



DOI: <https://doi.org/10.38035/jgit.v4i2.670>  
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

## Pemanfaatan *Regenerative Braking* Pada Kereta Listrik Sebagai Sumber Energi Terbarukan dengan Menggunakan Inverter Sebagai Media Penghemat Energi pada 20 Kv Gardu Traksi

Ahmad Alief Zulfikar<sup>1</sup>, Abdul Halim<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universitas Indonesia, Depok, Indonesia, [ahmad.alief21@ui.ac.id](mailto:ahmad.alief21@ui.ac.id)

<sup>2</sup>Universitas Indonesia, Depok, Indonesia,

Corresponding Author: [ahmad.alief21@ui.ac.id](mailto:ahmad.alief21@ui.ac.id)<sup>1</sup>

**Abstract:** Population growth and economic activity in urban areas have given rise to complex challenges in public mobility systems. As a solution, Mass Rapid Transit (MRT) has proven its effectiveness as a high-capacity public transportation system that not only solves traffic congestion but also supports the creation of a more sustainable urban environment. However, MRT operations require significant electrical energy consumption. To address this challenge while enhancing its positive impact, this research examines the potential utilization of regenerative braking energy from electric trains. Through technical simulation, this study analyzes the application of inverter technology to convert braking energy into a usable power source for Jakarta MRT facilities. The analysis is conducted comprehensively from technical, economic, regulatory, and business strategy perspectives. The simulation results indicate that the implementation of a Traction Substation Inverter could potentially generate energy amounting to 400 MWh per month. From a financial perspective, the project yields a positive Net Present Value (NPV) of IDR 8.3 billion. A Business-to-Business (B2B) partnership scheme is proposed as an innovative funding model to overcome the challenge of initial capital investment.

**Keywords:** Mass Rapid Transit, Jakarta, Regenerative Braking, Engineering Economy, Business Strategy.

**Abstrak:** Pertumbuhan populasi dan aktivitas ekonomi di perkotaan telah memunculkan tantangan kompleks dalam sistem mobilitas penduduk. Sebagai solusi, *Mass Rapid Transit* (MRT) atau Moda Raya Terpadu telah membuktikan efektivitasnya sebagai angkutan umum berkapasitas besar yang tidak hanya mengurangi kemacetan tetapi juga mendukung terciptanya lingkungan perkotaan yang lebih berkelanjutan. Namun, operasional MRT membutuhkan konsumsi energi listrik yang signifikan. Untuk menjawab tantangan ini sekaligus memperkuat dampak positifnya, penelitian ini mengkaji potensi pemanfaatan energi regenerative braking pada kereta listrik. Melalui simulasi teknis, studi ini menganalisis penerapan teknologi inverter untuk mengonversi energi pengereman menjadi sumber listrik yang dapat digunakan di fasilitas MRT Jakarta. Analisis dilakukan secara komprehensif dari

aspek teknis, ekonomi, regulasi, dan strategi bisnis. Hasil simulasi menunjukkan bahwa implementasi Inverter Gardu Traksi berpotensi menghasilkan energi sebesar 400 MWh per bulan. Dari perspektif keuangan, proyek ini menghasilkan *Net Present Value* (NPV) positif sebesar Rp 8,3 miliar. Skema Kemitraan Bisnis-ke-Bisnis (B2B) diajukan sebagai model pendanaan yang inovatif untuk mengatasi tantangan investasi modal awal.

**Kata Kunci:** *Mass Rapid Transit*, Jakarta, *Regenerative Braking*, Ekonomi Teknik, Strategi Bisnis.

## PENDAHULUAN

Pertumbuhan populasi dan aktivitas bisnis di kawasan perkotaan menciptakan tantangan baru terkait mobilitas penduduk. *Mass Rapid Transit* (MRT) Jakarta telah membuktikan efektivitasnya dalam mengurai kemacetan. Pada tahap pertama pengoperasiannya yang membentang sejauh 15,9 km dari Stasiun Lebak Bulus hingga Bundaran HI, MRT Jakarta melayani 13 stasiun dengan kapasitas operasional 6 gerbong per kereta (konfigurasi Tc2-M1-M2-M1'-M2'-Tc1) dan jarak antar-kereta (headway) mencapai 3 hingga 5 menit pada jam sibuk.

Dalam menjalankan operasinya, MRT Jakarta bertumpu pada pasokan listrik dari PT Perusahaan Listrik Negara (PLN) dengan kebutuhan daya melebihi 10 MVA. Tingginya konsumsi energi listrik ini secara langsung berdampak pada besarnya pengeluaran operasional (*Operational Expenditure* / OPEX) perusahaan. Oleh karena itu, diperlukan solusi strategis untuk menekan biaya tersebut, salah satunya melalui pemanfaatan energi terbarukan berupa *regenerative braking*.

*Regenerative braking* adalah teknologi yang memungkinkan energi kinetik kereta saat melakukan pengereman dikonversi kembali menjadi energi listrik. Namun, pada sistem 1500 VDC yang digunakan saat ini, pemanfaatan energi tersebut belum optimal. Energi hasil pengereman hanya dapat diserap apabila terdapat kereta lain yang sedang berakselerasi (*powering*) di sektor jaringan yang sama. Sisa arus yang tidak terserap umumnya akan terbuang menjadi panas.

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pemanfaatan energi *regenerative braking* yang tidak terserap tersebut dengan menambahkan instalasi Inverter Gardu Traksi berkapasitas 1000 kW. Inverter ini akan mengubah arus searah (DC) sisa pengereman menjadi arus bolak-balik (AC) untuk disalurkan kembali ke jaringan 20 kV. Kajian ini dianalisis secara komprehensif meliputi aspek teknis (simulasi aliran daya), aspek ekonomi teknik (kelayakan investasi), hingga perumusan strategi bisnis bagi PT MRT Jakarta (Persero).

## TINJAUAN PUSTAKA

### 1. Sistem Propulsi dan *Regenerative Braking*

Sistem kelistrikan MRT Jakarta disuplai dari jaringan 20 kV AC PLN yang kemudian diturunkan dan disearahkan (*rectified*) di Gardu Traksi menjadi 1500 VDC untuk disalurkan melalui Listrik Aliran Atas (LAA). Kereta MRT terdiri dari empat kereta bermotor (M) dan dua kereta tanpa motor (T).

Pengereman regeneratif beroperasi berdasarkan prinsip Hukum Kekekalan Energi. Saat kereta memperlambat lajunya, motor traksi beralih fungsi menjadi generator. Aliran energi berbalik arah dari motor traksi menuju LAA 1500 VDC. Energi ini secara alami akan mengalir untuk menyuplai kereta lain yang sedang berakselerasi di area terdekat.

## 2. Topologi Inverter Gardu Traksi

Inverter adalah peralatan elektronika daya yang berfungsi mengonversi listrik arus searah (DC) menjadi arus bolak-balik (AC). Pada aplikasi gardu traksi, tipe inverter yang digunakan adalah *Double bridge two-level three-phase* IGBT inverter. Perangkat ini mengatur proses pensaklaran frekuensi tinggi untuk menghasilkan gelombang sinusoidal yang dapat diinjeksikan secara sinkron ke dalam jaringan distribusi AC 20 kV melalui transformator *step-up*.

## 3. Evaluasi Ekonomi Teknik (*Engineering Economics*)

Penilaian kelayakan suatu investasi infrastruktur dianalisis menggunakan metode *Net Present Value* (NPV) yang mempertimbangkan nilai uang terhadap waktu (*Time Value of Money*). Investasi dinilai layak apabila akumulasi dari nilai sekarang (*Present Value*) atas arus kas bersih lebih besar dari nilai investasi awal yakni ( $NPV > 0$ ). Persamaan dasar NPV adalah:

$$NPV = \sum \frac{CF_n}{(1+i)^n} - I_0$$

Dimana

$CF_n$  adalah arus kas pada periode  $n$ ;

$i$  adalah tingkat diskonto (*Minimum Attractive Rate of Return / MARR*); dan

$I_0$  adalah modal investasi awal.

## METODE

Penelitian ini menggunakan metode kuantitatif yang diawali dengan pengumpulan data operasional kereta (*Train Information System / TIS*), profil kecepatan, beban traksi, dan elevasi jalur lintasan MRT Jakarta. Langkah-langkah penelitian meliputi:

1. **Analisis Teknis**, ialah melakukan pemodelan *Time Space Diagram* untuk menghitung probabilitas tumpang-tindih (*overlap*) waktu antarkereta pada *headway* 5 menit (HW5) dan 10 menit (HW10). Data ini digunakan untuk mengetahui persentase daya yang diserap antar-kereta dan sisa daya yang mengalir ke gardu.
2. **Kuantifikasi Energi**, ialah menghitung total energi regeneratif yang berhasil dikonversi ke jaringan 20 kV selama satu tahun operasional (Tahun 2025).
3. **Analisis Ekonomi Teknik**, ialah mengevaluasi Rencana Anggaran Biaya (CAPEX), proyeksi penghematan biaya listrik bulanan, biaya *Operation and Maintenance* (O&M), serta menghitung NPV proyek selama estimasi umur pakai perangkat yaitu 10 tahun.
4. **Analisis Strategi Bisnis**, ialah menggunakan diagram *Effort-Impact* untuk menentukan skema kerja sama operasional yang paling optimal bagi perusahaan.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### 1. Simulasi Kinetik dan *Regenerative Braking*

Data operasional kereta yang diambil dari subsistem TIS pada saat beroperasi menunjukkan fluktuasi konsumsi dan bangkitan energi kinetik. Parameter hasil simulasi pada lintasan *roundtrip* ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Simulasi *Running* Kereta

| Pola Operasi | Current @0 Speed (A) | Energi Roundtrip (kWh) | Efektivitas <i>Regenerative Braking</i> | Energi <i>Regenerative Braking</i> (kWh) |
|--------------|----------------------|------------------------|-----------------------------------------|------------------------------------------|
| HW5          | 51,63                | 569,14                 | 40,93%                                  | 232,94                                   |
| HW5          | 52,05                | 579,74                 | 40,92%                                  | 237,32                                   |
| HW10         | 40,49                | 523,74                 | 34,71%                                  | 181,78                                   |
| HW10         | 41,94                | 530,03                 | 36,21%                                  | 191,91                                   |

Sumber : Data Riset

Berdasarkan Tabel 1, terlihat bahwa operasional dengan tingkat kepadatan tinggi (HW5) menghasilkan efektivitas *regenerative braking* yang lebih optimal, yakni 40,9% dengan rata-rata energi balik mencapai 235 kWh tiap putaran kereta, dibandingkan HW10 yang hanya 34,71% dan rata-rata energi balik 189 kWh.

Selanjutnya, produksi energi di setiap stasiun (dari Lebak Bulus hingga Bundaran HI) sangat dipengaruhi oleh kecepatan pengereman dan gradien elevasi lintasan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa bangkitan *regenerative braking* tertinggi terjadi pada stasiun dengan karakteristik kontur menurun, yaitu **Stasiun Bendungan Hilir** (Konsumsi: 85,37 kWh; *Regenerative*: 34,94 kWh) dan **Stasiun Cipete Raya** (Konsumsi: 68,29 kWh; *Regenerative*: 27,95 kWh).

## 2. Probabilitas Penyerapan Energi dan Kinerja Inverter

Sebagian energi yang dihasilkan dari proses pengereman akan langsung diserap oleh kereta lain di lintasan yang sama. Analisis probabilitas *overlap* dilakukan berdasarkan variabel *headway* kereta. Untuk konfigurasi HW5, frekuensi kejadian pengereman tiap jam adalah 156 *events*, dengan asumsi kejadian *overlap* sebanyak 118 *events*. Persamaan probabilitas *overlap* kereta diformulasikan sebagai berikut:

$$P(H) = 0,85 \times e^{-0,12(H-3)} + 0,15 \times e^{-0,08H}$$

Substitusi nilai untuk *Headway* 5 Menit (HW5) dan *Headway* 10 Menit (HW10) ke dalam persamaan menghasilkan nilai penyelesaian *step-by-step*:

### a. Untuk HW5 (300 detik):

$$\begin{aligned} P(5) &= 0,85 \times 0,7866 + (0,15 \times 0,6703) \\ P(5) &= 0,6593 + 0,1005 \\ P(5) &= 0,7598 \approx 75\% \end{aligned}$$

### b. Untuk HW10 (600 detik):

$$\begin{aligned} P(10) &= (0,85 \times 0,4317) + (0,15 \times 0,4493) \\ P(10) &= 0,3699 + 0,0674 \\ P(10) &= 0,4373 \approx 44\% \end{aligned}$$

Sesuai dengan batasan standar operasional, faktor *overlap* maksimal atau daya adsorpsi batas penyerapan antar kereta ditetapkan sebesar 85%. Dari ketentuan ini, besaran persentase energi yang diserap oleh kereta lain, dikalkulasi dengan mengalikan probabilitas dengan faktor maksimal.

**Tabel 2. Probabilitas Penyerapan Energi oleh Kereta Lain**

| <i>Headway</i> | <i>Overlap Probability</i> | Diserap Kereta Lain (%) | Sisa ke Gardu (%) | Energi Sisa (kWh/roundtrip) |
|----------------|----------------------------|-------------------------|-------------------|-----------------------------|
| HW5            | 75%                        | 63,75%                  | 36,25%            | 78,24                       |
| HW10           | 45%                        | 38,25%                  | 61,75%            | 133,27                      |

Sumber : Data Riset

Angka 36,25% merepresentasikan residu energi mentah yang tidak terserap dan mengalir ke Gardu Traksi. Energi inilah yang ditangkap oleh Inverter tipe *Secheron* berkapasitas 1000 kW untuk dikonversi menjadi daya AC. Total bangkitan energi regeneratif

tahunan selama 365 hari operasi (Januari - Desember) dan hasil konversinya disajikan pada Tabel 3.

**Tabel 3. Perhitungan Produksi Energi Regenerative dan Konversi 20 kV (Data Kumulatif 1 Tahun)**

| Deskripsi Parameter                                        | Total Energi (MWh/Tahun) |
|------------------------------------------------------------|--------------------------|
| Total <i>Regenerative Braking</i> Bruto yang dihasilkan    | 11.186,52                |
| Energi Neto yang Berhasil Dikonversi Inverter ke Bus 20 kV | 5.103,37                 |

Sumber : Data Riset

Tingkat efisiensi dari implementasi keseluruhan sistem dihitung melalui perbandingan daya yang berhasil diinjeksikan dengan total energi bruto:

$$Efisiensi = \frac{\text{Total Energi yang disuplai ke gardu}}{\text{Total Regenerative Energi yang dihasilkan}} \times 100\%$$

$$Efisiensi = \frac{5.103,37 \text{ MWh}}{11.186,52 \text{ MWh}} \times 100\% = 45,62\%$$

### 3. Evaluasi Kelayakan Ekonomi Teknik

Selain menganalisis kinerja fisis teknis, evaluasi komersial wajib dilakukan. Biaya investasi awal (*Capital Expenditure*) untuk pengadaan dan pemasangan inverter dihitung pada Tabel 4.

**Tabel 4. Perhitungan Biaya Investasi Inverter Gardu Traksi**

| No                                           | Komponen      | Total Harga (Rupiah) |
|----------------------------------------------|---------------|----------------------|
| 1                                            | Inverter      | 3.000.000.000        |
| 2                                            | Transformator | 524.580.000          |
| 3                                            | Kabel         | 400.000.000          |
| 4                                            | Instalasi     | 1.966.200.000        |
| <b>Biaya Investasi Dasar</b>                 |               | <b>5.890.780.000</b> |
| Kontingensi (5% dari Biaya Dasar)            |               | 294.539.000          |
| Pajak PPN (11% dari Biaya Dasar)             |               | 647.985.800          |
| <b>Total Biaya Investasi (I<sub>0</sub>)</b> |               | <b>6.833.304.800</b> |

Sumber : Data Riset

Manfaat proyek ini terletak pada penghematan pembelian tagihan listrik (Tarif Traksi = Rp 700 / kWh). Berdasarkan data histori pemakaian 11 Bulan MRT Jakarta (Tahun 2025), konsumsi rata-rata tanpa inverter menelan biaya OPEX yang sangat besar. Pada perhitungan akumulasi satu tahun berjalan:

- Total Tagihan Listrik Berdasarkan Simulasi Tanpa Inverter = 19.294.630 kWh × Rp700 = Rp13.506.241.000
- Biaya yang berhasil ditekan oleh Inverter = 4.655.770 kWh × Rp700 = Rp 3.259.039.000.

**Tabel 5. Perhitungan Biaya Energi Traksi (Sampling Bulanan 2025)**

| Bulan (2025)                               | Daya Traksi Asal (MWh) | Energi Regeneratif Konversi (MWh) | Penghematan Biaya Tarif Traksi (Juta Rp) |
|--------------------------------------------|------------------------|-----------------------------------|------------------------------------------|
| Januari                                    | 1.707                  | 419,44                            | 293,6                                    |
| Februari                                   | 1.644                  | 391,47                            | 274,0                                    |
| Maret                                      | 1.734                  | 433,42                            | 303,3                                    |
| ...                                        | ...                    | ...                               | ...                                      |
| <b>Total Penghematan 1 Tahun (Revenue)</b> |                        |                                   | <b>3.259.039.000</b>                     |

Sumber : Data Riset

Aliran arus kas didiskontokan (*Discounted Cash Flow*) untuk menentukan parameter kelayakan *Net Present Value* (NPV). Parameter asumsi yang diadaptasikan meliputi:

1. Siklus Hidup Peralatan (*Lifespan*): 10 Tahun dengan metode depresiasi garis lurus.
2. Biaya Pemeliharaan (O&M): Ditetapkan dasar Rp 340.000.000/tahun dengan perhitungan laju inflasi tetap 5% per tahun.
3. Laju Diskonto / MARR: Ditetapkan sebesar 10% ( $i = 0,10$ ).
4. Kewajiban Pajak Korporasi: Diperhitungkan sebesar 25%.

*Penjabaran Step-by-Step Kalkulasi Cash Flow (Studi Kasus Tahun Ke-1):*

**a. Depresiasi :**

$$\text{Rp}6.833.304.800 \div 10 = \text{Rp}683.330.480.$$

**b. Laba Operasional (Sebelum Pajak):**

$$\begin{aligned} & \text{Revenue} - \text{Biaya O\&M} - \text{Depresiasi} \\ &= 3.259.039.000 - 340.000.000 - 683.330.480 \\ &= \text{Rp}2.235.708.520 \end{aligned}$$

**c. Net Income (Setelah Pajak 25%):**

$$\begin{aligned} & \text{Rp} 2.235.708.520 \times (1 - 0,25) \\ &= \text{Rp}1.676.781.390 \end{aligned}$$

**d. Arus Kas Aktual:**

$$\begin{aligned} & \text{Net Income} + \text{Depresiasi} \\ &= \text{Rp}1.676.781.390 + \text{Rp}683.330.480 \\ &= \text{Rp} 2.360.111.870 \end{aligned}$$

**e. Present Value (PV) Tahun 1:**

$$\begin{aligned} PV_1 &= \frac{\text{Rp}2.360.111.870}{(1 + 0,10)^1} \\ &= \text{Rp} 2.145.556.245 \end{aligned}$$

Perhitungan berlanjut secara bertahap hingga tahun ke-10, yang dapat dirangkum pada Tabel 6.

**Tabel 6.** Perhitungan NPV Inverter Gardu Traksi

| Tahun | Revenue (Rp)  | Maintenance (Rp) | Depreciation (Rp) | Net Income (Rp) | Present Value (RP)     |
|-------|---------------|------------------|-------------------|-----------------|------------------------|
| 0     | -             | -                | -                 | -               | <b>(6.833.304.800)</b> |
| 1     | 3.259.039.000 | 340.000.000      | 683.330.480       | 1.676.781.390   | 2.145.556.245          |
| 2     | 3.259.039.000 | 357.000.000      | 683.330.480       | 1.664.031.390   | 1.939.974.265          |
| 3     | 3.259.039.000 | 374.850.000      | 683.330.480       | 1.650.643.890   | 1.753.579.539          |
| 4     | 3.259.039.000 | 393.592.500      | 683.330.480       | 1.636.587.015   | 1.584.552.138          |
| 5     | 3.259.039.000 | 413.272.125      | 683.330.480       | 1.621.827.296   | 1.431.273.610          |
| 6     | 3.259.039.000 | 433.935.731      | 683.330.480       | 1.606.329.592   | 1.292.354.625          |
| 7     | 3.259.039.000 | 455.632.518      | 683.330.480       | 1.590.057.001   | 1.166.626.865          |
| 8     | 3.259.039.000 | 478.414.144      | 683.330.480       | 1.572.970.782   | 1.052.789.913          |
| 9     | 3.259.039.000 | 502.334.851      | 683.330.480       | 1.555.030.252   | 949.276.215            |
| 10    | 3.259.039.000 | 527.451.594      | 683.330.480       | 1.536.192.694   | 855.389.549            |

Sumber : Data Riset

Kumulasi Total *Present Value* (Total PV tahun 1 hingga 10) menghasilkan nilai sebesar **Rp 15.171.472.964**. Maka pencarian akumulasi keuntungan proyek didapat dengan formulasi:

$$NPV = Total\ PV - Investasi\ Awal\ (I_0)$$

$$NPV = Rp\ 15.171.472.964 - Rp\ 6.833.304.800$$

$$NPV = Rp\ 8.338.168.164$$

Nilai NPV yang jauh bernilai positif mengindikasikan bahwa investasi perangkat inverter di Gardu Traksi memiliki fundamental arus kas yang sangat sehat dan mendatangkan keuntungan ekonomi absolut bagi korporasi.

#### 4. Analisis Strategi Implementasi Bisnis

Meski NPV bernilai positif, regulasi terkait ekspor daya listrik dari *regenerative braking* belum sepenuhnya diatur secara spesifik (merujuk pada ketiadaan pasal rigid di Perpres No. 112/2022). Hal ini memerlukan penentuan arah kebijakan strategis internal perusahaan menggunakan pemetaan Diagram *Effort-Impact*. Terdapat dua opsi implementasi:

- a. **Opsi 1 (Kuadran Quick Win):** MRT Jakarta mengundang kemitraan pihak ketiga atau skema *Business-to-Business* (B2B). Investor pihak ketiga menanggung 100% *Capital Expenditure* instalasi inverter dengan timbal balik pembayaran bertahap berupa persentase pembagian hasil (*revenue-sharing*) dari biaya kWh yang ditekan setiap tahun. Dalam opsi ini, MRT Jakarta meraih posisi *Zero Investment* sekaligus terbebas dari risiko dan biaya pemeliharaan.
- b. **Opsi 2 (Kuadran Major Projects),** MRT Jakarta membiayai seluruh nilai CAPEX melalui anggaran internal (*Internal Funding*). Risiko investasi dan O&M ditanggung sendiri, namun pendapatan (*revenue*) dapat ditingkatkan melalui perdagangan penekanan jejak karbon (*Carbon Trade*).

Berlandaskan pertimbangan risiko kas pada Diagram *Effort-Impact*, **Opsi 1 ditetapkan sebagai jalur paling strategis**. Pelaksanaan ini selaras dengan Rencana Jangka Panjang Perusahaan (RJPP) PT MRT Jakarta (Persero) tahun 2022–2030, di mana pengembangan energi alternatif dilaksanakan untuk menurunkan biaya *overhead* sekaligus menekan emisi  $Co^2$ .

#### KESIMPULAN

Berdasarkan analisis hasil simulasi spasial-kinetik dan perhitungan evaluasi keuangan yang telah dijabarkan, penelitian ini menarik beberapa kesimpulan utama:

1. Berdasarkan hasil penelitian dan pemodelan operasional, energi sisa buang dari proses *regenerative braking* yang terekam pada simulasi operasional kereta MRT Jakarta mampu mencapai suplai ekuivalen sebesar 400 MWh/bulan.
2. Konsumsi rata-rata daya listrik operasional MRT Jakarta berkisar di angka 1.702 MWh/bulan. Melalui penambahan subsistem inverter *grid-tied* berkapasitas 1000 kW pada arsitektur Gardu Traksi, sisa pengereman kereta dapat dikonversi kembali menjadi pasokan listrik AC 20 kV secara efisien, menghasilkan total efisiensi operasional sistem di angka 45,62%.
3. Analisis diskonto arus kas yang memperhitungkan laju inflasi operasional dan perpajakan membuktikan bahwa instalasi sistem ini memiliki nilai keekonomian yang sangat layak dengan cetakan *Net Present Value* (NPV) positif mencapai Rp 8,3 Miliar.

Sebagai tindak lanjut implementasi strategi bisnis, akuisisi teknologi ini dapat direalisasikan dengan menempuh skema Kemitraan Full Investasi (B2B). Pendekatan *Quick*

Win ini memungkinkan entitas perusahaan memperoleh efisiensi energi secara instan tanpa terekspos risiko modal awal (*Zero Investment*), sekaligus memposisikan MRT Jakarta dalam mencapai target bauran energi hijau nasional tahun 2030.

## REFERENSI

- [1] PT. MRT Jakarta (Perseroda). (2022). Operaion and Maintenance Document.
- [2] Perusahaan Listrik Negara (PT PLN Persero). (2025). Surat Perjanjian Jual Beli Tenaga Listrik (SPJBTL) dengan PT MRT Jakarta. Jakarta: Divisi Niaga dan Manajemen Pelanggan.
- [3] Secheron. (2021). Technical Specification: Secorvert MVDC Inverter for Regenerative Braking Energy Recovery. Geneva: Secheron SA.
- [4] Bae, C., & Lee, S. (2019). Control Algorithm for a Bidirectional Inverter in Railway Regenerative Braking Energy Recovery Systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 66(5), 3456-3465. <https://doi.org/10.1109/TIE.2018.2863201>
- [5] International Electrotechnical Commission. (2018). \*IEC 62888-2: Railway Applications – Energy Efficiency – Part 2: Energy Measurement and Management for Traction Systems\*. Geneva: IEC.
- [6] Robbins, S. P., & Coulter, M. (2021). *Management* (15th ed.). Pearson Education.
- David, F. R., & David, F. R. (2023). *Strategic Management: Concepts and Cases* (18th ed.). Pearson Education.
- [7] Blank, L., & Tarquin, A. (2022). *Engineering Economy* (9th ed.). McGraw-Hill Education.
- [8] Sullivan, W. G., Wicks, E. M., & Koelling, C. P. (2020). *Engineering Economy* (17th ed.). Pearson Education.
- [9] PT MRT Jakarta (Perseroda). (2025). *Data Konsumsi Energi Traksi Bulanan Tahun 2025*. Jakarta: Departemen Operasi dan Pemeliharaan.