7     |
| 132       | 28              | 3,0     | 128       | 42              | 2,8     | -80       | 42              | 2,7     |
| 129       | 30              | 3,0     | 129       | 45              | 2,8     | -80       | 26              | 2,6     |
| 135       | 30              | 3,0     | 89        | 47              | 2,8     | -30       | 21              | 2,6     |
| 127       | 33              | 3,0     | -11       | 45              | 2,7     | 6         | 12              | 2,5     |
| 128       | 30              | 2,9     | -111      | 42              | 2,7     | 4         | 8               | 2,5     |
| 127       | 44              | 2,8     | -160      | 35              | 2,7     | 6         | 10              | 2,5     |
| 129       | 44              | 2,8     | -116      | 26              | 2,6     | 9         | 11              | 2,4     |
| 91        | 46              | 2,8     | -32       | 20              | 2,6     | 104       | 11              | 2,3     |
| -80       | 34              | 2,7     | 0         | 16              | 2,6     | 104       | 26              | 2,2     |
| -80       | 35              | 2,7     | 10        | 13              | 2,5     | 101       | 25              | 2,2     |
| 12        | 10              | 2,5     | 12        | 12              | 2,5     | 17        | 28              | 2,2     |
| 10        | 10              | 2,4     | 6         | 11              | 2,5     | 20        | 31              | 2,2     |
| 6         | 13              | 2,4     | 9         | 11              | 2,4     | 18        | 30              | 2,2     |

| MYS-23369 |                 |         | MYS-22353 |                 |         | MYS-23370 |                 |         |
|-----------|-----------------|---------|-----------|-----------------|---------|-----------|-----------------|---------|
| Daya (Kw) | Kecepatan (Kmh) | GKJ (%) | Daya (Kw) | Kecepatan (Kmh) | GKJ (%) | Daya (Kw) | Kecepatan (Kmh) | GKJ (%) |
| 8         | 10              | 2,4     | 33        | 11              | 2,4     | 110       | 32              | 2,1     |
| 103       | 25              | 2,2     | 102       | 13              | 2,4     | -21       | 33              | 2,1     |
| 106       | 26              | 2,2     | 104       | 13              | 2,3     | -19       | 31              | 2,1     |
| 69        | 28              | 2,2     | 121       | 22              | 2,3     | -20       | 33              | 2,0     |
| 71        | 29              | 2,2     | 103       | 26              | 2,2     | -34       | 29              | 2,0     |
| 69        | 30              | 2,2     | 71        | 29              | 2,2     | -34       | 28              | 2,0     |
| 70        | 31              | 2,2     | 18        | 30              | 2,2     | -63       | 28              | 2,0     |
| 106       | 29              | 2,1     | 108       | 31              | 2,1     | -43       | 22              | 1,9     |
| 109       | 29              | 2,1     | 70        | 34              | 2,1     | -44       | 22              | 1,9     |
| 67        | 35              | 2,1     | -20       | 33              | 2,1     | -51       | 20              | 1,9     |
| -21       | 33              | 2,1     | -19       | 31              | 2,0     | -51       | 18              | 1,9     |
| -50       | 20              | 1,9     | -32       | 29              | 2,0     | -21       | 16              | 1,8     |
| -20       | 14              | 1,8     | -64       | 28              | 2,0     | -5        | 15              | 1,8     |
| -19       | 18              | 1,8     | -60       | 35              | 1,9     | -13       | 13              | 1,7     |
| -4        | 14              | 1,8     | -44       | 22              | 1,9     | -11       | 14              | 1,7     |
| -11       | 15              | 1,7     | -50       | 20              | 1,9     | 0         | 10              | 1,7     |
| -18       | 10              | 1,7     | -20       | 17              | 1,8     | 4         | 5               | 1,7     |
| 6         | 7               | 1,7     | -6        | 15              | 1,8     | -1        | 6               | 1,6     |
| 0         | 7               | 1,7     | -13       | 13              | 1,7     | 16        | 5               | 1,6     |
| 25        | 10              | 1,5     | -16       | 11              | 1,7     | 15        | 7               | 1,6     |
| 47        | 8               | 1,5     | 1         | 8               | 1,7     | 23        | 7               | 1,5     |
| 83        | 12              | 1,4     | 3         | 7               | 1,6     | 45        | 11              | 1,5     |
| 109       | 26              | 1,3     | 14        | 6               | 1,6     | 86        | 15              | 1,4     |
| 112       | 24              | 1,3     | 14        | 7               | 1,6     | 94        | 15              | 1,4     |
| 112       | 23              | 1,3     | 22        | 8               | 1,5     | 102       | 28              | 1,3     |
| 100       | 28              | 1,3     | 28        | 9               | 1,5     | 100       | 27              | 1,3     |
| 130       | 34              | 1,2     | 46        | 10              | 1,5     | 100       | 30              | 1,3     |
| 130       | 34              | 1,2     | 80        | 12              | 1,4     | 132       | 34              | 1,2     |
| 56        | 34              | 1,1     | 92        | 16              | 1,4     | 129       | 36              | 1,2     |
| 59        | 37              | 1,1     | 109       | 20              | 1,4     | 57        | 36              | 1,1     |
| -20       | 31              | 1,1     | 110       | 24              | 1,3     | -20       | 35              | 1,1     |
| -21       | 30              | 1,0     | 101       | 27              | 1,3     | -21       | 34              | 1,1     |
| -22       | 29              | 1,0     | 100       | 29              | 1,3     | -19       | 32              | 1,1     |
| -23       | 26              | 1,0     | 128       | 32              | 1,2     | -17       | 32              | 1,0     |
| -21       | 25              | 0,9     | 129       | 34              | 1,2     | -18       | 30              | 1,0     |
| -20       | 26              | 0,9     | 58        | 36              | 1,1     | -22       | 30              | 1,0     |
| -9        | 20              | 0,9     | -21       | 35              | 1,1     | -20       | 29              | 1,0     |
| 7         | 16              | 0,8     | -20       | 34              | 1,1     | -19       | 30              | 1,0     |
| 20        | 19              | 0,7     | -18       | 31              | 1,0     | -23       | 30              | 1,0     |
| 21        | 22              | 0,7     | -21       | 29              | 1,0     | -24       | 26              | 1,0     |
| 44        | 27              | 0,7     | -25       | 27              | 1,0     | -28       | 25              | 1,0     |
| 45        | 28              | 0,7     | -21       | 26              | 0,9     | -20       | 26              | 0,9     |
| 45        | 30              | 0,7     | -22       | 22              | 0,9     | -20       | 23              | 0,9     |
| 74        | 29              | 0,6     | -9        | 20              | 0,9     | 21        | 19              | 0,8     |

| MYS-23369 |                 |         | MYS-22353 |                 |         | MYS-23370 |                 |         |
|-----------|-----------------|---------|-----------|-----------------|---------|-----------|-----------------|---------|
| Daya (Kw) | Kecepatan (Kmh) | GKJ (%) | Daya (Kw) | Kecepatan (Kmh) | GKJ (%) | Daya (Kw) | Kecepatan (Kmh) | GKJ (%) |
| 95        | 36              | 0,6     | 24        | 17              | 0,8     | 79        | 21              | 0,8     |
| 14        | 33              | 0,5     | 8         | 18              | 0,8     | 37        | 22              | 0,7     |
| -18       | 31              | 0,5     | 77        | 19              | 0,8     | 46        | 28              | 0,7     |
| 7         | 27              | 0,5     | 42        | 21              | 0,7     | 44        | 29              | 0,7     |
| 37        | 28              | 0,4     | 19        | 21              | 0,7     | 95        | 33              | 0,6     |
| -23       | 22              | 0,4     | 45        | 28              | 0,7     | -21       | 33              | 0,5     |
| -22       | 21              | 0,4     | 72        | 30              | 0,6     | 6         | 29              | 0,5     |
| -10       | 20              | 0,4     | 93        | 34              | 0,6     | -18       | 25              | 0,4     |
| -7        | 19              | 0,4     | 9         | 33              | 0,5     | -19       | 21              | 0,4     |
| -12       | 17              | 0,3     | -18       | 30              | 0,5     | -10       | 22              | 0,4     |
| -24       | 16              | 0,3     | 9         | 28              | 0,5     | -8        | 20              | 0,4     |
| 3         | 11              | 0,2     | 38        | 29              | 0,4     | -12       | 19              | 0,3     |
| 7         | 12              | 0,2     | -19       | 22              | 0,4     | -9        | 17              | 0,3     |
| 8         | 10              | 0,2     | -9        | 20              | 0,4     | -23       | 16              | 0,3     |
| 5         | 10              | 0,2     | -11       | 18              | 0,3     | 5         | 14              | 0,2     |
| 4         | 9               | 0,2     | -23       | 15              | 0,3     | 30        | 12              | 0,1     |
| 4         | 9               | 0,2     | 2         | 13              | 0,3     | 28        | 10              | 0,1     |
| 7         | 10              | 0,2     | 5         | 11              | 0,2     | 122       | 16              | -0,1    |
| 5         | 9               | 0,2     | 0         | 9               | 0,2     | 121       | 19              | -0,1    |
| 9         | 9               | 0,2     | 6         | 9               | 0,2     | 121       | 20              | -0,1    |
| 7         | 7               | 0,1     | 9         | 9               | 0,1     | 118       | 20              | -0,1    |
| 10        | 8               | 0,1     | 23        | 10              | 0,1     | -57       | 21              | -0,2    |
| 16        | 11              | 0,1     | 27        | 11              | 0,1     | -56       | 17              | -0,2    |
| 24        | 10              | 0,1     | 26        | 11              | 0,0     | -51       | 17              | -0,2    |
| 26        | 11              | 0,1     | 75        | 13              | 0,0     | -47       | 16              | -0,2    |
| 26        | 9               | 0,1     | 121       | 16              | -0,1    | -31       | 14              | -0,2    |
| 25        | 12              | 0,0     | 120       | 20              | -0,1    | 8         | 0               | -0,3    |
| 75        | 13              | 0,0     | 20        | 21              | -0,1    | 4         | 2               | -0,3    |
| 77        | 13              | 0,0     | -55       | 19              | -0,2    |           |                 |         |
| 117       | 20              | -0,1    | -49       | 16              | -0,2    |           |                 |         |
| 122       | 18              | -0,1    | -30       | 15              | -0,2    |           |                 |         |
| 120       | 19              | -0,1    | 5         | 2               | -0,3    |           |                 |         |
| 119       | 23              | -0,1    |           |                 |         |           |                 |         |
| 24        | 22              | -0,1    |           |                 |         |           |                 |         |
| -29       | 17              | -0,2    |           |                 |         |           |                 |         |
| -31       | 12              | -0,2    |           |                 |         |           |                 |         |
| 6         | 2               | -0,3    |           |                 |         |           |                 |         |

Keterangan: GKJ= Gradien Kemiringan Jalan

Dari 12 data bus, rata-rata konsumsi daya paling tinggi terjadi pada segmen halte BPJS Kesehatan Sultan Hasanudin – Taman Martha Tiahahu yang disajikan pada tabel 2. Pada segmen tersebut diperoleh hasil untuk konsumsi daya tertinggi yaitu Bus MYS-23369, konsumsi daya terendah bus MYS-23370, dan konsumsi yang mendekati nilai tengah bus MYS-22353. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa total konsumsi daya baterai pada ketiga unit bus bervariasi, mencerminkan perbedaan kondisi operasional dan karakteristik pengemudi. Pada unit MYS-23369, konsumsi daya tercatat sebesar 1,42 kWh dengan daya yang berhasil dipulihkan melalui sistem regenerative braking sebesar 0,32 kWh. Sementara itu, unit MYS-23370 mencatat konsumsi daya 0,57 kWh dan pemulihan daya sebesar 0,5 kWh. Unit MYS-22353 sebagai representasi rata-rata menunjukkan konsumsi

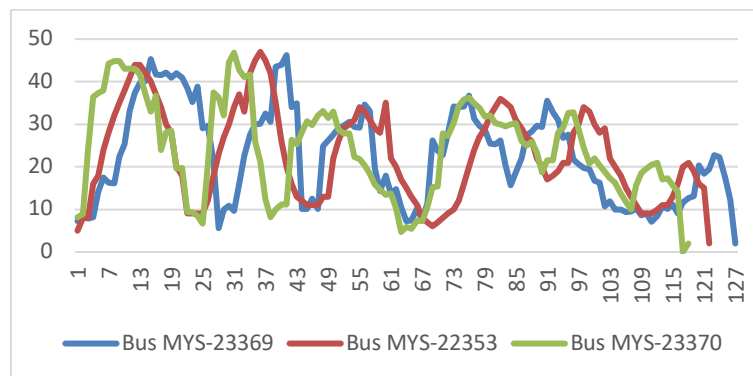
daya sebesar 1 kWh dengan pemulihan daya sebesar 0,48 kWh. Setelah itu dilakukan perhitungan persentase konsumsi daya dan hasil daya regeneratif dengan rumus 1 sebagai berikut :

|                                                                                                                                                                    |                                                                                                                                            |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>1. Bus MYS-23369</p> $\text{Persen (\%)} = \frac{\text{Total Penggunaan Daya}}{\text{Daya Baterai}} \times 100 \%$ $= \frac{1,42}{324} \times 100 \% = 0,43 \%$ | $\text{Persen (\%)} = \frac{\text{Total Penggunaan Daya}}{\text{Daya Baterai}} \times 100 \%$ $= \frac{0,32}{324} \times 100 \% = 0,09 \%$ |
| <p>2. Bus MYS-23370</p> $\text{Persen (\%)} = \frac{\text{Total Penggunaan Daya}}{\text{Daya Baterai}} \times 100 \%$ $= \frac{0,57}{324} \times 100 \% = 0,17 \%$ | $\text{Persen (\%)} = \frac{\text{Total Penggunaan Daya}}{\text{Daya Baterai}} \times 100 \%$ $= \frac{0,5}{324} \times 100 \% = 0,15 \%$  |
| <p>3. Bus MYS-22353</p> $\text{Persen (\%)} = \frac{\text{Total Penggunaan Daya}}{\text{Daya Baterai}} \times 100 \%$ $= \frac{0,30}{324} \times 100 \% = 0,09 \%$ | $\text{Persen (\%)} = \frac{\text{Total Penggunaan Daya}}{\text{Daya Baterai}} \times 100 \%$ $= \frac{0,48}{324} \times 100 \% = 0,14 \%$ |

Setelah itu dilakukan perhitungan efisiensi sistem *regenerative braking* menggunakan rumus 2 dan diperoleh hasil efisiensi berkisar antara 36,62% hingga 50,27% untuk semua unit bus pada semua segmen, dengan MYS-23369 menunjukkan efisiensi tertinggi dan MYS-23370 terendah. Nilai efisiensi ini sejalan dengan penelitian sebelumnya pada bus listrik dan kendaraan listrik lain, yang menempatkan sistem *regenerative braking* sebagai kontributor signifikan dalam penghematan energi.

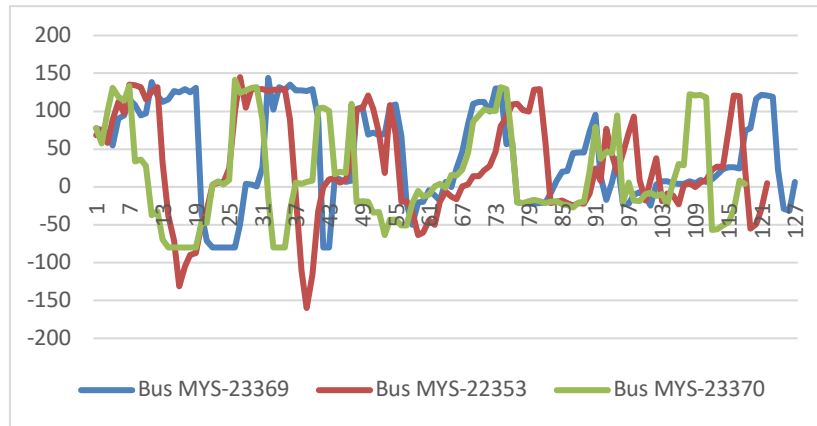
### 3.2 Faktor yang Mempengaruhi Efisiensi *Regenerative Braking*

Untuk mengidentifikasi faktor yang memengaruhi efisiensi *regenerative braking*, dilakukan analisis terhadap grafik konsumsi daya, daya hasil *regenerative braking*, kecepatan rata-rata, dan gradien kemiringan jalan.



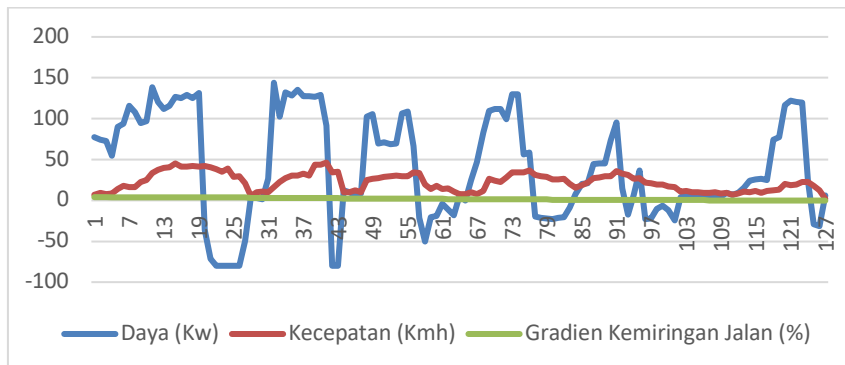
Gambar 3 Grafik Kecepatan Bus

Bus MYS-23369 menunjukkan performa tercepat dengan akselerasi 0-40 km/jam dalam 8-10 detik dan mencapai kecepatan maksimal 47 km/jam pada detik ke-12. Pengemudi memperlihatkan gaya mengemudi yang sangat agresif dengan akselerasi tajam dan pengereman mendadak, yang berpotensi meningkatkan konsumsi energi dan mengurangi kenyamanan penumpang. Bus MYS-22353 membutuhkan waktu 10-12 detik untuk mencapai 40 km/jam dengan kecepatan maksimal 47 km/jam pada detik ke-16. Karakteristik mengemudi lebih terkontrol namun masih agresif, dengan beberapa penyesuaian kecepatan yang menunjukkan kesadaran operasional yang lebih baik. Bus MYS-23370 menampilkan performa paling bervariasi dengan akselerasi 0-40 km/jam dalam 12-14 detik dan mencapai puncak kecepatan pada detik ke-29. Pola kecepatan sangat fluktuatif dengan banyak variasi, mengindikasikan teknik mengemudi yang tidak konsisten dan berpotensi menyebabkan pemborosan energi serta ketidaknyamanan penumpang. Hasil analisis menunjukkan bahwa MYS-22353 memiliki keseimbangan terbaik antara performa dan efisiensi, sementara MYS-23370 memerlukan pelatihan tambahan untuk meningkatkan konsistensi mengemudi.



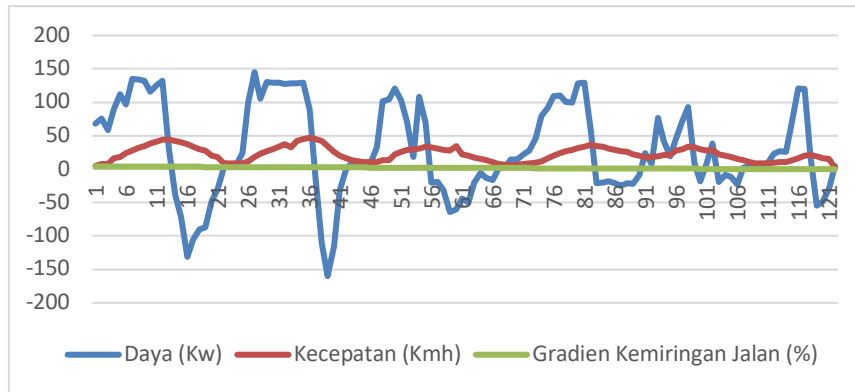
Gambar 4 Grafik Penggunaan Daya

Bus MYS-23369 menunjukkan pola konsumsi daya yang paling efisien dengan siklus akselerasi-deselerasi yang teratur. Konsumsi daya maksimal mencapai 140 kW dengan regenerative braking hingga -100 kW. Pola ini mencerminkan gaya mengemudi yang konsisten dan pemahaman yang baik terhadap karakteristik kendaraan listrik. Bus MYS-22353 memperlihatkan karakteristik yang ekstrem dengan konsumsi daya puncak 140 kW dan regenerative braking tertinggi mencapai -150 kW. Meskipun sistem regenerasi sangat efektif, pola mengemudi yang sangat agresif dapat mengurangi efisiensi keseluruhan karena fluktuasi daya yang tajam. Bus MYS-23370 menampilkan pola paling tidak efisien dengan fluktuasi konsumsi daya yang tinggi dan tidak beraturan. Konsumsi maksimal 130 kW dengan regenerative braking hingga -100 kW, namun variabilitas yang ekstrem mengindikasikan kurangnya konsistensi mengemudi yang berpotensi menyebabkan pemborosan energi. Analisis menunjukkan bahwa sistem regenerative braking dapat memulihkan energi hingga 150 kW, namun efisiensi keseluruhan sangat dipengaruhi oleh gaya mengemudi. Konsistensi dalam mengemudi (MYS-23369) terbukti lebih efisien dibandingkan gaya agresif (MYS-22353) atau tidak konsisten (MYS-23370).



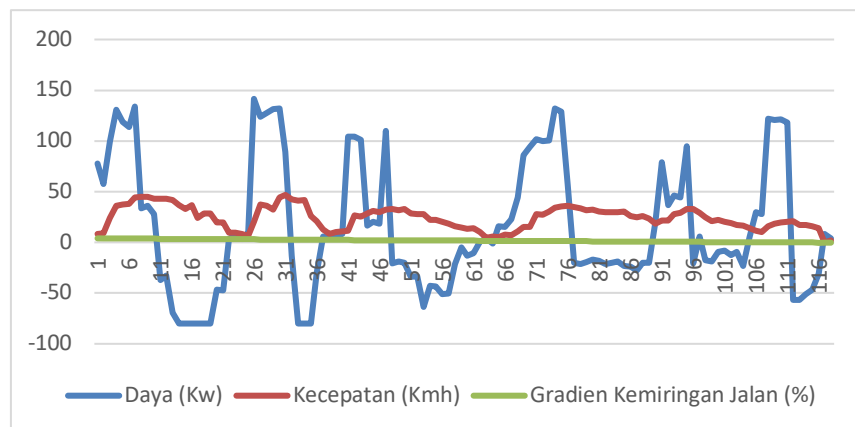
Gambar 5 Konsumsi Daya Bus MYS-23369

Saat fase awal kendaraan berakselerasi dari 0 hingga 45 km/jam dengan konsumsi daya mencapai puncak 140 kW pada detik ke-12, menunjukkan akselerasi agresif namun terkontrol pada kondisi jalan relatif datar. Pada detik 17-26: Terjadi pengereman regeneratif yang signifikan dengan pemulihan energi hingga -80 kW, kecepatan turun dari 45 km/jam menjadi 5 km/jam. Kondisi ini disebabkan pengereman aktif pengemudi, bukan faktor topografi jalan. Pada detik 29-41 pola akselerasi agresif kembali mencapai 140 kW diikuti regenerative braking kedua yang lebih kuat (-100 kW), menunjukkan gaya mengemudi yang sangat dinamis dengan siklus intens. Pada detik 90-125 konsumsi daya relatif stabil dengan kecepatan konsisten, mengindikasikan adaptasi pengemudi menuju gaya mengemudi yang lebih efisien. Gradien jalan yang stabil (-0,3% hingga 4%) menunjukkan bahwa regenerative braking dominan disebabkan gaya mengemudi, bukan topografi. Sistem regeneratif bekerja sangat efektif dengan pemulihan energi maksimal -100 kW. Analisis menunjukkan karakteristik mengemudi yang awalnya agresif namun mengalami adaptasi menuju pola yang lebih efisien, dengan sistem regenerative braking yang optimal dalam memanfaatkan energi kinetik untuk pemulihan energi.



Gambar 6 Grafik Konsumsi Daya Bus MYS-23353

Pada detik 0-13 kendaraan berakselerasi dari 0 hingga 45 km/jam dengan konsumsi daya mencapai 140 kW, menunjukkan akselerasi agresif pada kondisi jalan yang relatif stabil. Pada detik 16-25 Terjadi pengereman regeneratif yang sangat agresif dengan pemulihan energi hingga -125 kW, kecepatan turun drastis dari 45 km/jam ke hampir 0 km/jam. Kondisi ini disebabkan pengereman keras pengemudi, bukan faktor topografi. Pada detik 26-45 Akselerasi ekstrem mencapai 145 kW diikuti regenerative braking terkuat dalam perjalanan (-165 kW), menunjukkan gaya mengemudi yang sangat agresif dengan siklus yang intens. Pada detik 46-80 Fluktuasi lebih moderat dengan konsumsi 50-120 kW dan regenerative braking ringan hingga sedang (-25 hingga -75 kW), kecepatan relatif stabil di 20-40 km/jam. Pada detik 80-125 Pola masih dinamis dengan akselerasi sedang (80-120 kW) dan regenerative braking terkontrol (-50 hingga -75 kW), kecepatan bervariasi 10-35 km/jam mengindikasikan kondisi urban dengan frequent stops. Gradien jalan stabil (-0,3% hingga 4%) menunjukkan regenerative braking agresif disebabkan gaya mengemudi. Sistem regeneratif mencapai performa maksimal -165 kW, namun dengan trade-off berupa ketidaknyamanan penumpang dan potensi stress komponen. Analisis menunjukkan karakteristik mengemudi yang sangat agresif dengan kurangnya smooth driving technique yang optimal untuk kendaraan listrik.



Gambar 7 Grafik Konsumsi Daya Bus MYS-23370

Pada detik 0-6 kendaraan berakselerasi dari 0 hingga 45 km/jam dengan konsumsi daya mencapai 130 kW pada detik ke-5, menunjukkan akselerasi tidak stabil dengan pengemudi melakukan penyesuaian pedal gas berulang pada kondisi jalan relatif datar. Pada detik 16-25 terjadi pengereman regeneratif mencapai -85 kW dengan kecepatan turun dari 45 km/jam ke hampir 0 km/jam, diikuti recovery cepat kembali ke 15 km/jam mengindikasikan pengereman tidak total atau akselerasi segera setelah pengereman. Pada detik 26-37 akselerasi mencapai 140 kW diikuti regenerative braking kedua (-85 kW), kemudian fluktuasi tidak beraturan dengan konsumsi 50-110 kW dan regenerasi ringan -50 kW, menunjukkan gaya mengemudi tidak konsisten dengan frequent adjustments. Pada detik 46-75 periode paling menonjol dengan fluktuasi sangat tinggi dan tidak beraturan, konsumsi daya bervariasi dari -75 kW hingga +50 kW dengan frekuensi perubahan sangat tinggi, kecepatan bervariasi 0-35 km/jam dengan pola tidak terprediksi. Pada detik 76-125 sedikit stabilisasi namun masih fluktuatif dengan akselerasi sedang (80-130 kW) dan regenerative braking terkontrol (-25 hingga -75 kW), kecepatan bervariasi 5-30 km/jam mengindikasikan kondisi stop-and-go frequent namun tidak teratur. Gradien jalan stabil (-0,3% hingga 4%) menunjukkan variabilitas konsumsi daya lebih disebabkan gaya mengemudi daripada kondisi jalan. Sistem regeneratif mencapai pemulihan energi -85 kW namun dengan pemanfaatan tidak optimal karena frekuensi dan durasi regenerasi tidak konsisten. Analisis menunjukkan karakteristik mengemudi yang sangat tidak konsisten dengan kurangnya pengalaman atau fokus dalam mengoperasikan kendaraan listrik, berpotensi mengurangi efisiensi energi dan mempercepat keausan komponen. Berdasarkan analisis penggunaan daya baterai bus listrik, terdapat lima faktor utama yang mempengaruhi efisiensi konsumsi daya:

1. Perilaku Pengemudi Faktor paling signifikan dalam konsumsi baterai bus listrik. Analisis menunjukkan perbedaan karakteristik mencolok: Bus MYS-23369 dengan pola mengemudi konsisten mencapai regenerative braking -100 kW,

- Bus MYS-22353 dengan gaya agresif mencapai regenerative braking ekstrem -165 kW namun dengan fluktuasi tajam, dan Bus MYS-23370 dengan pola tidak konsisten yang mengindikasikan kurangnya smooth driving technique optimal.
2. Kondisi Jalan (Gradien Kemiringan) Gradien jalan berpengaruh pada gaya dorong dan hambatan kendaraan. Analisis menunjukkan gradien bervariasi antara 4% hingga -0,3% (sekitar 2,46 derajat). Namun, faktor gradien bukan penentu utama pola regenerative braking karena nilai regenerasi tinggi lebih berkorelasi dengan gaya mengemudi daripada topografi. Penelitian menunjukkan kemiringan gradien berpengaruh signifikan pada angka 6% ke atas.
  3. Pola Operasional Bus Setiap bus menunjukkan pola berbeda: MYS-23369 dengan siklus akselerasi-pengereman teratur (125 detik), MYS-22353 dengan pola stop-and-go intens dan siklus ekstrem awal perjalanan, dan MYS-23370 dengan pola paling tidak beraturan. Efisiensi energi bergantung pada konsistensi pola operasional dan optimalisasi fase deselerasi.
  4. Konsistensi Gaya Mengemudi Faktor pembeda utama efisiensi konsumsi daya. Bus MYS-23369 dengan gaya konsisten menunjukkan efisiensi lebih baik dibandingkan MYS-23370 yang berfluktuasi tinggi. Akselerasi dan deselerasi tidak perlu menyebabkan pemborosan energi dan mengurangi efektivitas regenerative braking.
  5. AC dan Sistem Auxiliary Sistem AC memerlukan daya besar untuk mempertahankan suhu kabin 23°C. Memberikan baseline consumption yang terlihat sebagai konsumsi daya dasar saat idle atau kecepatan rendah, berkisar 9-30 kW pada ketiga bus yang dianalisis.

#### 4. Simpulan

Berdasarkan analisis penggunaan daya baterai bus listrik dan sistem regenerative braking, penelitian ini menunjukkan variasi signifikan dalam konsumsi energi dan efisiensi pemulihan daya antar unit bus. Konsumsi daya tertinggi tercatat pada bus MYS-23377 sebesar 10,52% dari kapasitas baterai, sementara konsumsi terendah pada bus MYS-22354 sebesar 8,43%. Perbedaan ini mengindikasikan pengaruh faktor operasional seperti durasi perjalanan, kondisi jalan, dan perilaku pengemudi terhadap efisiensi energi. Dari segi pemulihan energi, sistem regenerative braking menunjukkan kontribusi rata-rata 3% dari total kebutuhan energi. Bus MYS-22337 mencatat kontribusi tertinggi (3,59%), sedangkan MYS-22354 terendah (2,60%). Efisiensi pemulihan daya menunjukkan performa yang sangat baik dengan kisaran 36,62% hingga 50,27%, dimana bus MYS-22370 mencapai efisiensi tertinggi (50,27%). Analisis per segmen menunjukkan bahwa segmen BPJS Kesehatan Sultan Hasanudin – Taman Martha Tiahahu menghasilkan pemulihan daya tertinggi sebesar 2.099 kW detik (0,58 kWh), disebabkan oleh kecepatan awal yang tinggi sebelum pengereman dan kondisi lalu lintas yang lancar. Kondisi ini sesuai dengan teori bahwa efisiensi regenerative braking meningkat pada kecepatan tinggi. Secara statistik, hasil uji menunjukkan tidak terdapat perbedaan signifikan dalam konsumsi daya antar armada bus listrik ( $p\text{-value} > 0,05$ ), yang mengindikasikan konsistensi performa operasional pada rute yang sama. Temuan ini mendukung standarisasi operasional dan pemeliharaan armada bus listrik. Disarankan agar PT Transportasi Jakarta mengembangkan standar operasional yang memaksimalkan efektivitas regenerative braking, termasuk pelatihan operator mengenai teknik berkendara yang mendukung efisiensi energi. Penelitian ini memiliki keterbatasan pada rute non-BRT dan terbatas pada satu merek bus. Studi lanjutan disarankan untuk mencakup rute BRT dan perbandingan dengan merek bus listrik lainnya seperti SAG dan Skywell untuk analisis yang lebih komprehensif.

#### Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada PT Transportasi Jakarta, khususnya Departemen Pengawasan Sarana, serta dosen pembimbing atas dukungan dan bimbingannya.

#### Kontribusi

Konseptor: Muhammad Farrel Apriliant Putra, Buang Turasno; Kajian Pustaka: Buang Turasno; Metodologi: Buang Turasno, Muhammad Farrel Apriliant Putra; Pengumpulan Data: Muhammad Farrel Apriliant Putra; Pengolahan dan Interpretasi Data: Buang Turasno, Muhammad Farrel Apriliant Putra; Pelaporan: Muhammad Farrel Apriliant Putra; Pembahasan dan Simpulan: Seluruh Author.

#### Referensi

- [1] Zhang, R. and Yao, E., "Electric Vehicles Energy Consumption Estimation With Real Driving Condition Data," *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 41, pp. 177–187, 2015.
- [2] Malode, S. K., Adware, R. H., Student, M. T. P. E. D., Engineering, E., and Engineering, E., "Regenerative Braking System In Electric Vehicles," pp. 254–260, 2016.
- [3] BYD, B., *Panduan Perawatan Kendaraan*, Jakarta: PT. Build Your Dreams, 2021.
- [4] Guarango, P. M., "Permodelan Konverter DC to DC Tipe Boost Converter Dengan Pengendali Proporsional Integral (PI)," vol. 25(8.5.2017), pp. 2003–2005, 2022.
- [5] Kumara, N. S., "Tinjauan Perkembangan Kendaraan Listrik Dunia Hingga Sekarang," *Transmisi, Jurnal Teknik Elektro*, vol. 10, no. 2, pp. 89–96, 2008.
- [6] Mandal, S., Sarker, M. R. I., Rahman, M. S., and Beg, M. R. A., "An Analysis of Braking Energy Regeneration In Electric Vehicles," *International Journal of Renewable Energy Research*, vol. 7, no. 3, pp. 999–1006, 2017.
- [7] Marongiu, A., Nußbaum, F. G. W., Waag, W., Garmendia, M., and Sauer, D. U., "Comprehensive Study Of The Influence Of Aging On The Hysteresis Behavior Of A Lithium Iron Phosphate Cathode-Based Lithium Ion Battery - An Experimental Investigation Of The Hysteresis," *Applied Energy*, pp. 629–645, 2016.
- [8] Nazaruddin, N., Zainuri, F., Siregar, R., Heryana, G., Adhitya, M., and Sumarsono, D. A., "Electric power steering: An overview of dynamics equation and how it's developed for large vehicle," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 673, no. 1, 2019.
- [9] Pangestu, A. W. and Sutantra, I. N., "Studi Analisis Kinerja Sistem Rem Regeneratif pada Sepeda Motor Hybrid dengan Konfigurasi Seri," *Jurnal Teknik ITS*, vol. 9, no. 2, pp. 193–198, 2021.

- [10] Pattiapon, D. R., Rikumahu, J. J., and Jamlaay, M., “Penggunaan Motor Sinkron Tiga Fasa Tipe Salient Pole Sebagai Generator Sinkron,” *Jurnal Simetrik*, vol. 9, no. 2, pp. 197–207, 2019.
- [11] Setiowati, R. and Basjaruddin, N. C., “Active Steering Assistance For Turned Road Based On Fuzzy Logic,” 2017.
- [12] Setyono, B. and Setiawan, Y., “Rancang Bangun Sistem Transmisi, Kemudi dan Pengereman Mobil Listrik ‘Semut Abang’,” *Seminar Nasional Sains Dan Teknologi Terapan III 2015*, pp. 89–96, 2018.
- [13] Perdana, P. B., “Analisa Penggunaan Regeneratif Brake pada Mobil Multiguna Pedesaan Bertenaga Listrik,” 2018.
- [14] Tao, Y., Xie, X., Zhao, H., Xu, W., and Chen, H., “A regenerative braking system for electric vehicle with four in-wheel motors based on fuzzy control,” *Chinese Control Conference (CCC)*, pp. 4288–4293, 2017.
- [15] Putra, R. P., Kurniasih, N., Dewi, S., Sari, P., Syamsuddin, Z., and Pln, I. T., “Kontrol Torka Pengereman Regeneratif Pada Sepeda Listrik Dengan Integrasi Ultrakapasitor,” *Prosiding Seminar Nasional Energi*, vol. 23, 2022.
- [16] Yeo, H., Hwang, S., and Kim, H., “Regenerative braking algorithm for a hybrid electric vehicle with CVT ratio control,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, vol. 220, no. 11, pp. 1589–1600, 2006.
- [17] Jiang, B., Yang, D., Yu, H., Wang, J., He, C., Li, J., and Chen, Y., “Impact of Road Gradient on Fuel Consumption of Light-Duty Diesel Vehicles,” *Atmosphere*, vol. 16, no. 2, 2025. doi: 10.3390/atmos16020143
- [18] Nan, S., Tu, R., Li, T., Sun, J., and Chen, H., “From driving behavior to energy consumption: A novel method to predict the energy consumption of electric bus,” *Energy*, vol. 261, p. 125188, 2022. doi: 10.1016/J.ENERGY.2022.125188
- [19] Zhang, H., Chen, D., Zhang, H., and Liu, Y., “Research on the influence factors of brake regenerative energy of pure electric vehicles based on the CLTC,” *Energy Reports*, vol. 8, pp. 85–93, 2022. doi: 10.1016/J.EGYR.2022.10.259