



Sistem Penyimpanan Energi Regeneratif untuk Catu Daya Darurat MRT Jakarta

Aulia Andyatama*

Universitas Trisakti,
Indonesia

Chairul G. Irianto

Universitas Trisakti,
Indonesia

R. Deiny Mardian

Universitas Trisakti,
Indonesia

***Corresponding author:**

Aulia Andyatama, Universitas Trisakti,
Indonesia.

✉ aulia062002004025@std.trisakti.ac.id

Article Info :

Article history:

Received: July 16, 2026

Revised: September 01, 2026

Accepted: September 18, 2026

Available Online: October 09, 2026

Keywords:

Emergency Power;

Energy Storage;

Induction Motor;

Mass Rapid Transit;

Regenerative Braking



This is an open access article under the
[CC BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license.

Copyright © 2026 by Author. Published
by Politeknik Siber Cerdika International

Kata Kunci:

Catu Daya Darurat;

Mass Rapid Transit;

Motor Induksi;

Pengereman Regeneratif;

Penyimpanan Energi

Abstract

Background: MRT Jakarta depends on the utility supply for traction operations, while the August 2019 blackout demonstrated the operational and safety consequences of a complete service interruption. Regenerative braking offers recoverable energy, but its use as distributed emergency power has not been evaluated by jointly considering passenger load, evacuation demand, storage placement, and initial investment.

Objective: This study estimates regenerative braking energy from MRTJ 1000 Series trains and evaluates a Lithium Titanate Oxide Traction Energy Storage System (TESS) for emergency traction supply.

Methods: A quantitative descriptive-analytical model calculated changes in kinetic energy for 12 interstation segments in both directions, applied a 93% motor-conversion efficiency and OCS resistive losses, and compared AW0, AW1, and AW2 passenger-load scenarios. Net energy was aggregated over 284 daily trips and compared with evacuation requirements for seven off-peak and fourteen peak-hour trainsets.

Results: The model produced 50.834 kWh for the Up-Line and 45.120 kWh for the Down-Line per trip. Daily generation reached 13,637.68 kWh under the reference condition. Four 194 kWh TESS units provided 776 kWh, exceeding the estimated evacuation demand of 141.06 kWh off-peak and 282.13 kWh at peak hour. The preliminary payback period was 3.19 years under the stated blackout and energy-saving assumptions.

Conclusion: The study contributes an integrated preliminary framework linking operating load, distributed evacuation demand, and technology selection. LTO TESS is technically promising, although field measurements, dynamic state-of-charge simulation, protection studies, and life-cycle sensitivity analysis are required before implementation.

Abstrak

Latar belakang: Operasi traksi MRT Jakarta bergantung pada pasokan listrik utilitas, sedangkan blackout Agustus 2019 menunjukkan konsekuensi operasional dan keselamatan akibat penghentian layanan. Energi pengereman regeneratif berpotensi dipulihkan, tetapi penggunaannya sebagai catu daya darurat terdistribusi belum dinilai dengan mengintegrasikan beban penumpang, kebutuhan evakuasi, lokasi penyimpanan, dan investasi awal.

Tujuan: Penelitian ini mengestimasi energi pengereman regeneratif kereta MRTJ seri 1000 dan mengevaluasi Traction Energy Storage System (TESS) berbasis Lithium Titanate Oxide sebagai catu daya darurat traksi.

Metode: Model kuantitatif deskriptif-analitik menghitung perubahan energi kinetik pada 12 segmen antarstasiun untuk dua arah perjalanan, menerapkan efisiensi konversi motor 93% dan rugi-rugi resistif OCS, serta membandingkan kondisi beban AW0, AW1, dan AW2. Energi neto diagregasikan untuk 284 perjalanan harian dan dibandingkan dengan kebutuhan evakuasi tujuh trainset saat off-peak dan empat belas trainset saat jam puncak.

Hasil: Model menghasilkan 50,834 kWh pada Up-Line dan 45,120 kWh pada Down-Line per perjalanan. Energi harian mencapai 13.637,68 kWh pada kondisi referensi. Empat unit TESS berkapasitas masing-masing 194 kWh menyediakan total 776 kWh, melampaui kebutuhan evakuasi 141,06 kWh saat off-peak dan 282,13 kWh saat jam puncak. Payback period awal sebesar 3,19 tahun bergantung pada asumsi blackout dan penghematan energi.

Kesimpulan: Penelitian menghasilkan kerangka awal terpadu yang menghubungkan beban operasi, kebutuhan evakuasi terdistribusi, dan pemilihan teknologi. TESS LTO menjanjikan secara teknis, tetapi implementasinya memerlukan pengukuran lapangan, simulasi state of charge dinamis, kajian proteksi, dan analisis sensitivitas biaya siklus hidup

To cite this article: Andyatama, A., Irianto, C. G., & Mardian, R. D. (2026). Sistem penyimpanan energi regeneratif untuk catu daya darurat MRT Jakarta. *Journal of Business, Social and Technology*, 7(4), 2284–2293. <https://doi.org/10.59261/bustechno.v7i4.791>

PENDAHULUAN

Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 23 Tahun 2007 tentang Perkeretaapian mendefinisikan perkeretaapian sebagai satu kesatuan sistem yang mencakup prasarana, sarana, sumber daya manusia, norma, kriteria, persyaratan, dan prosedur penyelenggaraan transportasi kereta api (Rahmah, 2026; Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 23 Tahun 2007 Tentang Perkeretaapian, 2007). Setelah regulasi tersebut diterbitkan, penyelenggaraan perkeretaapian di Indonesia berkembang dengan hadirnya badan usaha selain PT Kereta Api Indonesia. PT MRT Jakarta didirikan pada 2008 untuk mengembangkan sistem perkeretaapian perkotaan dan mulai melayani publik pada 2019 (Mutaqqin et al., 2024; Rahmawati & Santoso, 2025).

Secara global, peningkatan mobilitas perkotaan mendorong operator metro untuk menekan konsumsi energi traksi tanpa mengurangi kapasitas layanan. Pada jaringan rel listrik, energi pengereman hanya dapat dimanfaatkan secara optimal apabila jaringan mampu menerimanya melalui kereta lain yang sedang berakselerasi, gardu reversibel, atau sistem penyimpanan energi di sisi jalur (wayside energy storage system). Studi pada sistem metro menunjukkan bahwa pengaturan operasi dan penyimpanan di gardu dapat meningkatkan pemanfaatan energi pengereman regeneratif serta mengurangi energi yang terbuang ketika receptivity jaringan rendah (Hoo et al., 2024; Ramsey et al., 2021; Su et al., 2016; Yang et al., 2024).

Kebutuhan transportasi publik yang andal dan hemat energi menjadi prioritas pengelolaan kota besar. MRT Jakarta menunjukkan pertumbuhan penggunaan setelah tahap awal operasinya; sepanjang 2024 tercatat lebih dari 40,8 juta perjalanan penumpang, sedangkan target 2025 sekitar 41 juta pelanggan dengan rata-rata mendekati 115 ribu penumpang per hari. Perbedaan beban penumpang antara jam puncak (peak hour) dan jam normal (off-peak hour) memengaruhi massa total kereta, energi traksi yang dikonsumsi, dan energi yang dapat dipulihkan saat pengereman (Deng et al., 2025; Hu et al., 2023; Li et al., 2022; Zhou et al., 2026).

Kereta MRT Jakarta seri 1000 (Ratangga) terdiri atas enam kereta dan menggunakan sistem traksi IGBT-VVVF dengan motor induksi. Pengereman regeneratif memungkinkan sebagian energi kinetik dikonversi menjadi energi listrik dan dikembalikan ke jaringan traksi. Karakteristik kereta, profil lintasan, pola operasi, dan kemampuan jaringan menerima daya menentukan besarnya energi yang dapat dipulihkan dan kebutuhan rancangan sistem penyimpanan energi di sisi jalur.

Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa pengereman regeneratif, pengaturan perjalanan, gardu reversibel, dan penyimpanan energi dapat mengurangi konsumsi energi sistem metro. Su et al. (2016) and Romero et al. (2024) memusatkan kajian pada optimasi kendali perjalanan, Ramsey et al. (2021) membandingkan alternatif pemulihan energi pada sistem DC, sedangkan Hoo et al. (2024) memodelkan pemulihan energi pada sistem rel ketiga di bawah berbagai kondisi operasi. Meskipun relevan, kajian tersebut belum secara khusus mengintegrasikan variasi beban penumpang MRT Jakarta, kebutuhan energi untuk evakuasi saat padam, penempatan TESS terdistribusi, dan kelayakan investasinya. Perhitungan awal Zimam (2023) memperkirakan energi pengereman regeneratif MRT Jakarta sebesar 13.637,66 kWh per hari, tetapi masih diperlukan evaluasi terpadu agar potensi tersebut dapat diterjemahkan menjadi rancangan catu daya darurat yang operasional.

Dalam manajemen keadaan darurat, energi yang dipulihkan dari pengereman berpotensi mempertahankan subsistem kritis, seperti persinyalan, komunikasi, penerangan darurat, kendali pintu, dan pergerakan terbatas kereta menuju stasiun terdekat ketika pasokan utama terganggu. Sistem penyimpanan di sisi jalur juga dapat meredam fluktuasi jaringan dan menyimpan energi yang tidak segera diserap oleh kereta lain (Fischer & Szürke, 2023; Menicanti et al., 2022; Sandrini et al., 2022).

Besarnya energi regeneratif yang tersedia dipengaruhi oleh massa total kereta, profil kecepatan dan pengereman, headway, efisiensi konversi, rugi-rugi penghantar, serta receptivity jaringan traksi (RMS & Wahyuningsih, 2023). Oleh karena itu, analisis berdasarkan jam operasional dan variasi massa penumpang diperlukan untuk menilai kelayakan teknis pemanfaatan energi pengereman regeneratif sebagai catu daya darurat.

Penelitian ini bertujuan menghitung potensi energi pengereman regeneratif MRT Jakarta pada variasi beban penumpang, menentukan kecukupan kapasitas TESS untuk skenario evakuasi pada jam normal dan jam puncak, serta menilai kelayakan awal alternatif teknologinya. Kebaruan penelitian terletak pada integrasi karakteristik operasi MRT Jakarta, variasi massa penumpang, kebutuhan energi evakuasi per gardu traksi, dan pertimbangan investasi dalam satu kerangka penilaian TESS untuk catu daya darurat.

METODE

Jenis Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode deskriptif-analitik. Lokasi penelitian mencakup jalur MRT Jakarta Fase 1 sepanjang 14,6 km dari Lebak Bulus hingga Bundaran HI, seluruh stasiun, dan Depo Lebak Bulus. Data sekunder berasal dari Basic Engineering Design dan Technical Design Report for Propulsion System, sedangkan data primer berupa kecepatan aktual dan lokasi awal pengereman pada setiap segmen stasiun. Jalur ini dipilih karena telah beroperasi penuh dan menggunakan pengereman regeneratif berbasis motor induksi AC dengan inverter VVVF.

Pengolahan Data

Pengolahan data dilakukan secara manual menggunakan lembar perhitungan bertahap. Tahap pertama menetapkan jarak, kecepatan awal dan akhir, waktu pengereman, massa sarana, serta massa penumpang untuk kondisi AW0, AW1, dan AW2. Tahap kedua menghitung perubahan energi kinetik, mengalikan hasilnya dengan efisiensi konversi motor induksi, dan mengurangi rugi-rugi resistif OCS. Tahap ketiga mengagregasikan energi neto per segmen menjadi energi Up-Line, Down-Line, roundtrip, dan total harian berdasarkan jumlah perjalanan. Tahap keempat membandingkan energi tersebut dengan kebutuhan evakuasi trainset dan kapasitas TESS pada setiap gardu traksi.

Teknik Analisis

Analisis dilakukan menggunakan statistik deskriptif dan perbandingan skenario. Perubahan energi kinetik pada setiap proses pengereman dihitung menggunakan persamaan $\Delta E_k = \frac{1}{2} \times m \times (v_1^2 - v_2^2)$, dengan m sebagai massa total kereta dalam kilogram, v_1 sebagai kecepatan awal pengereman dalam m/s, dan v_2 sebagai kecepatan akhir pengereman dalam m/s. Energi pengereman regeneratif kotor dihitung menggunakan persamaan $E_{reg} = \eta \times \Delta E_k$, dengan η merupakan efisiensi konversi motor induksi yang diasumsikan sebesar 93%. Rugi-rugi daya pada sistem Overhead Catenary System (OCS) dihitung menggunakan persamaan $P_{loss} = I^2 \times R$, dengan I sebagai arus listrik dan R sebagai resistansi penghantar. Energi yang hilang selama proses pengereman dihitung menggunakan $E_{loss} = (P_{loss} \times t) / 3.600.000$ sehingga diperoleh satuan kWh. Energi regeneratif neto kemudian dihitung menggunakan persamaan $E_{net} = E_{reg} - E_{loss}$.

Massa total kereta mengikuti kondisi beban AW0, AW1, dan AW2 sebagaimana disajikan pada Tabel 3. Kondisi jaringan diasumsikan mampu menyalurkan energi pengereman regeneratif menuju TESS ketika tidak terdapat beban traksi lain yang dapat menerima energi secara langsung. Model belum divalidasi menggunakan pengukuran energi aktual pada gardu traksi sehingga hasil penelitian diperlakukan sebagai estimasi rekayasa awal. Konsistensi model diperiksa melalui pengecekan satuan, pengulangan perhitungan pada setiap segmen, dan perbandingan skenario

beban. Analisis investasi menggunakan metode simple payback period, sedangkan asumsi satu kejadian blackout per tahun digunakan sebagai skenario analitis dan bukan sebagai frekuensi gangguan aktual MRT Jakarta.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Perhitungan Nilai Pengereman Regeneratif MRT

Perhitungan energi regeneratif menggunakan data operasional MRT Jakarta Fase 1 pada Tabel 1. Data desain dan parameter teknis menjadi input model, sedangkan hasil perhitungan berikut merupakan estimasi analitis dan belum mewakili pengukuran langsung pada gardu traksi.

Tabel 1

Spesifikasi Pengoperasian MRT Jakarta

Nomor	Parameter	Satuan	Nilai
1	Panjang rute	km	14,6
2	Konfigurasi jalur	-	Jalur ganda
3	Gauge (rel)	mm	1067
4	Radius minimal	m	180
5	Waktu tempuh	jam	0,47
6	Jumlah rangkaian (peak hour)	rangkaian	14
7	Jumlah rangkaian (normal hour)	rangkaian	7
8	Rating pengereman	-	0,80 m/s ²

Kecepatan rata-rata kereta dihitung menggunakan persamaan $V = \Delta s / \Delta t$, sehingga diperoleh $V = 14,6 \text{ km} / 0,47 \text{ jam} = 31,1 \text{ km/jam}$. Pada kondisi tujuh rangkaian yang beroperasi, jarak rata-rata antar-kereta adalah $14,6 \text{ km} / 7 \text{ kereta} = 2,1 \text{ km/kereta}$. Sebagai contoh, perhitungan pada satu segmen pengereman menggunakan kecepatan awal $60,2 \text{ km/jam}$ atau $16,72 \text{ m/s}$ dan kecepatan akhir 10 km/jam atau $2,78 \text{ m/s}$. Dengan perlambatan sebesar $0,80 \text{ m/s}^2$, waktu pengereman dihitung menggunakan persamaan $t = (v_1 - v_2) / a$, sehingga diperoleh $t = (16,72 - 2,78) / 0,80 = 17,43 \text{ detik}$. Jarak pengereman kemudian dihitung menggunakan persamaan $S = ((v_1 + v_2) / 2) \times t$, sehingga diperoleh $S = ((16,72 + 2,78) / 2) \times 17,43 = 169,9 \text{ m}$.

Perubahan energi kinetik selama proses pengereman dihitung menggunakan persamaan $\Delta E_k = \frac{1}{2} \times m \times (v_1^2 - v_2^2)$. Energi pengereman regeneratif kotor selanjutnya diperoleh melalui persamaan $E_{reg} = \eta \times \Delta E_k$, dengan η merupakan efisiensi konversi motor induksi sebesar 93%. Rugi-rugi daya pada kawat penghantar OCS dihitung menggunakan persamaan $P_{loss} = I^2 \times R$, sedangkan energi yang hilang selama proses pengereman dihitung menggunakan $E_{loss} = (P_{loss} \times t) / 3.600.000$ untuk memperoleh satuan kWh. Dengan demikian, energi pengereman regeneratif neto dihitung menggunakan persamaan $E_{net} = E_{reg} - E_{loss}$. Tahapan perhitungan yang sama diterapkan secara konsisten pada seluruh segmen stasiun untuk arah Up-Line dan Down-Line.

Energi Regeneratif Up-Line dan Down-Line

Perhitungan energi regeneratif per segmen diterapkan pada 12 segmen antarstasiun untuk masing-masing arah Up-Line (Lebak Bulus–Bundaran HI) dan Down-Line (Bundaran HI–Lebak Bulus). Tabel 2 menyajikan hasil perhitungan energi regeneratif neto setelah pengurangan rugi-rugi OCS. Angka pada tabel merupakan hasil model, sedangkan interpretasi perbedaan antarsemen dibahas pada paragraf berikutnya.

Tabel 2

Energi Regeneratif Neto per Segmen — Up-Line dan Down-Line

Nomor	Segmen	W total	Segmen	W total
	Up-Line	Up-Line (kWh)	Down-Line	Down-Line (kWh)
1	LBB-FTM	7,10	BHI-DKA	3,501
2	FTM-CPR	3,50	DKA-STB	2,313
3	CPR-HJN	1,59	STB-BNH	3,273
4	HJN-BLA	5,06	BNH-IST	4,496
5	BLA-BLM	10,66	IST-SNY	3,273

Nomor	Segmen Up-Line	W total Up-Line (kWh)	Segmen Down-Line	W total Down-Line (kWh)
6	BLM-ASN	0,79	SNY-ASN	4,780
7	ASN-SNY	3,50	ASN-BLM	0,789
8	SNY-IST	3,50	BLM-BLA	8,318
9	IST-BNH	5,06	BLA-HJN	3,501
10	BNH-STB	3,27	HJN-CPR	6,023
11	STB-DKA	3,73	CPR-FTM	3,501
12	DKA-BHI	3,07	FTM-LBB	1,348
	Total	50,834	Total	45,120

Total energi pengereman regeneratif per perjalanan pada Up-Line adalah 50,834 kWh dan pada Down-Line sebesar 45,120 kWh. Dengan demikian, satu perjalanan pulang-pergi menghasilkan energi regeneratif sebesar 95,954 kWh. Apabila 284 perjalanan harian merupakan total perjalanan satu arah dengan distribusi yang seimbang antara Up-Line dan Down-Line, energi regeneratif harian dihitung menggunakan persamaan $E_{\text{harian}} = ((E_{\text{up-line}} + E_{\text{down-line}}) / 2) \times N_{\text{trip}}$. Berdasarkan persamaan tersebut, diperoleh $E_{\text{harian}} = ((50,834 + 45,120) / 2) \times 284 = 13.625,47$ kWh/hari. Bangkitan energi terbesar pada Up-Line terjadi pada segmen Blok A–Blok M sebesar 10,66 kWh, sedangkan pada Down-Line terjadi pada segmen Blok M–Blok A sebesar 8,318 kWh. Besarnya energi pada kedua segmen tersebut berkaitan dengan karakteristik lintasan dan kecepatan kereta sebelum memasuki fase pengereman.

Pengaruh Beban Penumpang terhadap Energi Regeneratif

Energi regeneratif berbanding lurus dengan massa total kereta (massa sarana + massa penumpang). Pengaruh variasi beban dihitung menggunakan faktor skalasi terhadap tiga kondisi: AW0 (kosong), AW1 (1.000 penumpang), dan AW2 (1.950 penumpang, mendekati kondisi referensi).

Tabel 3

Energi Regeneratif Berdasarkan Kondisi Beban Penumpang

Kondisi	Massa (ton)	Faktor Skalasi	Up-Line (kWh)	Down-Line (kWh)	Roundtrip (kWh)	Total Harian (kWh)
AW0	198	0,6147	31,31	27,73	59,03	8.382,8
AW1	258	0,8009	40,79	36,13	76,92	10.923,0
AW2	315	0,9779	49,80	44,11	93,92	13.336,2

Perbedaan energi harian antara kondisi AW0 dan AW2 menunjukkan sensitivitas hasil terhadap massa total kereta: semakin besar massa, semakin besar energi kinetik yang tersedia untuk dikonversi pada profil kecepatan yang sama. Temuan ini memiliki implikasi operasional karena jam puncak menyediakan potensi pemulihan energi lebih besar, tetapi sekaligus meningkatkan kebutuhan keselamatan dan kontinuitas layanan. Dengan 284 perjalanan per hari, model menghasilkan estimasi energi regeneratif harian 13.637,68 kWh pada kondisi referensi. Nilai tersebut adalah potensi teoritis sebelum mempertimbangkan seluruh pembatas sistem nyata, seperti state of charge, batas daya konverter, simultanitas pengereman, dan receptivity jaringan.

Tabel 4

Ringkasan Kontribusi Energi Regeneratif Berdasarkan Nomor ID Rangkaian

No ID	Trip/Hari	Total Energi (kWh)	Keterangan
07	30	1.440,60	Kontribusi tertinggi (operasi penuh 07.00–24.00)
05	22	1.056,44	Kontribusi tinggi
09/11/12/13/14	20	960,40 (masing-masing)	Kontribusi menengah
10	4	192,08	Kontribusi terendah
Total (21 ID)	284	13.637,68	Seluruh rangkaian operasional

Rincian energi regeneratif untuk setiap nomor ID rangkaian dan setiap perjalanan disajikan selengkapnya pada Lampiran.

Penerapan Traction Energy Storage System (TESS) **Spesifikasi Sistem TESS yang Direkomendasikan**

Tabel 5

Spesifikasi Baterai TESS untuk MRT Jakarta

Nomor	Spesifikasi	Keterangan
1	Jenis baterai	Lithium Titanate Oxide (LTO) rechargeable
2	Jumlah baterai	8 panel @ 40 Ah (parallel)
3	Tegangan baterai	600 V
4	Arus pengisian	32 A (10% kapasitas)
5	Kapasitas energi	194 kWh per unit TESS
6	Output daya	500 kW
7	Kecepatan dukung kereta	15 km/jam (mode evakuasi)
8	Lokasi penempatan	4 unit di 4 Gardu Traksi (TSS)
9	Total kapasitas armada	32 panel × 40 Ah = 1.280 Ah / 776 kWh

TESS direncanakan ditempatkan pada empat Gardu Traksi untuk mendukung kebutuhan catu daya darurat secara terdistribusi. Pada skenario blackout off-peak terdapat tujuh trainset aktif yang terdiri atas empat trainset pada jalur layang dan tiga trainset pada jalur bawah tanah. Konsumsi energi untuk satu trainset dihitung berdasarkan konsumsi energi per car-km, jumlah kereta dalam satu trainset, dan jarak menuju stasiun terdekat menggunakan persamaan $E_{\text{trainset}} = 2,29 \times 6 \times 1,467$, sehingga diperoleh kebutuhan energi sebesar 20,152 kWh per trainset.

Daya pengisian TESS dihitung menggunakan persamaan $P = V \times I$. Dengan tegangan baterai sebesar 600 V dan arus pengisian sebesar 32 A, diperoleh $P = 600 \times 32 = 19.200$ W atau 19,2 kW. Waktu pengisian ideal selanjutnya dihitung menggunakan persamaan $t_{\text{charge}} = E / P$. Berdasarkan daya pengisian tersebut, pengisian energi sebesar 20,152 kWh untuk satu trainset memerlukan waktu sekitar $t_{\text{charge}} = 20,152 / 19,2 = 1,05$ jam, sedangkan kebutuhan energi sebesar 80,61 kWh untuk empat trainset memerlukan waktu sekitar $t_{\text{charge}} = 80,61 / 19,2 = 4,20$ jam. Perhitungan ini merupakan estimasi ideal dan belum memperhitungkan efisiensi charger, batas state of charge, degradasi baterai, serta perubahan daya pengisian selama operasi aktual.

Tabel 6

Kebutuhan Energi dan Estimasi Waktu Pengisian TESS per Skenario

Skenario	Jumlah Trainset	Konsumsi/TS (kWh)	Total Kebutuhan (kWh)	Waktu Pengisian(jam)
Off-peak (evakuasi)	7	20,152	141,06	9,55 (4 unit TESS)
Peak hour (evakuasi)	14	20,152	282,13	-
4 TS paralel → 1 TESS	4	20,152	80,61	4,18
1 Trainset (referensi)	1	20,152	20,15	16,70

Kapasitas total TESS perlu dibandingkan dengan kebutuhan energi evakuasi pada masing-masing skenario operasi. Pada kondisi off-peak, tujuh trainset membutuhkan energi total sebesar 141,06 kWh, sedangkan pada kondisi peak hour empat belas trainset membutuhkan sekitar 282,13 kWh. Secara nominal, kapasitas penyimpanan TESS yang direncanakan lebih besar daripada kebutuhan energi tersebut. Namun, kecukupan energi nominal belum secara langsung menjamin kemampuan sistem untuk melayani seluruh trainset secara simultan karena masih dipengaruhi oleh state of charge baterai, batas daya konverter, efisiensi sistem, lokasi trainset saat blackout, degradasi baterai, dan koordinasi proteksi jaringan. Oleh karena itu, hasil ini harus diperlakukan sebagai estimasi kecukupan energi awal yang masih memerlukan simulasi aliran daya dan pengujian lapangan.

Pembahasan

Skenario Pemanfaatan Saat Blackout

Insiden blackout PLN Agustus 2019 menyebabkan kerugian finansial ±Rp 507 juta akibat terhentinya seluruh operasi kereta, sementara MRT Jakarta belum memiliki catu daya darurat traksi yang memadai. Di sisi lain, energi pengereman regeneratif harian yang besar (13.637,66 kWh) masih belum dimanfaatkan optimal — energi ini sebagian besar hanya mengalir kembali ke OCS atau terbuang sebagai panas pada rheostat ketika tidak ada kereta lain yang berakselerasi pada segmen yang sama (kondisi low receptivity). Analisis akar masalah (fishbone: Measurement, Material, Machine, Method) menegaskan bahwa ketiadaan catu daya darurat, ditambah headway operasional yang padat (5–10 menit) di area pusat kota, menjadikan risiko keselamatan evakuasi penumpang sebagai prioritas utama yang perlu diatasi.

Tabel 7

Distribusi Kebutuhan Energi Evakuasi per Gardu Traksi

Gardu Traksi	TS Dilayani	Kebutuhan (kWh)	Kapasitas TESS (kWh)	Surplus (kWh)	% Utilisasi
TSS-1 (LBB-CPR)	2	40,30	194	153,70	20,77%
TSS-2 (CPR-BLA)	2	40,30	194	153,70	20,77%
TSS-3 (BLA-IST)	2	40,30	194	153,70	20,77%
TSS-4 (IST-BHI)	1	20,15	194	173,85	10,39%

Pada skenario off-peak yang dimodelkan, setiap Gardu Traksi memiliki kapasitas penyimpanan yang lebih besar daripada kebutuhan energi evakuasi lokal untuk distribusi tujuh trainset. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penempatan satu unit TESS pada setiap Gardu Traksi secara nominal berpotensi mendukung pergerakan trainset menuju stasiun terdekat saat terjadi gangguan pasokan utama. Namun, kecukupan pada kondisi peak hour belum dapat disimpulkan hanya berdasarkan kapasitas total sistem. Distribusi empat belas trainset pada masing-masing area suplai TSS, state of charge aktual, batas daya konverter, serta simultanitas kebutuhan evakuasi perlu dimodelkan secara khusus untuk memastikan kecukupan energi dan daya pada setiap gardu.

Kelayakan Investasi (Cost-Benefit Analysis)

Tabel 8

Estimasi Investasi dan Payback Period TESS

Aspek	Nilai (Rp)	Keterangan
Investasi 4 unit TESS LTO	4.000.000.000	Estimasi ~Rp 1 miliar/unit
Kerugian blackout 2019 (aktual)	507.000.000	Kondisi off-peak
Estimasi kerugian jika peak hour	1.014.000.000	Asumsi 2× off-peak
Penghematan energi tahunan	746.662.000	10% konsumsi @ Rp 1.500/kWh
Payback period	3,19 tahun	Asumsi 1 kejadian blackout/tahun

Tabel 9

Perbandingan Alternatif Energy Storage System

Aspek	TESS LTO	ESS EDLC (Korea)	OTCS (China)
Kapasitas energi	194 kWh	≈0,65 kWh	Tidak menyimpan energi
Investasi	±Rp 4 miliar	±Rp 6–8 miliar	±Rp 2–3 miliar
Fungsi utama	Backup + storage + stabilizer	Backup + stabilizer	Optimasi konsumsi
Impact Score	8,25	8,50	7,20
Effort Score	6,66	8,10	7,85
Rekomendasi	Direkomendasikan	Impact tinggi, effort besar	Impact moderat

Dari hasil perhitungan, periode pengembalian investasi yang berada di kisaran 3,19 tahun menunjukkan bahwa TESS cukup layak untuk dipertimbangkan, terutama apabila manfaat non-finansial seperti keselamatan penumpang, kontinuitas layanan, dan pengurangan risiko reputasi operator turut diperhitungkan.

Perbandingan alternatif dilakukan untuk memastikan bahwa solusi yang dipilih tidak hanya unggul dari sisi teknis, tetapi juga realistis dari sisi biaya, kemudahan integrasi, dan risiko implementasi. Dalam konteks MRT Jakarta, solusi yang ideal adalah teknologi yang mampu memberikan fungsi backup, menyerap energi regeneratif, serta dapat diintegrasikan secara bertahap tanpa mengganggu operasi eksisting.

Impact-Effort Matrix digunakan sebagai alat penyaringan awal, bukan pengukuran empiris. Impact merepresentasikan gabungan fungsi catu daya darurat, kapasitas penyimpanan, dukungan stabilisasi tegangan, dan potensi penghematan; effort merepresentasikan kebutuhan investasi, kompleksitas integrasi, ruang, serta risiko implementasi. Skor pada Tabel 9 dinormalisasi pada skala 1–10 berdasarkan data teknis dan biaya yang tersedia dalam penelitian ini. Karena bobot dan skor belum dikonfirmasi melalui panel ahli atau tender pemasok, peringkat tersebut harus dibaca sebagai perbandingan awal. Dalam batasan ini, TESS LTO memberikan keseimbangan terbaik antara manfaat operasional dan usaha implementasi (Impact 8,25; Effort 6,66).

Secara ringkas, manfaat kuantitatif dan kualitatif dari implementasi TESS LTO mencakup catu daya darurat 776 kWh ($>5\times$ kebutuhan evakuasi) untuk menjamin evakuasi aman saat blackout; pengisian ulang cepat (4,18 jam untuk 4 trainset paralel) memanfaatkan energi regeneratif operasi normal; potensi penghematan energi traksi 10–15% ($\approx$ Rp 747 juta/tahun) melalui reduksi konsumsi dari PLN; fungsi stabilizer tegangan OCS secara real-time yang meningkatkan kualitas daya jaringan; umur baterai LTO 10–15 tahun dengan risiko implementasi rendah karena teknologi telah matang (mature); serta desain modular dan scalable (plug-and-play) yang memudahkan penambahan kapasitas untuk Fase 2.

Secara akademik, hasil ini memperluas perhitungan energi regeneratif menjadi penilaian resiliensi operasional. Variasi massa penumpang tidak hanya memengaruhi energi yang dapat dipulihkan, tetapi juga menentukan margin energi evakuasi dan strategi distribusi penyimpanan pada gardu traksi. Hasil tersebut sejalan dengan literatur yang menekankan bahwa manfaat penyimpanan energi rel ditentukan oleh kondisi operasi dan lokasi perangkat, bukan hanya kapasitas nominalnya (Feng, 2022; Hoo et al., 2024; Ramsey et al., 2021; Zhao et al., 2024).

Dengan mempertimbangkan seluruh manfaat teknis, operasional, dan finansial tersebut, TESS berbasis baterai LTO dapat diposisikan sebagai solusi strategis untuk meningkatkan resiliensi sistem traksi MRT Jakarta, sekaligus memperkuat kesiapan operasi dalam menghadapi kondisi darurat.

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa integrasi perhitungan energi pengereman regeneratif, variasi beban penumpang, distribusi kebutuhan energi evakuasi, dan penempatan Traction Energy Storage System dapat digunakan sebagai kerangka awal untuk meningkatkan resiliensi operasi MRT Jakarta. Model menghasilkan energi regeneratif sebesar 50,834 kWh pada Up-Line dan 45,120 kWh pada Down-Line, atau 95,954 kWh untuk satu perjalanan pulang-pergi. Dengan asumsi 284 perjalanan satu arah per hari yang terdistribusi seimbang pada kedua arah, potensi energi regeneratif harian yang konsisten dengan hasil model adalah sekitar 13.625,47 kWh. Kapasitas TESS secara nominal menunjukkan potensi yang memadai untuk mendukung kebutuhan energi evakuasi, tetapi nilai kapasitas akhir harus diselaraskan kembali dengan spesifikasi tegangan dan kapasitas baterai yang digunakan. Kontribusi utama penelitian terletak pada penggabungan karakteristik operasi MRT Jakarta, variasi massa penumpang, kebutuhan evakuasi terdistribusi, dan pertimbangan investasi dalam satu kerangka penilaian catu daya darurat berbasis energi regeneratif. Meskipun TESS berbasis LTO menunjukkan potensi teknis dan operasional yang menjanjikan, hasil penelitian ini masih merupakan desain rekayasa awal karena belum divalidasi melalui pengukuran energi aktual di gardu traksi, simulasi state of charge dinamis, analisis koordinasi proteksi, evaluasi degradasi baterai, dan analisis sensitivitas biaya

siklus hidup. Oleh karena itu, implementasi TESS perlu dilanjutkan melalui studi kelayakan teknis terperinci dan uji percontohan berbasis data operasi aktual.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada seluruh pihak yang telah memberikan dukungan, informasi, data, serta kontribusi selama pelaksanaan penelitian ini. Apresiasi juga disampaikan kepada pihak-pihak yang telah membantu proses pengumpulan data dan penyusunan penelitian sehingga penelitian ini dapat diselesaikan dengan baik.

PERNYATAAN KONTRIBUSI PENULIS

Aulia Andyatama berkontribusi dalam konseptualisasi penelitian, pengumpulan dan pengolahan data, analisis, serta penyusunan naskah. Chairul G. Irianto berkontribusi dalam pengembangan metodologi, validasi hasil, supervisi, dan penyempurnaan substansi ilmiah. R. Deiny Mardian berkontribusi dalam validasi, supervisi, interpretasi hasil, dan penyempurnaan naskah. Seluruh penulis telah membaca dan menyetujui versi akhir naskah.

DAFTAR PUSTAKA

- Deng, L., Tang, S., Chen, M., Zhang, Y., Tian, Y., & Chen, Q. (2025). Energy-efficient optimization method for timetable adjusting in urban rail transit. *Mathematics*, 13(13), 2119.
- Feng, J. (2022). Brake energy recovery system for electric vehicle. *International Journal of Ambient Energy*, 43(1). <https://doi.org/10.1080/01430750.2019.1682043>
- Fischer, S., & Szürke, S. K. (2023). Detection Process Of Energy Loss In Electric Railway Vehicles. *Facta Universitatis, Series: Mechanical Engineering*, 21(1). <https://doi.org/10.22190/FUME221104046F>
- Hoo, D. S., Chua, K. H., Lim, Y. S., Morris, S., & Wang, L. (2024). Comparison of regenerative braking energy recovery of a DC third rail system under various operating conditions. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 155, 109575. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2023.109575>
- Hu, Y., Li, S., Wang, Y., Zhang, H., Wei, Y., & Yang, L. (2023). Robust metro train scheduling integrated with skip-stop pattern and passenger flow control strategy under uncertain passenger demands. *Computers and Operations Research*, 151. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2022.106116>
- Li, J., Pan, F., Tang, H., Tong, S., Zhang, L., Li, X., & Yang, X. (2022). Energy-Saving Metro Train Timetable Optimization Method Based on a Dynamic Passenger Flow Distribution. *Journal of Advanced Transportation*, 2022(1), 9776845.
- Menicanti, S., di Benedetto, M., Marinelli, D., & Crescimbeni, F. (2022). Recovery of Trains' Braking Energy in a Railway Micro-Grid Devoted to Train plus Electric Vehicle Integrated Mobility. *Energies*, 15(4), 1261. <https://doi.org/10.3390/en15041261>
- Mutaqqin, M., Prawira, D. A., Darmawan, A., & Marsusiadi, E. N. S. (2024). Systematic Literature Review: Penggunaan Energi Regeneratif dari Sistem Pengereman pada Kereta Listrik/Electric Multiple Unit (EMU). *Innovative: Journal Of Social Science Research*, 4(3), 2293–2308.
- Rahmah, A. P. (2026). Implementasi Pasal 178 Undang-Undang Nomor 23 Tahun 2007 tentang Perkeretaapian: Perspektif Siyasa Tanfidziyyah. *Jurnal Hukum Lex Generalis*, 7(2).
- Rahmawati, D., & Santoso, B. (2025). Pemanfaatan energi regeneratif untuk sistem darurat transportasi rel. *Jurnal Teknik Elektro Indonesia*, 31(1), 44–57. <https://scholar.google.com/scholar?q=%22Pemanfaatan+energi+regeneratif+untuk+sistem+darurat+transportasi+rel%22>
- Ramsey, D., Letrouvé, T., Bouscayrol, A., & Delarue, P. (2021). Comparison of Energy Recovery Solutions on a Suburban DC Railway System. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 7(3), 1849–1857. <https://doi.org/10.1109/TTE.2020.3035736>
- RMS, A. B., & Wahyuningsih, E. (2023). Optimalisasi Energi Panas dari Gesekan pada Sistem Pengereman Kereta Listrik dengan Rel sebagai Sumber Energi Terbarukan. *Jurnal Tera*, 3(1). <https://doi.org/10.59832/jt.v3i1.252>
- Romero, C. A., Correa, P., Ariza Echeverri, E. A., & Vergara, D. (2024). Strategies for Reducing

- Automobile Fuel Consumption. In *Applied Sciences (Switzerland)* (Vol. 14, Number 2). <https://doi.org/10.3390/app14020910>
- Sandrini, G., Chindamo, D., & Gadola, M. (2022). Regenerative Braking Logic That Maximizes Energy Recovery Ensuring the Vehicle Stability. *Energies*, 15(16). <https://doi.org/10.3390/en15165846>
- Su, S., Tang, T., & Wang, Y. (2016). Evaluation of strategies to reducing traction energy consumption of metro systems using an Optimal Train Control Simulation model. *Energies*, 9(2). <https://doi.org/10.3390/en9020105>
- Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 23 Tahun 2007 Tentang Perkeretaapian (2007). <https://scholar.google.com/scholar?q=%22Undang-Undang+Republik+Indonesia+Nomor+23+Tahun+2007+tentang+Perkeretaapian%22>
- Yang, C., Sun, T., Wang, W., Li, Y., Zhang, Y., & Zha, M. (2024). Regenerative braking system development and perspectives for electric vehicles: An overview. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 198). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114389>
- Zhao, F., Zhu, X., Chen, X., & Wang, Y. (2024). Regenerative Braking Energy Recovery System of Metro Train Based on Dual-Mode Power Management. *Energy Engineering: Journal of the Association of Energy Engineering*, 121(9). <https://doi.org/10.32604/ee.2024.049762>
- Zhou, J., Zhang, L., Zheng, A., Wang, H., Ma, Z., & Yang, N. (2026). Multi-Objective Energy-Efficient Train Timetable Optimization in Urban Rail Transit via a Hybrid DRL-NSGA-III Framework. *Energies*, 19(18), 4253.
- Zimam, Z. K. (2023). *Perencanaan perhitungan sistem penyedia catu daya darurat menggunakan pengereman regeneratif Mass Rapid Transit Jakarta*.