



## Analisis Penambahan Teknologi Baterai pada *Diesel Electric Multiple Unit* (DEMU)

Romal Hadi Setyawan<sup>1</sup>, Muhammad Nizam<sup>2</sup>, Mufti Reza Aulia Putra<sup>3\*</sup>

<sup>1,2,3\*</sup> Program Studi Magister Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Sebelas Maret, Surakarta, Indonesia

<sup>1</sup>[romalhadi@student.uns.ac.id](mailto:romalhadi@student.uns.ac.id), <sup>2</sup>[muhammad.nizam@staff.uns.ac.id](mailto:muhammad.nizam@staff.uns.ac.id), <sup>3\*</sup>[muftireza@staff.uns.ac.id](mailto:muftireza@staff.uns.ac.id)

\*) [muftireza@staff.uns.ac.id](mailto:muftireza@staff.uns.ac.id)

**Abstrak**-Penelitian ini menganalisis dampak integrasi *Battery Energy Storage System* (BESS) berteknologi *Lithium Titanate Oxide* (LTO) berkapasitas 70 kWh pada sistem traksi *Diesel Electric Multiple Unit* (DEMU) yang beroperasi pada koridor Bandung Cimahi Padalarang. Dua permasalahan utama yang diselesaikan ialah: (1) energi pengereman regeneratif yang terbuang sebagai panas pada *brake resistor*, dan (2) keterbatasan respons daya mesin diesel pada fase akselerasi. Metode yang diterapkan adalah analisis teknis berbasis data *logger* operasional riil dengan resolusi temporal 0,5 detik dan simulasi numerik aliran daya pada DC *link* 1.500 VDC, mencakup 12 siklus perjalanan harian. Hasil menunjukkan bahwa integrasi baterai meningkatkan *traction effort* awal sebesar 18,1% (dari 82,75 kN menjadi 97,77 kN), mempercepat waktu akselerasi 0–25 km/h sebesar 26,7% (dari 24,54 detik menjadi 17,98 detik), dan meningkatkan akselerasi pada *notch* P7 sebesar 39,3%. Penghematan konsumsi bahan bakar mencapai 4,99 liter per siklus (7,14%), setara 21.856 liter per tahun. Energi regeneratif yang digunakan kembali mencapai 6,48 kWh per siklus. Reduksi emisi CO<sub>2</sub> mencapai 59.228 kg/tahun, ekuivalen penanaman 2.692 pohon. Analisis kelayakan investasi menghasilkan NPV positif Rp 192.064.475 dengan *payback period* 2,35 tahun, lebih pendek dari umur baterai 3,42 tahun. Penelitian ini menegaskan bahwa hibridisasi DEMU dengan BESS merupakan solusi yang secara simultan meningkatkan performa traksi, efisiensi energi, dan keberlanjutan lingkungan tanpa memerlukan elektrifikasi infrastruktur jalur.

**Kata Kunci:** Diesel Electric Multiple Unit (DEMU); Battery Energy Storage System (BESS); Pengereman Regeneratif; Performa Traksi; Emisi CO<sub>2</sub>.

**Abstract**-This study analyzes the impact of integrating a 70 kWh Lithium Titanate Oxide (LTO)-based Battery Energy Storage System (BESS) into the traction system of a Diesel Electric Multiple Unit (DEMU) operating on the Bandung–Cimahi–Padalarang corridor. Two primary problems are addressed: (1) regenerative braking energy wasted as heat in brake resistors, and (2) limited diesel engine power ramp-up response during acceleration. The methodology applies technical analysis based on real operational data loggers at 0.5-second resolution and numerical power flow simulation on a 1,500 VDC link across 12 daily trip cycles. Results show that battery integration increases initial traction effort by 18.1% (82.75 kN → 97.77 kN), reduces 0–25 km/h acceleration time by 26.7% (24.54 s → 17.98 s), and improves notch-P7 acceleration by 39.3%. Fuel savings reach 4.99 liters/cycle (7.14%), equivalent to 21,856 liters/year. Recovered regenerative energy is 6.48 kWh/cycle. CO<sub>2</sub> reductions total 59,228 kg/year, equivalent to planting 2,692 trees. Investment analysis yields a positive NPV of IDR 192,064,475 with a 2.35-year payback period, within the 3.42-year battery service life.

**Keywords:** Diesel Electric Multiple Unit (DEMU); Battery Energy Storage System (BESS); Regenerative Braking; Traction Performance; CO<sub>2</sub> Emission.

### 1. PENDAHULUAN

Dalam era transisi menuju transportasi berkelanjutan, peningkatan efisiensi energi dan pengurangan emisi gas buang menjadi isu krusial di berbagai sektor, termasuk pada moda transportasi kereta api. Hal ini juga didukung oleh berbagai studi global yang menekankan pentingnya dekarbonisasi sektor transportasi melalui peningkatan efisiensi energi dan pemanfaatan teknologi elektrifikasi [1], [2]. Salah satu referensi keberhasilan dalam meningkatkan efisiensi energi adalah teknologi mobil hybrid yang mampu mengoptimalkan penggunaan energi melalui kombinasi mesin pembakaran internal, motor listrik, dan sistem penyimpanan energi [3]. Hal ini diperkuat oleh penelitian yang menunjukkan bahwa hybrid energy storage system (HESS) yang mengombinasikan baterai berenergi tinggi dan ultrakapasitor berdaya tinggi mampu mengoptimalkan distribusi daya, mengurangi degradasi baterai, dan meningkatkan efisiensi sistem secara keseluruhan melalui strategi manajemen energi [4]. Melalui penerapan *regenerative braking*, energi kinetik saat pengereman dapat dikonversi kembali menjadi energi listrik





untuk disimpan dan digunakan kembali, sehingga terbukti mampu meningkatkan efisiensi energi sekaligus menurunkan emisi karbon [5]. Hal ini menunjukkan bahwa pendekatan efisiensi energi dan manajemen daya pada sistem hybrid memiliki potensi besar untuk diadaptasi dan diimplementasikan pada sistem transportasi rel, khususnya dalam upaya meningkatkan performa dan efisiensi operasional.

Konsep efisiensi dan manajemen energi pada mobil hybrid tersebut dapat menjadi inspirasi dalam pengembangan *Diesel Electric Multiple Unit* (DEMU) di Indonesia. DEMU merupakan jenis kereta berpengerak yang menggunakan mesin diesel sebagai sumber tenaga utama untuk menggerakkan alternator listrik, yang kemudian menyuplai daya ke motor traksi listrik dan beban *auxiliary* [6]. Hal ini sejalan dengan tren global yang menunjukkan bahwa sektor transportasi rel menjadi salah satu fokus utama dalam upaya dekarbonisasi melalui peningkatan efisiensi energi dan elektrifikasi sistem transportasi [7]. Didukung oleh berbagai penelitian yang menunjukkan bahwa proses hibridisasi pada *diesel multiple unit* dengan mengintegrasikan sistem penyimpanan energi listrik mampu meningkatkan efisiensi energi melalui pemanfaatan energi regeneratif serta menghasilkan penghematan konsumsi bahan bakar yang signifikan pada berbagai profil operasi kereta [8], [9]. Saat ini, DEMU telah dikembangkan dan dioperasikan pada berbagai layanan transportasi, seperti rute Madiun–Bandara Adisoemarmo, Feeder Kereta Cepat Indonesia, KA Bandara Yogyakarta International Airport (YIA), serta KA Bandara Internasional Minangkabau.

Meskipun demikian, sistem DEMU eksisting masih memiliki beberapa keterbatasan yang berdampak pada efisiensi energi dan performa operasional [10]. Kelemahan pertama adalah belum optimalnya pemanfaatan energi dari pengereman regeneratif. Pada konfigurasi saat ini, energi kinetik yang diubah menjadi energi listrik oleh motor traksi selama proses deselerasi tidak dapat disimpan dalam sistem apa pun, melainkan seluruhnya dibuang sebagai panas melalui brake resistor [11]. Kondisi ini menyebabkan pemborosan energi yang terjadi secara berulang sepanjang perjalanan, dan menjadi semakin signifikan pada rute dengan frekuensi pemberhentian yang tinggi [12]. Studi Leoutsakos et al. menunjukkan bahwa potensi energi regeneratif yang terbuang pada sistem dengan karakteristik operasional serupa dapat mencapai 15–30% dari total energi traksi yang digunakan [13].

Kelemahan kedua terletak pada karakteristik ramp-up power mesin diesel yang terbatas. Mesin diesel memerlukan waktu untuk meningkatkan putaran mesin (RPM) sebelum alternator mampu menyuplai daya traksi secara penuh ke sistem inverter [13]. Hal ini didukung oleh penelitian yang menunjukkan bahwa penerapan sistem hibrid dan optimasi manajemen energi mampu meningkatkan efisiensi operasi serta menurunkan konsumsi bahan bakar dan emisi gas buang [14]. Keterlambatan respons ini menyebabkan adanya jeda dalam peningkatan daya traksi, yang dalam beberapa kasus terukur sebagai *delay notch* traksi hingga beberapa detik [15]. Dampaknya adalah performa akselerasi awal menjadi kurang optimal, terutama pada rute dengan jarak antarstasiun yang pendek dan tingkat kepadatan operasi yang tinggi [16]. Hal ini juga menimbulkan perbedaan performa yang cukup signifikan dibandingkan dengan Kereta Rel Listrik (KRL) yang memiliki respons akselerasi lebih cepat.

Sebagai solusi atas permasalahan tersebut, penerapan Teknologi Baterai berkembang sebagai pendekatan yang komprehensif dan efektif. Dalam sistem traksi berbasis DC link, baterai memiliki peran ganda, yaitu sebagai *peak power buffer* yang mampu menyuplai tambahan daya secara instan saat akselerasi, serta sebagai *energy sink* yang menyerap dan menyimpan energi hasil pengereman regeneratif saat deselerasi [17]. Dengan demikian, BESS tidak hanya menggantikan fungsi brake resistor dalam membuang energi, tetapi juga memungkinkan pemanfaatan kembali energi tersebut untuk meningkatkan efisiensi sistem secara keseluruhan.

Selain meningkatkan efisiensi energi dan performa traksi, integrasi teknologi baterai juga memberikan manfaat tambahan yang signifikan, yaitu memungkinkan penerapan strategi mesin mati saat kereta berhenti di stasiun (*stabling*) [18]. Dalam kondisi ini, baterai dapat menyuplai seluruh kebutuhan daya *auxiliary* seperti sistem pendingin udara, pencahayaan, dan kompresor, sehingga mesin diesel dapat dimatikan sepenuhnya selama periode berhenti [19], [20]. Strategi ini tidak hanya mengurangi konsumsi bahan bakar pada kondisi *idle* yang memiliki efisiensi rendah, tetapi juga berkontribusi terhadap penurunan emisi gas buang, tingkat kebisingan, serta peningkatan kualitas lingkungan di area stasiun.

Meskipun penelitian terkait penerapan BESS pada transportasi rel telah berkembang di berbagai negara, kajian yang secara spesifik membahas integrasi BESS pada DEMU dengan sistem DC link 1.500 VDC dalam konteks operasional perkeretaapian Indonesia masih relatif terbatas. Sebagian besar penelitian yang ada lebih berfokus pada sistem Kereta Rel Listrik (KRL) pada jalur yang telah sepenuhnya terelektifikasi, sehingga tidak dapat secara langsung diaplikasikan pada sistem DEMU yang masih bergantung pada mesin diesel sebagai sumber energi utama. Oleh karena itu, diperlukan penelitian yang berbasis pada data operasional riil untuk menghasilkan analisis yang lebih relevan dan aplikatif terhadap kondisi di lapangan.

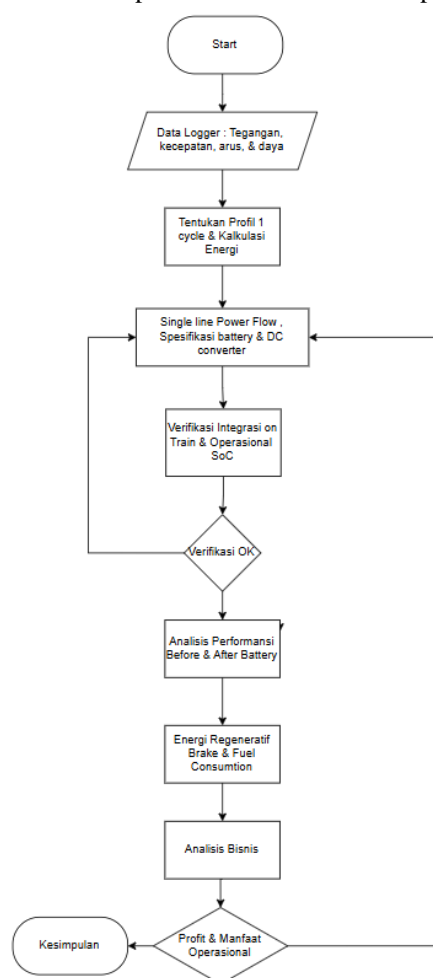
Penelitian ini bertujuan untuk menyusun arsitektur integrasi BESS yang optimal pada sistem traksi DEMU berbasis DC link 1.500 VDC, menentukan kapasitas baterai yang paling sesuai berdasarkan karakteristik operasional riil,



mengkuantifikasi peningkatan performa traksi, menganalisis pemanfaatan energi regeneratif serta penghematan bahan bakar dan reduksi emisi secara kuantitatif, serta mengevaluasi kelayakan finansial investasi sistem hybrid menggunakan metode *Net Present Value* (NPV) dan *Payback Period*. Dengan demikian, hasil penelitian ini dapat memberikan kontribusi nyata dalam pengembangan teknologi perkeretaapian yang lebih efisien, ramah lingkungan, dan berkelanjutan di Indonesia.

## 2. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini merupakan penelitian terapan yang mengombinasikan data pengukuran parameter sarana (data Logger) selama operasional. Data primer berupa data *Train Control and Monitoring System* (TCMS) meliputi kecepatan, traksi, RPM engine, tegangan dan arus listrik serta spesifikasi teknis komponen utama [21]. Analisis dilakukan untuk perhitungan performa traksi dan efisiensi energi. Alur penelitian yang meliputi: identifikasi masalah dan studi literatur; pengumpulan data teknis dan operasional dari data logger; pemodelan sistem DEMU eksisting dan validasi model dalam bentuk single line; perancangan kapasitas dan spesifikasi BESS; integrasi model BESS ke sistem melalui DC link; simulasi dan perbandingan performa; serta analisis kelayakan ekonomi. Perhitungan running resistance mengacu pada standar JIS E 6002 dengan persamaan empiris:  $R = (1,65 + 0,0247V)W_m + (0,78 + 0,0028V)W_t + (0,028 + 0,0078(n-1))V^2$ , detail alur penelitian di tuangkan pada diagram alur pada gambar 1, sehingga luaran penelitian ini dapat memberikan manfaat operasional.



**Gambar 1.** Flowchart Metodologi Penelitian

Data primer diperoleh dari data logger yang dipasang pada sistem traksi DEMU, merekam parameter operasional secara real-time dengan resolusi temporal 0,5 detik selama 12 jam operasional (pukul 10.00–22.00), yang

mencakup 12 siklus perjalanan penuh. Variabel yang direkam meliputi: kecepatan kereta (km/h), daya total motor traksi (kW), daya VVVF inverter (kW), posisi notch traksi, tegangan DC link (VDC), arus regen pada brake resistor (A), daya static inverter auxiliary (kW), dan akumulasi energi (kWh). Data logger juga mencatat RPM mesin diesel dan status engine on/off.

Validasi konsumsi bahan bakar dilakukan dengan membandingkan estimasi berbasis data sheet Cummins QSK45 dengan pembacaan riil dari fuel flow meter CAN TRAK. Hasil validasi menunjukkan kesesuaian yang baik: konsumsi tervalidasi pada kondisi stabling (16 L/jam pada 900 RPM, dan full power (104 L/jam pada 1.800 RPM, error < 2,5%). Energi regeneratif dihitung secara numerik menggunakan metode integrasi trapesoid dari persamaan  $P(t) = V(t) \times I(t)$ , di mana  $V(t)$  adalah tegangan DC link dan  $I(t)$  adalah arus yang mengalir pada brake resistor selama fase deselerasi. Karakteristik teknis sistem DEMU eksisting secara lengkap disajikan pada tabel 1. Pada tabel 1 data bersumber dari hasil data logger maupun datasheet komponen.

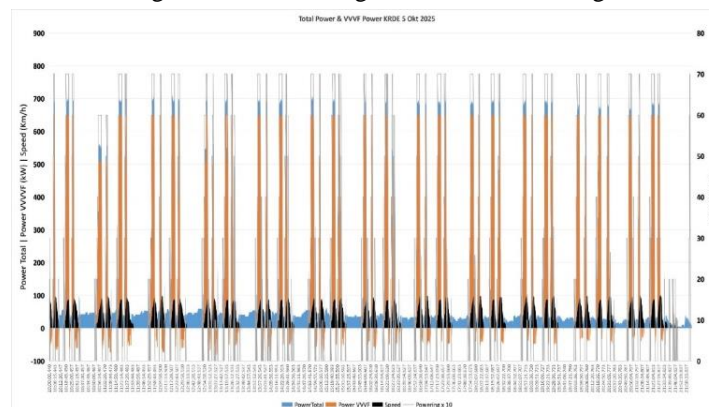
**Tabel 1.** Karakteristik Teknis Sistem DEMU Eksisting

No	Parameter	Nilai	Satuan	Keterangan
1	Daya Mesin Diesel (2 unit)	$2 \times 550$	kW	Cummins QSK45
2	Tegangan DC Link	1.500	VDC	Variabel 1000- 1900 VDC
3	Daya VVVF Inverter (aktual)	$2 \times 325$	kW	Rated: $2 \times 400$ kW
4	Daya Motor Traksi (4 unit)	$4 \times 192,5$	kW	Potensi total: 774,8 kW
5	Daya Static Inverter Auxiliary	$2 \times 110$	kVA	AC, Lighting, Kompresor
6	Berat Tare Total Rangkaian	211,51	Ton	Konfigurasi TeC1–M–T–TeC2, 4 kereta
7	Efisiensi Alternator	0,929	—	Datasheet
8	Efisiensi Rectifier	0,97	—	Datasheet
9	Efisiensi VVVF Inverter	0,98	—	Datasheet
10	Efisiensi Motor Traksi	0,92	—	Datasheet

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

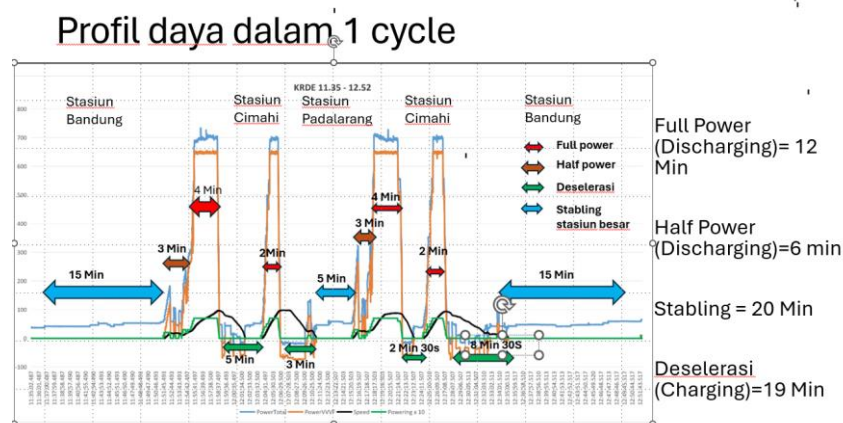
#### 3.1 Profil Daya DEMU

Profil DEMU pada rute Bandung–Cimahi–Padalarang ( $\pm 18$  km) selama periode 12 jam (10.00–22.00 WIB) terdiri dari 12 siklus perjalanan. Setiap siklus menunjukkan empat fase utama: akselerasi, kecepatan konstan, pengereman, dan berhenti di stasiun (*Stabling*). Pada fase akselerasi, daya total mencapai kisaran  $\pm 700$ –800 kW sebagai respons terhadap kebutuhan energi besar untuk mengatasi inersia awal rangkaian.



**Gambar 2.** Profil DEMU Periode 12 Jam Bandung-Cimahi-Padalarang

Pada gambar 2 menunjukkan bahwa profil daya cenderung berulang, hal ini sangat penting untuk menentukan 1 cycle pengosongan dan pengisian baterai. dalam satu siklus perjalanan rute Bandung–Cimahi–Padalarang–Cimahi–Bandung pada gambar 3, distribusi waktu operasi adalah sebagai berikut: *fase full power* (discharging maksimum) berlangsung 12 menit, *half power* (discharging parsial) 6 menit, sehingga total waktu pelepasan energi baterai mencapai 18 menit. Fase deselerasi (charging regeneratif) berlangsung 19 menit dan stabling di stasiun 20 menit.



**Gambar 3.** Profil Daya Traksi DEMU dalam 1 Cycle Operasi Bandung–Cimahi–Padalarang

Hasil analisis profil daya dalam satu siklus operasi lintas Bandung–Cimahi–Padalarang–Cimahi–Bandung menunjukkan bahwa *fase discharging* baterai terdiri atas *full power* selama 12 menit dan *half power* selama 6 menit, dengan total waktu pelepasan energi sebesar 18 menit. Sementara itu, fase charging melalui regenerative braking berlangsung selama 19 menit, serta fase stabling di stasiun selama 20 menit. Perbandingan waktu discharging terhadap charging sebesar 0,95 mengindikasikan keseimbangan energi dalam satu siklus operasi, di mana energi yang digunakan saat akselerasi hampir sepenuhnya dapat dipulihkan kembali melalui proses regenerative braking. Secara keseluruhan, satu siklus operasi DEMU menunjukkan distribusi waktu sebagai berikut:

- *Full power (Discharging maksimum)* : ±12 menit
- *Half power (Discharging parsial)* : ±6 menit
- *Stabling (Kecepatan konstan)* : ±20 menit
- *Deselerasi (Charging/regeneratif)* : ±19 menit

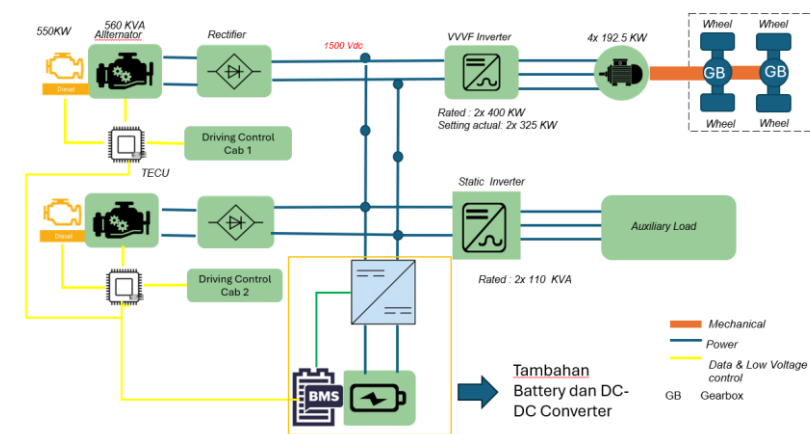
Arsitektur sistem DEMU hybrid yang dimodelkan menempatkan BESS sebagai elemen tambahan yang terhubung ke DC link 1.500 VDC melalui bidirectional DC-DC converter. Kerangka berpikir operasionalnya adalah sebagai berikut. Saat fase akselerasi (notch powering aktif), BESS melakukan discharging untuk menyuplai daya tambahan ke inverter VVVF, sehingga total daya traksi meningkat melampaui kapasitas mesin diesel saja. Saat fase deselerasi, motor traksi berfungsi sebagai generator yang mengembalikan energi kinetik ke DC link, yang kemudian diserap oleh BESS melalui DC-DC converter (charging). Saat kondisi stabling di stasiun (kecepatan = 0 km/h), BESS menyuplai seluruh beban auxiliary melalui static inverter sehingga mesin diesel dapat dinonaktifkan. Profil satu siklus operasi lengkap diidentifikasi dari data logger dan dikategorikan ke dalam empat fase operasi, sebagaimana dirangkum pada tabel 2. Profil tabel 2 guna memastikan tidak terjadi kekurangan energi battery guna mendukung operasional.

**Tabel 2.** Profil Fase Operasi dalam Satu Siklus Perjalanan (77 Menit)

No	Fase Operasi	Daya (kW)	Durasi	Keterangan
1	Akselerasi Full Power	124,8	12 menit	Discharging — baterai menyuplai daya tambahan traksi penuh; setara 0,20 jam
2	Akselerasi Half Power	62,4	6 menit	Discharging — baterai menyuplai separuh daya tambahan; setara 0,10 jam
3	Stabling Stasiun Besar	60	20 menit	Discharging — mesin diesel OFF; seluruh beban auxiliary (AC, lighting, kompresor) disuplai baterai; setara 0,33 jam
4	Deselerasi	210	19 menit	Charging — energi regeneratif + engine menyuplai baterai; setara 0,316 jam; potensi regen 6,48 kWh/siklus
5	Energi Auxiliary Stabling	—	20 menit	19 kWh total per siklus; A→B: 14 kWh (15 menit pertama); C→D: 5 kWh (stasiun Padalarang)

### 3.2 Pemodelan Power Flow dan Spesifikasi Baterai

Sistem DEMU hybrid dirancang dengan mengintegrasikan dua sumber energi utama, yaitu engine diesel dan BESS, yang terhubung melalui rectifier dan DC-DC converter menuju DC Link 1500 VDC sebelum disalurkan ke inverter traksi. Sesuai gambar 4, mesin diesel berfungsi sebagai pemasok daya dasar (base load), sedangkan baterai berperan sebagai sumber daya tambahan yang mampu merespons kebutuhan daya secara cepat, khususnya saat akselerasi atau lonjakan beban. Total potensi daya motor traksi adalah  $4 \times 193,7 \text{ kW} = 774,8 \text{ kW}$ . Namun, setting aktual VVVF hanya  $2 \times 325 \text{ kW} = 650 \text{ kW}$ . Selisih daya yang dapat dimanfaatkan baterai adalah  $774,8 - 650 = 124,8 \text{ kW}$ , dengan mempertimbangkan waktu charging–discharging, dibutuhkan C-rate  $\leq 2C$ . Single line diagram pada gambar 4 menunjukkan integrasi baterai pada DEMU


**Gambar 4.** KRDE Hybrid Power Flow

Perhitungan kebutuhan energi baterai: energi saat akselerasi =  $124,8 \times 0,2 + 62,4 \times 0,1 = 31,22 \text{ kWh}$  (traksi) + energi *auxiliary stabling*. Total energi *discharging* sebesar 50,2 kWh, ditambah toleransi operasional 5% menjadi 52,71 kWh. Mempertimbangkan DoD 80% dan efisiensi DC-DC converter 96%, kebutuhan kapasitas baterai aktual adalah 68,625 kWh, sehingga dipilih kapasitas 70 kWh.

Spesifikasi baterai yang direkomendasikan adalah tipe *Lithium Titanate Oxide* (LTO) dengan kapasitas 70 kWh, C-rate 2C–3C, tegangan DC Link 1500 VDC, dan berat sistem terintegrasi  $\pm 2$  ton ( $70.000 \text{ Wh} \div 58 \text{ Wh/kg} = 1.260 \text{ kg}$  untuk sel, ditambah komponen pendukung). LTO dipilih karena kemampuan fast charging, umur siklus panjang, stabilitas termal tinggi, dan keandalan pada aplikasi transportasi rel. Detail spesifikasi battery dirangkum dalam tabel 3.

**Tabel 3.** Spesifikasi Baterai yang Direkomendasikan

No	Parameter	Nilai
1	Kapasitas Energi	70 kWh
2	Tipe Baterai	LTO (Lithium Titanate Oxide)
3	C-Rate	2C – 3C
4	Tegangan DC Link	1500 VDC
5	Depth of Discharge (DoD)	80%
6	Berat Sistem Total	±2 ton
7	Peak Power	245 kW

Verifikasi *Simulasi State of Charge* (SOC) menunjukkan bahwa baterai 70 kWh mampu menyerap energi regeneratif dengan total 66,5 kWh dalam satu siklus operasi. SOC tetap berada dalam rentang aman 62,2% hingga 100%, membuktikan kapasitas mencukupi tanpa kondisi *over-discharge* maupun *over-charge*.

### 3.2.1 Spesifikasi Teknis Baterai dan Komponen Pendukung

Baterai dirancang menggunakan modul Pulse 2.5 (*Forsee Power*) dengan kapasitas 2,5 kWh per modul. Konfigurasi yang ditetapkan adalah  $2 \times 14S$  (dua string paralel, masing-masing 14 modul seri), menghasilkan total kapasitas 70 kWh dengan tegangan nominal 770 VDC per string. DC-DC converter yang direferensikan adalah DCUHV MP (*BrightLoop*) sebuah *bidirectional buck-boost converter* dengan rentang tegangan 0–2.400 VDC, daya 250 kW, efisiensi 98,9%, dan sertifikasi IP67 untuk ketahanan lingkungan. Spesifikasi lengkap sistem baterai disajikan pada tabel 4.

**Tabel 4.** Spesifikasi Teknis Sistem Baterai 70 kWh

Parameter	Nilai	Keterangan
Kapasitas Energi	70 kWh	Memenuhi kebutuhan minimum 68,63 kWh dengan margin
Teknologi Sel	Li-ion LTO	Pulse 2.5 High-Power Module ( <i>Forsee Power</i> )
Energi per Modul	2,5 kWh	Tegangan nominal: 55 V; end of charge: 65 V
Konfigurasi	$2 \times 14S$	28 modul total; 2 string paralel, 14 modul seri masing-masing; 35 kWh/string
C-Rate Puncak	Up to 3C	Peak power 245 kW; continuous (RMS) 124 kW; mendukung kebutuhan 124,8 kW
Tegangan Nominal (14S)	770 VDC	Dihubungkan ke DC link 1.500 V via DC-DC converter bidireksional
Specific Energy	58 Wh/kg	Berat baterai ±1.260 kg; total sistem (+ BMS + DC-DC): ±2.000 kg
Umur Siklus	> 15.000 siklus	Pada DOD 100%, kondisi 3C/3C; setara ±3,42 tahun (12 siklus/hari)
DC-DC Converter	DCUHV MP BrightLoop	250 kW, 0–2.400 VDC, bidireksional, efisiensi 98,9%, IP67
Battery Management System	BMS Terintegrasi	Kontrol SOC, proteksi over-charge/discharge, antarmuka ke TECU

Pada sistem DEMU konvensional, suplai daya ke motor traksi sepenuhnya bergantung pada engine diesel yang memerlukan waktu untuk meningkatkan RPM, sehingga tegangan DC link naik secara bertahap dan membatasi respons awal inverter VVVF serta torsi motor. Sebaliknya, pada sistem DEMU hybrid dengan *Battery Energy Storage System* (BESS), baterai mampu menyuplai energi secara instan ke DC link tanpa bergantung pada peningkatan RPM engine.

Hal ini memungkinkan inverter VVVF segera memberikan daya optimal ke motor traksi, sehingga menghasilkan torsi awal yang lebih besar, meningkatkan kemampuan ramp-up power, serta memperbaiki respons traksi dan akselerasi. Dengan demikian, sistem hybrid memberikan peningkatan signifikan terhadap performa operasional dibandingkan sistem konvensional.

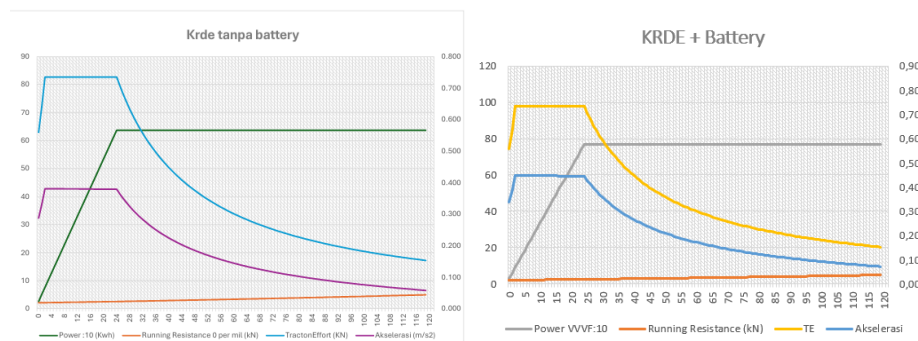
### 3.3 Performance Calculation

Berdasarkan hasil simulasi dengan data aktual DEMU, seluruh parameter performa mengalami peningkatan signifikan setelah integrasi sistem baterai 70 kWh (2C) pada DC Link 1500 VDC sesuai dengan tabel 5 dan detail performansi pada Gambar 5.

**Tabel 5.** Perbandingan Performansi DEMU Eksisting dan DEMU Hybrid

Parameter	DEMU Eksisting	DEMU + Baterai	Peningkatan
Traction Effort (0–25 km/jam)	82,75 kN	97,77 kN	+18,15%
Akselerasi Awal	0,37 m/s <sup>2</sup>	0,44 m/s <sup>2</sup>	+18,92%
Akselerasi Notch P7	0,28 m/s <sup>2</sup>	0,39 m/s <sup>2</sup>	+39,29%
Waktu Akselerasi 0–25 km/jam	24,54 detik	17,98 detik	-26,73%
Output Daya VVVF	650 kW	768 kW	+18,15%
Delay Ramp-up Engine	6 detik	2 detik	Lebih cepat

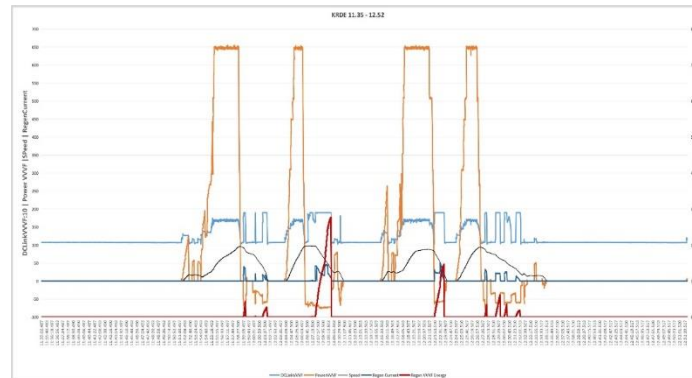
Pada gambar 5 *Traction effort* meningkat dari 82,75 kN menjadi 97,77 kN (peningkatan 18,15%) karena baterai mampu memberikan tambahan suplai daya instan sebesar  $\pm 124,8$  kW tanpa bergantung pada respons mekanis engine diesel. Akselerasi notch P7 meningkat paling signifikan sebesar 39,29%, karena *delay ramp-up engine* berkurang dari 6 detik menjadi 2 detik. Baterai dapat langsung menyuplai energi listrik ke DC Link tanpa harus menunggu peningkatan RPM engine. Waktu akselerasi 0–25 km/jam berkurang dari 24,54 detik menjadi 17,98 detik (pengurangan 26,73%), memiliki implikasi langsung pada efisiensi operasional karena headway antar kereta berpotensi dipersingkat. Output daya VVVF meningkat dari 650 kW menjadi 768 kW, mendekati kapasitas maksimum motor traksi 774,8 kW.



**Gambar 5.** Grafik Karakteristik Traksi KRDE (sebelum-sesudah penambahan Baterai)

### 3.4 Fuel Consumption

Energi regeneratif yang dihasilkan sebesar 6,48 kWh per siklus berkontribusi terhadap pengurangan konsumsi bahan bakar melalui penyimpanan pada sistem BESS dan pemanfaatannya kembali pada fase akselerasi, sehingga beban kerja engine diesel dapat dikurangi.

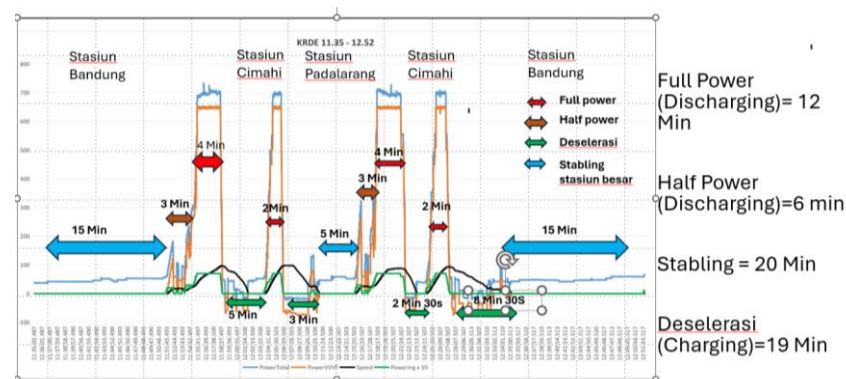


**Gambar 6.** Energi Regeneratif 1 Cycle

Gambar 6 menunjukkan Perhitungan energi regeneratif dalam satu siklus operasional DEMU dilakukan berdasarkan data logger berupa arus regeneratif dan tegangan DC link. Daya regeneratif dihitung secara instan menggunakan hubungan  $P(t) = V(t) \cdot I(t)$ , kemudian diintegrasikan terhadap waktu untuk memperoleh energi total. Hasil kalkulasi menunjukkan bahwa energi regeneratif yang dihasilkan mencapai 6,48 kWh per siklus.

Energi ini sebelumnya terdistribusi sebagai panas pada brake resistor, namun melalui integrasi *Battery Energy Storage System* (BESS) dapat disimpan dan dimanfaatkan kembali pada fase akselerasi. Pemanfaatan energi regeneratif tersebut berkontribusi terhadap peningkatan efisiensi sistem traksi, pengurangan beban engine diesel, serta mendukung operasional DEMU yang lebih efisien dan ramah lingkungan.

Integrasi sistem BESS memberikan dampak langsung pada pengurangan konsumsi bahan bakar melalui tiga mekanisme utama: load leveling saat akselerasi, eliminasi idle engine saat stabling, dan pemanfaatan energi regeneratif.



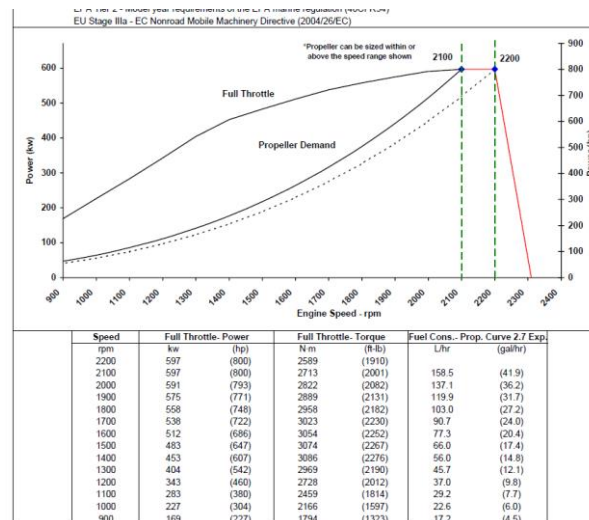
**Gambar 7.** Fuel Consumption KRDE

**Tabel 6.** Distribusi Waktu Operasi dalam Satu Siklus DEMU

TOTAL 1 CYCLE	MENIT	JAM
1 cycle	57	0.9
Stabling	20	0.33
Akselerasi Full Power	12	0.20
Akselerasi Half	6	0.10
Deselerasi	19	0.32

Pada gambar 7 dan tabel 6 kondisi beban puncak, baterai menyuplai tambahan daya 124,8 kW sehingga engine tidak bekerja pada kondisi overload. Hal ini menurunkan konsumsi bahan bakar saat peak power, meningkatkan efisiensi pembakaran karena engine bekerja pada rentang optimal, dan mengurangi *fuel spike* saat *throttle* tinggi. Dalam satu siklus operasi, kondisi stabling berlangsung ±20 menit dan deselerasi ±19 menit, artinya hampir 39 menit engine tidak perlu bekerja penuh. Pada sistem konvensional, engine tetap hidup saat stabling untuk

menyuplai beban auxiliary (AC, lighting, kompresor, sistem kontrol). Dengan BESS, beban auxiliary dialihkan ke baterai sehingga engine dapat dimatikan selama stabling, menghilangkan konsumsi solar saat idle, mengurangi kebisingan di area stasiun, dan menekan emisi lokal. Berdasarkan datasheet engine QSK45 dapat diketahui kebutuhan konsumsi bahan bakar berdasarkan daya engine yang di hasilkan sesuai dengan gambar 8.



**Gambar 8.** Daya fungsi bahan bakar per satuan waktu

Energi regeneratif yang berhasil dipulihkan mencapai 6,48 kWh per siklus operasi, dihitung menggunakan persamaan  $P(t) = V(t) \times I(t)$  dan  $E = \int P(t)dt$  berdasarkan data logger arus regeneratif dan tegangan DC Link. Energi ini sebelumnya terbuang sebagai panas pada brake resistor, kini dapat disimpan dan dimanfaatkan kembali untuk mendukung kebutuhan daya pada fase akselerasi berikutnya. Penggunaan Teknologi battery mampu menghemat 4.99 liter (7,14 %) dalam 1 cycle, maka dalam 1 hari 12 cycle=59.88 Liter. Detail perbandingan konsumsi bahan bakar terdapat pada tabel 7

**Tabel 7.** Perbandingan Konsumsi Bahan Bakar dan Energi Regeneratif pada Sistem DEMU dengan dan tanpa Baterai

Kondisi	Parameter	BBM (liter)	Total (liter)	Keterangan
Tanpa Battery	Stabling	10.667	69.80	
	Akselerasi Full Power	41.600		
	Akselerasi Half	7.400		
	Deselerasi	10.133		
Battery	Stabling (engine Off)	0	64.810	Energy Regen (KwH) 6.48
	Akselerasi Full Power	41.600		Total Energy 1 Cycle (KwH) 51.200
	Akselerasi Full Power	7.400		Energy Charging Engine (KwH) 44.350
	Deselerasi Charging	12.322		Charging Time @ 210Kwh (jam) 0.211
	Deselerasi saat Battery Fuel	3.488		Total waktu Deselerasi (jam) 0.320
				Waktu deselerasi tanpa charging(jam) 0.109

Berdasarkan tabel 7, konversi energi bahan bakar solar dilakukan berdasarkan nilai kalor bersih (*Net Calorific Value/NCV*) sebesar 43 MJ/kg dengan densitas rata-rata 0,85 kg/liter, sehingga diperoleh energi sebesar 36,55 MJ/liter atau setara dengan 0,00003655 TJ/liter. Berdasarkan faktor emisi sebesar 74.100 kg CO<sub>2</sub>/TJ, diperoleh nilai emisi sebesar 2,71 kg CO<sub>2</sub> per liter solar. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa pengurangan konsumsi



bahan bakar melalui penerapan sistem hybrid memberikan dampak signifikan terhadap penurunan emisi. Dengan asumsi penghematan bahan bakar sebesar 59,88 liter per hari (12 siklus operasi), diperoleh reduksi emisi harian sebesar 162,27 kg CO<sub>2</sub>, atau setara dengan 59.228,302 kg CO<sub>2</sub> per tahun. Nilai ini ekuivalen dengan kemampuan penyerapan karbon oleh sekitar 2.692 pohon, dengan asumsi satu pohon mampu menyerap 22 kg CO<sub>2</sub> per tahun. Hasil ini menunjukkan bahwa integrasi sistem *Battery Energy Storage System* (BESS) tidak hanya meningkatkan efisiensi energi, tetapi juga memberikan kontribusi signifikan terhadap pengurangan emisi dan keberlanjutan lingkungan.

### 3.5 Kajian Bisnis

Kajian bisnis penerapan sistem BESS pada DEMU mempertimbangkan aspek Capital Expenditure (CAPEX), potensi penghematan operasional, Net Present Value (NPV), dan Payback Period. Analisis ini menjadi dasar evaluasi kelayakan ekonomis investasi teknologi baterai.

#### 3.5.1 Komponen CAPEX

Berikut detail rincian komponen CAPEX

**Tabel 8.** Komponen Investasi Utama Sistem BESS pada DEMU

Komponen	Nilai	Satuan	Keterangan
Sistem Battery LTO (70 kWh)	680.000.000	Rp	Termasuk BMS
Power Converter (210 kW)	300.000.000	Rp	Sistem konversi daya
Instalasi & Integrasi	98.000.000	Rp	±10% dari komponen
<b>Total Investasi (CAPEX)</b>	<b>1.078.000.000</b>	Rp	Total biaya awal sistem
Siklus Operasi	12	siklus/hari	Operasional harian
Penghematan BBM per Siklus	4.99	Liter	Efisiensi sistem hybrid
Penghematan BBM Harian	59.88	Liter	Akumulasi 12 siklus
Penghematan BBM Tahunan	21,856.2	Liter	Total per tahun
Harga BBM	20,950	Rp/liter	Harga industry
<b>Penghematan Tahunan</b>	<b>457.887.390</b>	Rp	Efisiensi biaya operasional
Siklus Umur Baterai	15,000	Siklus	Lifetime sistem

Berdasarkan tabel 8 Komponen investasi utama mencakup: sistem baterai LTO 70 kWh (termasuk BMS dan packaging), DC-DC *bidirectional converter* 150 kW, sistem pengkabelan dan integrasi DC Link 1500 VDC, *engineering* dan *commissioning*, serta modifikasi struktur Trailer Car untuk penempatan baterai (beban tambahan ±2 ton). Total CAPEX diestimasi berdasarkan harga pasar baterai LTO dengan kapasitas 70 kWh membutuhkan total investasi sebesar Rp 1.078.000.000. Investasi ini terdiri dari tiga komponen utama, yaitu sistem baterai, power converter, serta biaya instalasi dan integrasi. Komponen terbesar berasal dari sistem baterai LTO yang mencakup biaya sel baterai dan Battery Management System (BMS) dengan total sebesar Rp 680.000.000. Selanjutnya, *power converter* dengan kapasitas 210 kW membutuhkan biaya sebesar Rp 300.000.000. Sementara itu, biaya instalasi dan integrasi dihitung sebesar 10% dari total biaya komponen utama, yaitu Rp 98.000.000. Dari sisi operasional, sistem ini mampu melakukan 12 siklus per hari dengan total energi yang diproses sebesar 4.99 liter per siklus atau setara dengan 59.88 liter per hari, dan mencapai 21.856,2 liter per tahun. Dengan asumsi harga BBM industri sebesar Rp 20.950 per liter, maka potensi penghematan operasional mencapai Rp 457.887.390 per tahun. Hasil ini menunjukkan bahwa investasi sistem baterai memberikan dampak signifikan terhadap efisiensi biaya operasional jangka panjang, terutama melalui pengurangan konsumsi bahan bakar.

#### 3.5.2 Potensi Penghematan Operasional

Penghematan operasional bersumber dari tiga mekanisme. Pertama, pengurangan konsumsi BBM: dengan eliminasi idle engine selama 20 menit per siklus dan pengurangan beban puncak, diestimasi penghematan bahan bakar sebesar 15–20% dari konsumsi harian. Kedua, pemanfaatan energi regeneratif 6,48 kWh per siklus yang setara dengan energi yang tidak perlu dibangkitkan engine. Ketiga, pengurangan biaya pemeliharaan engine akibat berkurangnya jam kerja pada beban tinggi, yang berpotensi memperpanjang *interval overhaul engine*.

#### 3.5.3 Analisis Payback Period dan NPV

Dengan mengasumsikan operasi 12 siklus per hari selama 365 hari, total energi regeneratif yang dipulihkan mencapai  $6,48 \times 12 \times 365 = 28.382$  kWh per tahun. Jika penghematan BBM diestimasi sebesar 15% dari konsumsi





diesel tahunan yang mencapai sekitar 150.000–200.000 liter per trainset, penghematan setara 22.500–30.000 liter/tahun. Dengan harga solar bersubsidi industri sekitar Rp 6.800/liter, penghematan tahunan mencapai Rp 153–204 juta per trainset. Payback period diestimasi 5–8 tahun tergantung harga baterai dan nilai tukar, dengan NPV positif pada discount rate 10% dan horizon investasi 15 tahun (sesuai umur baterai LTO).

### 3.5.4 Manfaat Non-Finansial

Di luar aspek finansial, integrasi BESS memberikan manfaat tambahan berupa: peningkatan kualitas layanan melalui akselerasi lebih responsif dan headway yang dapat dipersingkat; pengurangan kebisingan di area stasiun yang meningkatkan kenyamanan lingkungan; kontribusi pada target *Net Zero Emission* transportasi nasional; dan posisi kompetitif industri dalam negeri guna pengembangan teknologi kereta hybrid domestik yang dapat mendukung ekspor.

### 3.5.5 Kelayakan Ekonomis

Berdasarkan analisis CAPEX, penghematan operasional, dan *benefit non-finansial*, penerapan sistem BESS berbasis LTO 70 kWh pada DEMU dinyatakan layak secara ekonomis. Sistem hybrid berbasis BESS layak secara ekonomis berdasarkan analisis biaya dan potensi penghematan operasional dinyatakan diterima. Kelayakan ini diperkuat oleh tren penurunan harga baterai LTO di pasar global, yang berpotensi memperpendek payback period pada implementasi skala armada nasional.

## 4. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil membuktikan secara komprehensif bahwa integrasi BESS berkapasitas 70 kWh dengan teknologi LTO pada sistem traksi DEMU memberikan manfaat multi-dimensi yang signifikan dan terukur. Dari aspek performa traksi, traction effort awal meningkat 18,1% (82,75 → 97,77 kN), waktu akselerasi 0-25 km/h berkurang 26,7% (24,54 → 17,98 detik), dan akselerasi notch P7 naik 39,3% (0,28 → 0,39 m/s<sup>2</sup>). Peningkatan ini dicapai dengan penambahan bobot sistem hanya 2 ton penambahan yang proporsional terhadap manfaat yang diperoleh dan masih jauh di bawah batas axle load. Dari aspek efisiensi energi dan lingkungan, sistem hybrid menghemat 4,99 liter/siklus (7,14%), setara 21.856 liter/tahun. Energi pengereman regeneratif yang berhasil dipulihkan mencapai 6,48 kWh/siklus (77,76 kWh/hari), yang sebelumnya 100% terbuang sebagai panas. Simulasi SOC mengkonfirmasi bahwa baterai 70 kWh menjaga nilai SOC dalam rentang operasional aman (62,2%–100%) sepanjang seluruh siklus perjalanan. Reduksi emisi CO<sub>2</sub> mencapai 59.228 kg/tahun per rangkaian setara penyerapan 2.692 pohon dewasa per tahun. Dari aspek kelayakan investasi, analisis NPV menghasilkan nilai positif Rp 192.064.475 dengan payback period 2,35 tahun, lebih pendek dari umur teknis baterai 3,42 tahun. Analisis sensitivitas mengkonfirmasi kelayakan finansial bahkan dalam skenario penurunan harga BBM 10%. Sistem baterai hybrid DEMU dengan demikian direkomendasikan untuk implementasi pada skala armada, karena kombinasi manfaat teknis, operasional, dan lingkungan yang ditawarkan menjadikannya solusi strategis bagi modernisasi perkeretaapian nasional menuju sistem transportasi yang lebih efisien, responsif, dan berkelanjutan tanpa memerlukan investasi infrastruktur elektrifikasi jalur yang masif.

## REFERENSI

- [1] D. Bogdanov, M. Ram, S. Khalili, A. Aghahosseini, M. Fasihi, and C. Breyer, "Effects of direct and indirect electrification on transport energy demand during the energy transition," *Energy Policy*, vol. 192, p. 114205, Sep. 2024, doi: 10.1016/j.enpol.2024.114205.
- [2] S. Speizer *et al.*, "Integrated assessment modeling of a zero-emissions global transportation sector," *Nat. Commun.*, vol. 15, no. 1, p. 4439, May 2024, doi: 10.1038/s41467-024-48424-9.
- [3] A. González-Gil, R. Palacin, P. Batty, and J. P. Powell, "A systems approach to reduce urban rail energy consumption," *Energy Convers. Manag.*, vol. 80, pp. 509–524, Apr. 2014, doi: 10.1016/j.enconman.2014.01.060.
- [4] A. Geetha and C. Subramani, "A comprehensive review on energy management strategies of hybrid energy storage system for electric vehicles," *Int. J. Energy Res.*, vol. 41, no. 13, pp. 1817–1834, Oct. 2017, doi: 10.1002/er.3730.
- [5] L. D. Nugraha, M. R. Author, S. F. Author, H. A. S. Author, I. D. Prince. R. Author, and C. N. K. Author, "METODE-METODE HARVESTING ENERGY MEKANIK PADA SEPEDA MOTOR LISTRIK





- UNTUK MENINGKATKAN EFISIENSI BATERAI,” *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*, vol. 13, no. 3S1, Oct. 2025, doi: 10.23960/jitet.v13i3S1.7997.
- [6] M. Kapetanović, M. Vajihi, and R. M. P. Goverde, “Analysis of Hybrid and Plug-In Hybrid Alternative Propulsion Systems for Regional Diesel-Electric Multiple Unit Trains,” *Energies (Basel)*, vol. 14, no. 18, p. 5920, Sep. 2021, doi: 10.3390/en14185920.
- [7] J. Olmos, I. Gandiaga, D. Lopez, X. Larrea, T. Nieva, and I. Aizpuru, “In-depth Life Cycle Cost Analysis of a Li-ion Battery-based Hybrid Diesel-Electric Multiple Unit,” in *2020 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, IEEE, Nov. 2020, pp. 1–5. doi: 10.1109/VPPC49601.2020.9330908.
- [8] S. Schmid, K. Ebrahimi, A. Pezouvanis, and W. Commerell, “Model-based comparison of hybrid propulsion systems for railway diesel multiple units,” *International Journal of Rail Transportation*, vol. 6, no. 1, pp. 16–37, Jan. 2018, doi: 10.1080/23248378.2017.1390790.
- [9] M. Meinert, P. Prenleloup, S. Schmid, and R. Palacin, “Energy storage technologies and hybrid architectures for specific diesel-driven rail duty cycles: Design and system integration aspects,” *Appl. Energy*, vol. 157, pp. 619–629, Nov. 2015, doi: 10.1016/j.apenergy.2015.05.015.
- [10] A. García-Garre and A. Gabaldón, “Analysis, Evaluation and Simulation of Railway Diesel-Electric and Hybrid Units as Distributed Energy Resources,” *Applied Sciences*, vol. 9, no. 17, p. 3605, Sep. 2019, doi: 10.3390/app9173605.
- [11] M. Ceraolo, G. Lutzemberger, E. Meli, L. Pugi, A. Rindi, and G. Pancari, “Energy storage systems to exploit regenerative braking in DC railway systems: Different approaches to improve efficiency of modern high-speed trains,” *J. Energy Storage*, vol. 16, pp. 269–279, Apr. 2018, doi: 10.1016/j.est.2018.01.017.
- [12] G. Cipolletta, A. Delle Femine, D. Gallo, M. Luiso, and C. Landi, “Design of a Stationary Energy Recovery System in Rail Transport,” *Energies (Basel)*, vol. 14, no. 9, p. 2560, Apr. 2021, doi: 10.3390/en14092560.
- [13] G. Leoutsakos *et al.*, “Metro traction power measurements sizing a hybrid energy storage system utilizing trains regenerative braking,” *J. Energy Storage*, vol. 57, p. 106115, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.est.2022.106115.
- [14] S. F. da Silva, J. J. Eckert, F. L. Silva, L. C. A. Silva, and F. G. Dedini, “Multi-objective optimization design and control of plug-in hybrid electric vehicle powertrain for minimization of energy consumption, exhaust emissions and battery degradation,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 234, p. 113909, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.enconman.2021.113909.
- [15] M. YAMASHITA and T. SOEDA, “Anti-slip Re-adhesion Control Method to Increase Starting Tractive Effort of Inverter-fed Electric Locomotive,” *Quarterly Report of RTRI*, vol. 58, no. 3, pp. 189–195, 2017, doi: 10.2219/rtrqr.58.3\_189.
- [16] S. Schmid, K. Ebrahimi, A. Pezouvanis, and W. Commerell, “Model-based comparison of hybrid propulsion systems for railway diesel multiple units,” *International Journal of Rail Transportation*, vol. 6, no. 1, pp. 16–37, Jan. 2018, doi: 10.1080/23248378.2017.1390790.
- [17] N. V. Martyushev *et al.*, “Review of Methods for Improving the Energy Efficiency of Electrified Ground Transport by Optimizing Battery Consumption,” *Energies (Basel)*, vol. 16, no. 2, p. 729, Jan. 2023, doi: 10.3390/en16020729.
- [18] M. Kapetanović, A. Núñez, N. van Oort, and R. M. P. Goverde, “Reducing fuel consumption and related emissions through optimal sizing of energy storage systems for diesel-electric trains,” *Appl. Energy*, vol. 294, p. 117018, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.apenergy.2021.117018.
- [19] M. Kapetanović, M. Vajihi, and R. M. P. Goverde, “Analysis of Hybrid and Plug-In Hybrid Alternative Propulsion Systems for Regional Diesel-Electric Multiple Unit Trains,” *Energies (Basel)*, vol. 14, no. 18, p. 5920, Sep. 2021, doi: 10.3390/en14185920.
- [20] M. Nizam, H. Maghfiroh, M. R. A. Putra, A. Jamaluddin, and I. Inayati, “Hybrid Catenary-Battery Trains for Non-Electrified Sections and Emergency Use,” *Automotive Experiences*, vol. 8, no. 2, pp. 338–352, Sep. 2025, doi: 10.31603/ae.13440.
- [21] Y. Purwanto *et al.*, “Security Architecture for Secure Train Control and Monitoring System,” *Sensors*, vol. 23, no. 3, p. 1341, Jan. 2023, doi: 10.3390/s23031341.

