



INNOVATIVE: Journal Of Social Science Research

Volume 4 Nomor 3 Tahun 2024 Page 2293-2308

E-ISSN 2807-4238 and P-ISSN 2807-4246

Website: <https://j-innovative.org/index.php/Innovative>

Systematic Literature Review: Penggunaan Energi Regeneratif dari Sistem Pengereman pada Kereta Listrik/Electric Multiple Unit (EMU)

Mutaqqin^{1✉}, Dimas Adi Prawira², Arief Darmawan³, Edi Nyoto Setyo Marsusiadi⁴

Politeknik Perkeretaapian Indonesia Madiun

Email: muttaqqin@ppi.ac.id^{1✉}

Abstrak

Salah satu cara untuk mengurangi konsumsi energi kereta listrik adalah dengan menggunakan metode regenerative braking. Artikel ini bertujuan menyajikan tinjauan literatur tentang pemanfaatan energi pengereman regeneratif pada kereta listrik (Electric Multiple Unit/EMU). Penelitian deskriptif dengan pendekatan kualitatif studi literatur revidi. Pemanfaatan energi pengereman regeneratif pada kereta listrik (EMU). Sebanyak 10 studi yang dilakukan antara tahun 2019-2023 dimasukkan dalam tinjauan ini secara keseluruhan sebanyak 1.788 judul diidentifikasi didapatkan 10 studi yang memenuhi syarat/kriteria yang membahas tentang pemanfaatan energi pengereman regeneratif pada kereta listrik (EMU). Fungsi ESS (Energy Storage System) atau piranti sebagai penyimpan energi dalam kapasitas besar yang menghasilkan regenerative braking di kereta api pada baterai, flywheel, super-capasitor dan disalurkan langsung dari kereta satu ke kereta lainnya untuk meningkatkan pemanfaatan listrik hasil regenerative braking yaitu pengaturan penjadwalan, reversible substation, dan pemasangan ESS sehingga mampu menghemat energi hingga 30 %.

Kata Kunci: *Kereta Listrik (EMU), Energi Pengereman Regeneratif*

Abstract

One way to reduce energy consumption in electric trains is by using regenerative braking methods. This article aims to present a literature review on the utilization of regenerative braking energy in Electric Multiple Unit (EMU). A descriptive study with a qualitative literature review approach was conducted. The utilization of regenerative braking energy in Electric Multiple Unit (EMU). A total of 10 studies conducted between 2019-2023 were included in this review, out of a total of 1,788 identified titles. These 10 studies met the criteria discussing the utilization of regenerative braking energy in Electric Multiple Unit (EMU) trains. The function of Energy Storage Systems (ESS) or devices as large-capacity energy storage which generates regenerative braking in trains through batteries, flywheels, supercapacitors, and is distributed directly from one train to another to enhance the utilization of electric energy from regenerative braking, including scheduling regulation, reversible substations, and ESS installation, thus capable of saving energy by up to 30%.

Keywords: *Electric Train (EMU), Regenerative Braking Energy*

PENDAHULUAN

Transportasi merupakan bidang kegiatan yang sangat penting dalam kehidupan masyarakat, antara lain karena keadaan geografis Indonesia yang terdiri dari ribuan pulau kecil dan besar, perairan yang sebagian besar terdiri dari lautan, sungai dan danau. Hal ini memungkinkan pengangkutan dilakukan melalui jalur darat, perairan, dan udara dengan menggunakan alat transportasi yang cepat dan nyaman. Seiring dengan perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi, kereta api telah menjadi salah satu solusi dalam mengatasi permasalahan transportasi perkotaan yang semakin kompleks untuk kota-kota besar di Indonesia (Rahmalina, 2023). Teknologi kereta api sudah banyak berkembang, kereta api listrik memerlukan energi listrik sebagai sumber energinya, tetapi kereta api listrik ternyata menyerap energi listrik yang cukup besar setiap tahunnya (Adam, 2021).

Salah satu faktor yang menyebabkan kurang baik dan efisiennya sistem kerja KRL adalah kurang optimal dalam penggunaan sistem pengereman pada KRL. Sistem pengereman pada KRL menggunakan gabungan dari pengereman elektrik (pengereman regeneratif) dan pengereman mekanik (pengereman pneumatic). Optimalisasi pengereman yang kurang dapat menyebabkan sistem kerja yang kurang baik dan efisien melalui optimalisasi pengereman dengan *metode regenerative braking*. Pada kendaraan listrik, operasi pengereman regeneratif yaitu merubah energi mekanik menjadi energi listrik dengan generator. Penggunaan regenerative braking dapat mengurangi emisi dan menambah efisiensi energi. Regenerative braking terbukti dapat menghemat konsumsi energi hingga 33%. Peran ESS-OB dalam mengurangi beban puncak substation dan juga dalam

penyerapan energi hasil regenerative braking. Peluang penggunaan ESS-OB khususnya baterai untuk mengurangi beban puncak dan meningkatkan penyerapan energi *regenerative braking* pada kereta api (Wilk, 2020). Hal inilah yang membuat peneliti tertarik melakukan literatur revidu mengenai pemanfaatan energi pengereman regeneratif pada kereta listrik EMU.

METODE PENELITIAN

Rancangan penelitian yang digunakan adalah metode penelitian deskriptif dengan pendekatan kualitatif studi literatur revidu atau tinjauan pustaka dengan menggunakan internet dan pencarian manual. Penelusuran dilakukan dengan menggunakan kata kunci "pemanfaatan energi pengereman regeneratif pada kereta listrik EMU". Kriteria inklusi penelitian ini adalah artikel yang dijadikan literatur adalah artikel penelitian, baik *original article* maupun kajian/revidu. Artikel atau literatur membahas tentang pemanfaatan energi pengereman regeneratif pada kereta listrik EMU yang diterbitkan dari 2019-2023. Peneliti menemukan artikel yang sesuai kata kunci tersebut dengan rincian *Google Scholar* (n = 1.100), *Academia.edu* (n = 651), *SciencDirect* (n = 36) dan *Researchgate* (n = 1) yaitu n = 1788. Hasil pencarian yang sudah didapatkan kemudian diperiksa duplikasi dengan *mendeley* dan ditemukan artikel yang sama sehingga ada artikel yang dikeluarkan atau duplikasi (n = 1003). Peneliti melakukan skринning berdasarkan judul (n = 850), kemudian di dapatkan abstrak (n=53) kemudian dilakukan skринning berdasarkan kriteria inklusi dan eksklusi pada keseluruhan teks (*full text*) sehingga didapatkan sebanyak (n = 10) yang dapat digunakan dalam *systematic literature revidu*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil studi menunjukkan sebanyak 8 artikel memenuhi kriteria berdasarkan topik *literature revidu*. Hasil karakteristik studi dari 4 database (*Google Scholar*, *Academia.edu*, *SciencDirect* dan *Researchgate*) tergambar dalam tabel 1 berikut ini :

Tabel 1. Rangkuman Artikel Referensi

No	Penulis Dan Tahun	Judul Penelitian	Metode Penelitian	Hasil Penelitian	Database
1.	Dian Samodrawati, Basilius Kevin	Analisis Perhitungan Energi Pengereman	<i>Literatur review</i>	Berat kereta saat AW0 (205 ton), AW1 (221,64 ton), AW2 (253,36 ton), dan AW3 (322,12 ton) tidak signifikan terhadap perubahan energi yang	<i>Google Scholar</i> http://jurnalftj.ayabaya.ac.id/i

Triantoro (2022)	Regeneratif Kereta MRT Berdasarkan Mode Operasi Otomatis Kereta MRT Jakarta	dihasilkan kereta saat melakukan pengereman regeneratif. <i>Rainy mode</i> menyebabkan perubahan dalam hasil energi regeneratif yang dihasilkan pada kereta MRT Jakarta dan juga menyebabkan bertambahnya waktu dan jarak pengereman. Sebagai perbandingan waktu dan jarak pengereman saat mode normal yakni 40 detik dengan jarak 515 m, sedangkan pada saat <i>mode rainy</i> waktu yang dibutuhkan menjadi 56 detik dengan jarak 652 m. Energi pengereman regeneratif pada Loksi Stasiun Fatmawati menuju Stasiun Cipete Raya merupakan yang terbesar dengan energi rata-rata yang dihasilkan 6 kWh pada saat mode normal dan energi pengereman regeneratif terkecil terdapat pada Stasiun Blok M menuju Stasiun ASEAN dengan energi rata-rata yang dihasilkan 1,2 kWh di mode normal. Besar total energi pengereman regeneratif yang dihasilkan dalam 1 hari adalah sekitar 2340,3 kWh dalam kondisi normal dan 1935,8 kWh dalam kondisi hujan.	ndex.php/TRENDA/article/view/190	
2. Rizki Pratama Putra, Novi Kurniasih, Dewi Purnama Sari, Zaky Syamsuddin (2022)	Kontrol Torka Pengereman Regeneratif Pada Sepeda Listrik Dengan Integrasi Ultrakapasitor	<i>Literature review</i>	Pada penelitian ini, berhasil membuat model uji pengereman regeneratif dengan menggunakan motor BLDC 2000w yang disuplai dengan baterai 65V dan menggunakan dua buah ultrakapasitor 3000F dengan tegangan kerja 2.8V. 2. Pengujian dilakukan dalam penelitian ini dengan cara memberikan variasi terhadap 3	<i>Google Scholar</i> https://aperti.ejournal.id/snekti/article/view/237

faktor yaitu beban, kecepatan dan juga jumlah ultrakapasitor. Untuk beban yang digunakan sebesar 2.5 kg, 3.75 kg dan 5 kg dengan variasi kecepatan sebesar 600 rpm, 700 rpm dan 800 rpm dan setiap faktor beban dan kecepatan di uji dengan 2 kondisi ultrakapasitor yaitu satu ultrakapasitor dan 2 buah ultrakapasitor yang dirangkai secara paralel. Berdasarkan pengujian diatas, didapatkan hasil untuk nilai perlambatan, arus dan tegangan tertinggi dihasilkan dari variasi beban 2.5 kg dengan kecepatan 800 rpm dan satu buah ultrakapasitor dengan nilai berturut-turut adalah sebesar 1.57 m/s² selama 11 detik, 5.8 mA dan 7.87 V. Sedangkan untuk energi tertinggi sebesar 0.2091662 Joule yang didapat dari variasi beban 5 kg dengan kecepatan 800 rpm dan ultrakapasitor paralel.

3.	Rizki Pratama Putra, Ibnu Hajar, Christine Widyastuti (2021)	Desain Sistem Pengereman Regeneratif Pada Sepeda Listrik Ringkas	<i>Literature review</i>	Pada penelitian ini telah mengusulkan pemanfaatan torka pengereman generator DC dengan pembesaran <i>spur gear</i> mekanisme pengereman regenerative. Prinsip fundamental kinematika rotasi, pergerakan sepeda, persamaan dinamis generator untuk dibuat dalam bentuk diagram blok dengan memanfaatkan <i>Simulink</i> .	<i>Google Scholar</i> https://www.neliti.com/id/publications/391998/desain-sistem-pengereman-regeneratif-pada-sepeda-listrik-ringkas
----	--	--	--------------------------	--	--

4.	Allmy Bintang Damara, Ahmad Qurthobi, Kharisma Bani Adam (2021)	Rancang bangun purwarupa pengereman regeneratif menggunakan motor DC MY1016	<i>Literature review</i>	Pada penelitian ini diketahui terdapat pengaruh variabel sistem Penggunaan <i>switch</i> menghasilkan lonjakan arus keluaran dengan nilai rata-rata 116 mA sampai tegangan turun secara perlahan. Pada hasil keluaran efek pengereman regeneratif dibutuhkan tegangan diatas 2.8 V untuk dapat masuk modul <i>buckboost</i> sehingga dapat melakukan pengisian pada baterai, semakin tinggi kecepatan yang berada pada flywheel, maka semakin lama juga waktu untuk melakukan pengisian pada baterai.	Google Scholar file:///C:/Users/.../User/Downloads/16136-31721-1-SM.pdf
5.	Marko Kapetanović, Alfredo Núñezb, Niels van Oort, Rob M.P. Goverde (2021)	<i>Reducing fuel consumption and related emissions through optimal sizing of energy storage systems for diesel-electric trains</i>	<i>Literature review</i>	Makalah ini menyajikan metode untuk mendukung keputusan dalam konversi beberapa unit diesel-listrik standar ke pasangan hibrida mereka dengan menambahkan sistem penyimpanan energi berbasis baterai Li-ion berukuran optimal. Pendekatan pengoptimalan multi-tujuan bi-level yang diusulkan berdasarkan kerangka koordinasi bersarang mencakup aspek desain yang relevan, seperti persyaratan untuk mencapai operasi bebas emisi dan bebas kebisingan di stasiun, preferensi antara konsumsi bahan bakar yang lebih rendah dan biaya hibridisasi, kendala teknis terkait dengan tegangan baterai dan massa maksimum yang diperbolehkan, dan pengaruh strategi manajemen energi.	Sciencedirect https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261921004840

6.	Hari Maghfiroh (2020)	Pemanfaatan Baterai untuk Mengurangi Beban Puncak dan Meningkatkan Penyerapan Energi Regenerative Braking pada Kereta Api	<i>Literature review</i>	Penggunaan ESS-OB dapat membantu mengurangi energi beban puncak dan dapat mengoptimalkan penyerapan energi hasil <i>regenerative braking</i> . Pada pengujian yang telah dilakukan, penambahan baterai dengan kapasitas 0,6 % dari kebutuhan energi kereta, menyebabkan kenaikan massa kereta sebesar 0,07 % dan mampu memberikan penghematan energi sebesar 2,11 %. Pengujian simulasi ini dilakukan dengan kondisi ideal, diperlukan pengujian lebih lanjut untuk implementasi. Hasil pengujian ini memberikan gambaran bahwa ESS-OB dapat mengurangi biaya listrik pada operasional kereta api listrik. Selain itu, pemakaian ESS-OB dapat menurunkan daya yang harus disuplai oleh substation sehingga dimungkinkan membangun substation dengan daya yang lebih rendah. Penambahan ESS-OB dapat dilakukan pada kereta lama maupun baru. Akan tetapi, penambahan yang dilakukan pada kereta baru ketika proses produksi akan lebih menguntungkan karena perlu adanya integrasi sistem ESS pada kereta, selain itu, tidak akan mengganggu jadwal operasional kereta.	<i>Researchgate</i> https://www.researchgate.net/publication/344293882_Pemanfaatan_Baterai_untuk_Mengurangi_Beban_Puncak_dan_Meningkatkan_Penyerapan_Energi_Regenerative_Braking_pada_Kereta_Api
7.	Alex William Pangestu dan I Nyoman	Studi Analisis Kinerja Sistem Rem Regeneratif pada Sepeda	<i>Literature review</i>	Pertama porsi dan gaya rem regeneratif maksimal sebesar 0,114 dan 266,31 N, kedua kontribusi sistem rem regeneratif sebesar 33,194% dan 29,504% dengan driving cycle WMTC	<i>SciencDirect</i> https://ejurnal.iains.ac.id/index.php/teknik/article/view/55457

	Sutantra (2020)	<i>Motor Hybrid</i> dengan Konfigurasi Seri		kelas 1 dan kelas 2, ketiga efisiensi sistem rem regeneratif sebesar 23,535% dan 31,98% dengan <i>driving cycle</i> WMTC kelas 1 dan WMTC kelas 2.	
8.	Aleksander Jakubowski, Natalia Karkosiński a- Brzozowski a, Krzysztof Karwowski, Andrzej Wilk (2020)	<i>Storage electric multiple units on partially electrified suburban railway lines</i>	<i>Literature reviu</i>	Analisis simulasi yang dilakukan menunjukkan bahwa pada jalur perkotaan dan pinggiran kota mungkin bermanfaat untuk memperkenalkan unit traksi penyimpanan listrik tipe IPEMU untuk melayani penumpang.. Pembelian multiple unit elektrik klasik bersamaan dengan elektrifikasi ruas tersebut memiliki harga yang sama dengan IPEMU tanpa catenary line. Namun, pembelian IPEMU dalam jumlah yang lebih besar dapat dibenarkan secara ekonomi jika juga digunakan untuk mendukung bagian non-listrik lainnya, mis. Gdańsk Wrzeszcz – Bandara, Rumia – Hel dan sejenisnya.	<i>Academia.edu</i> https://www.academia.edu/81315421/Storage_electric_multiple_units_on_partially_electrified_suburban_railway_lines

Pembahasan

Kereta Listrik (EMU)

Kereta Rel Listrik merupakan rangkaian kereta api yang sistem traksi atau tarikan geraknya memanfaatkan tenaga listrik. Penyebutan kereta listrik lebih melihat pantograf sebagai gateway (sumber masuknya) energi listrik untuk traksi, bukan traksi motornya. Karena itu lokomotif DE (Diesel Elektrik) dan KRD (Kereta Rel Diesel) tidak dapat disebut kereta listrik karena tidak mempunyai pantograph. Kereta listrik yang ada di Jakarta sekarang bersifat Electric Multiple Unit (EMU) dan disebut Kereta Rel Listrik (KRL). Transportasi perkeretaapian di Indonesia terus berkembang pesat. Hal ini dapat dilihat dari jenis kereta rel listrik di Indonesia saat ini cukup banyak, khususnya kereta dalam kota (Goverde, 2021).

Jenis-Jenis Kereta Rel Listrik

Kereta yang membentuk satu set KRL lengkap umumnya dikelompokkan berdasarkan fungsinya menjadi empat jenis: *power car*, *motor car*, *driving car*, dan *trailer car*. Kereta dapat memiliki lebih dari satu fungsi. Motor-motor traksi pada kereta tersebut dikendalikan secara serentak (Sutantra, 2020).

- a. *Power car* adalah jenis kereta dipasang peralatan kelistrikan untuk menghantarkan listrik dari prasarana KRL, misalnya sepatu kontak untuk rel ketiga atau pantograf untuk listrik aliran atas, beserta trafo.
- b. *Motor car* adalah jenis kereta yang dipasang motor traksi untuk menggerakkan sarana, dan biasanya dikombinasikan dengan *power car* untuk mencegah hubungan tegangan tinggi antarkereta.
- c. *Driving car* adalah kereta yang dilengkapi kabin masinis untuk mengendalikan kereta. KRL biasanya memiliki dua *driving car* yang berada di kedua ujungnya.
- d. *Trailer car* adalah setiap kereta yang tidak masuk dalam ketiga jenis di atas, karena tidak dilengkapi peralatan khusus, dan hanya berupa kereta penumpang biasa

Dalam sistem rel ketiga (listrik aliran bawah), sarana di kedua ujungnya dapat dipasang sepatu kontak dengan *motor car* menerima arusnya melalui hubungan intra-unit.

Kereta Kecepatan Tinggi

Sejumlah kereta berkecepatan tinggi yang cukup terkenal adalah KRL: Pendolino dan Frecciarossa 1000 di Italia, Shinkansen di Jepang, China Railway High-speed di Tiongkok, ICE 3 di Jerman, serta British Rail Class 395 Javelin di Britania Raya. Layanan *Metroliner* relasi New York–Washington yang kini telah pensiun, pertama kali dijalankan oleh Pennsylvania Railroad dan kemudian oleh Amtrak, juga menghadirkan KRL berkecepatan tinggi bernama Budd Metroliner. Bahkan Kereta Cepat Indonesia-China pun menggunakan KRL tapi hanya istilah EMU yang digunakan untuk KCIC400AF (Widyastuti, 2021).

Pengembangan Sel Bahan Bakar

Saat ini KRL bertenaga sel bahan bakar sedang dikembangkan. Bila sukses, kebutuhan listrik aliran atas maupun rel ketiga sudah tak diperlukan lagi. Contohnya, Coradia iLint, bertenaga hidrogen, dikembangkan oleh Alstom. Istilah "kereta bertenaga hidrogen" ditujukan pada kereta jenis ini.

Kereta Rel Baterai

Banyak kereta rel baterai dijalankan di seluruh dunia. Kereta ini dapat berjalan dalam dua mode: dengan menggunakan energi baterai yang terpasang, dan dengan mengambil arus dari kabel listrik aliran atas atau rel ketiga. Dalam kebanyakan kasus, baterai dapat diisi saat mengambil arus listrik.

Perbandingan dengan Lokomotif

Bila dibandingkan dengan lokomotif listrik, KRL memiliki keunggulan yaitu sebagai berikut;

- a. Perlajuan yang lebih tinggi, karena beban banyak yang dibagi pada luaran daya.
- b. Pengereman, termasuk arus Eddy, pengereman rheostatik, dan/atau regeneratif pada beberapa gandar sekaligus, dapat mencegah keausan rem.
- c. Beban gandar berkurang, mengingat tidak perlu lagi lokomotif berat.
- d. Mengurangi getaran tanah.
- e. Koefisien adhesinya rendah untuk gandar berpengeraknya
- f. Tingkat redundansinya tinggi - kinerja hanya terpengaruh dengan kegagalan salah satu motor atau rem.
- g. Tempat duduknya berkapasitas tinggi, karena tak ada lokomotif; semua kereta memiliki tempat duduk

Sementara lokomotif listrik memiliki keunggulan terhadap KRL yaitu sebagai berikut :

- a. Memerlukan sedikit peralatan listrik sehingga biaya produksi dan pemeliharaannya bisa ditekan.
- b. Bunyinya kurang bising dan minim guncangan di kereta penumpang, karena tak ada motor atau kotak roda gerigi pada bogie di bawah sarana (Syamsuddin, 2022).

Penggunaan Energi Pengereman Regeneratif

Pada kendaraan listrik, operasi pengereman regeneratif yaitu mengubah energi mekanik menjadi energi listrik dengan generator. Penggunaan pengereman regeneratif dapat mengurangi emisi dan menambah efisiensi energi. Input daya pada sebuah motor induksi dirumuskan dengan;

$$P_{in} = 3 (VxI_s \cos\phi_s)$$

Dengan,

P : daya (watt)

V : tegangan (volt)

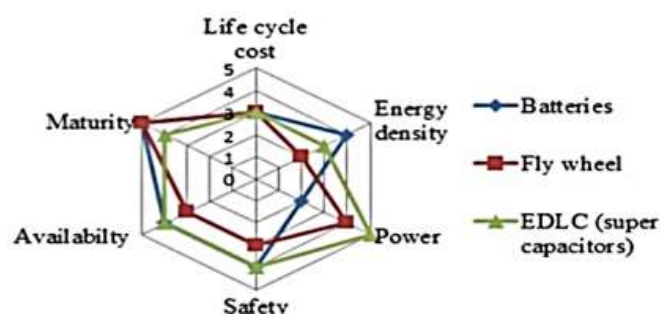
I : arus (ampere)

Dimana φ_s adalah sudut fasa antara tegangan fasa stator (V) dan arus fasa stator (I_s), untuk operasi motor $\varphi_s < 90^\circ$. Jika kecepatan rotor lebih tinggi dari pada kecepatan sinkron, kecepatan relative antara konduktor rotor dan medan putar celah udara akan dikembalikan. Pembalikan induksi ggl rotor ini, arus rotor dan komponen stator menyeimbangkan putaran ampere. Maka, sudut φ_s menjadi lebih besar dari 90° dan daya terbalik menghasilkan pengereman regenerative. Pada saat operasi pengereman, motor traksi akan berubah fungsi menjadi generator (Triantoro, 2022).

Penggunaan Energi Pengereman Regeneratif Pada Kereta Listrik (EMU)

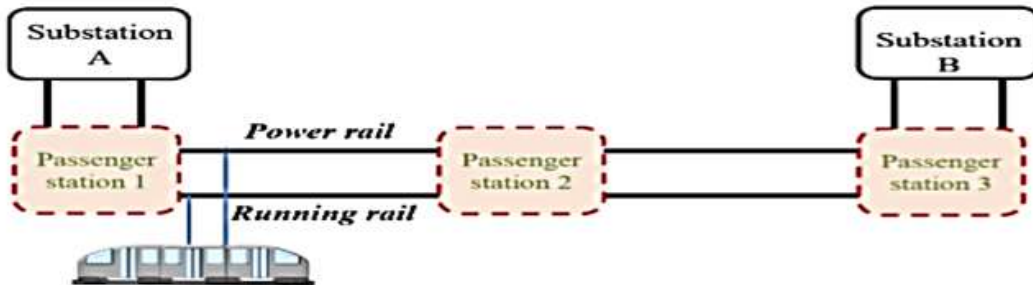
Kereta api listrik memerlukan energi listrik sebagai sumber energinya, karena menyerap energi listrik yang cukup besar setiap tahunnya. Riset dibidang perkeretaapian terus dilakukan untuk menekan konsumsi energi kereta api listrik. Salah satu cara untuk mengurangi konsumsi energi kereta listrik adalah dengan menggunakan metode *regenerative braking* (Murray, 2019), dengan mengubah motor traksi pada kereta menjadi generator pada saat pengereman yang menghasilkan energi listrik. Energi listrik hasil regenerative braking dapat disalurkan kembali ke listrik aliran atas (LAA) atau rel ketiga (3rd rail) untuk dimanfaatkan kereta lain. Akan tetapi, jika tidak ada kereta lain yang memanfaatkan atau ketika listrik hasil *regenerative braking* ini terlalu besar, maka listrik disalurkan ke *brake resistor* untuk dibuang menjadi panas sehingga dapat menghemat energi sebesar 30%.

Simulasi dilakukan dengan membuat model substation, kereta api, ESS-OB, dan brake resistor. Pada penelitian ESS-OB yang dipilih adalah baterai karena baterai unggul pada lima kriteria dibandingkan *flywheel* dan super-capasitor yaitu dari segi keamanan, ketersediaan, kematangan teknologi, biaya perawatan, kepadatan energi. Baterai hanya tertinggal dari segi besarnya daya yang dapat disimpan. Gambar 4 menunjukkan perbandingan antara baterai dan flywheel serta super-capasitor.



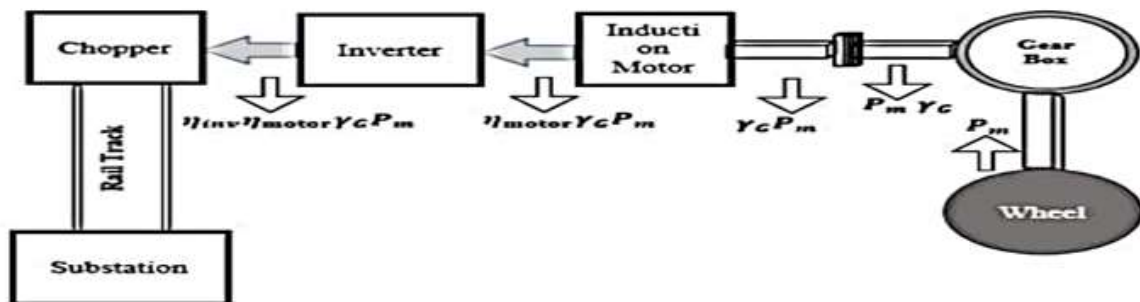
Gambar 4. Perbandingan Tiga Jenis ESS

Pada pengujian simulasi ini, kereta bergerak antara tiga stasiun yang terhubung dengan dua substation seperti dapat dilihat pada Gambar 5. Jarak antara substation adalah 1100 m sedangkan jarak antara stasiun 1 dan stasiun 2 adalah 586 m sedangkan antara stasiun 2 dan 3 adalah 514m. Kereta akan bergerak dari stasiun 1 ke stasiun 2 kemudian berhenti dan dilanjutkan ke stasiun 3. Sistem kelistrikan yang dipakai adalah 3rd rail dengan nominal voltase 650 VDC.



Gambar 5. Skema Pengujian

Kereta api dimodelkan dengan metode "*backward looking*" yaitu perhitungan dimulai dari tenaga gerak yang diperlukan roda, kemudian naik ke gearbox dan seterusnya sampai substation dengan memperhatikan efisiensi pada masing-masing komponen seperti ditunjukkan pada gambar 6 dibawah ini.



Gambar 6. Alur Pemodelan *Backward Looking*

Sedangkan dinamika kereta dimodelkan dengan berdasarkan Hukum Newton2 seperti ditunjukkan pada persamaan (1). Gaya traksi adalah gaya yang diperlukan kereta untuk bergerak, gaya resistansi adalah gaya yang menghambat gerakan kereta. Gaya resistansi yang dipakai adalah rolling resistance, aerodynamic resistance, dan gradient resistance dirumuskan secara berurutan pada persamaan (3), (4), dan (5)

Tabel 1. Keterangan dan Nilai Variabel

Parameter	Keterangan	Nilai
F_{traksi}	Gaya traksi total	Berdasar formula (1)
F_R	Gaya resistansi	Berdasar formula (2)
M	Massa kereta	380 T
v	Kecepatan kereta	Divariasikan
F_{rr}	Gaya resistansi akibat gesekan	Berdasar formula (3)
F_{ra}	Gaya resistansi akibat aerodinamis	Berdasar formula (4)
F_{rg}	Gaya resistansi akibat gradient	Berdasar formula (5)
f_r	Koefisien gesekan	0,002
g	Percepatan gravitasi bumi	9,8 m/s ²
α	Sudut kemiringan gradient	0°
C_w	Koefisien gesek udara	0,5
A	Luas penampang depan kereta	9 m ²
ρ	Kepadatan udara	1,225 kg/m ³
n	Jumlah motor traksi satu rangkaian kereta	40

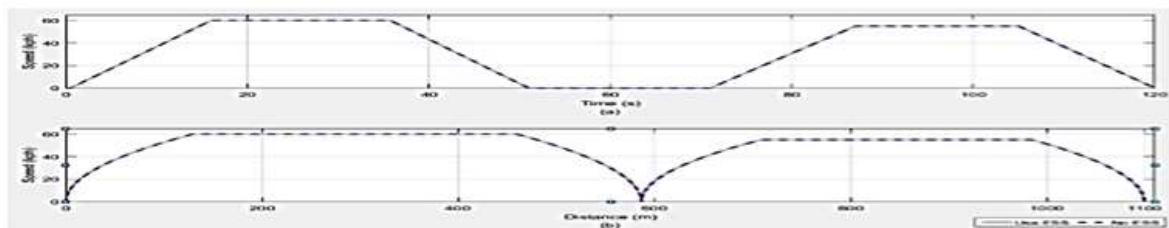
Selanjutnya ESS-OB dipilih menggunakan baterai jenis Lithium-Ion (Li-on) karena memiliki kepadatan energi yang tinggi. Dalam artian, dengan massa yang sama baterai jenis ini mampu menyimpan energi yang cukup banyak. Parameter baterai yang dipakai pada penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 2. Brake resistor diperlukan ketika tegangan listrik yang dihasilkan dari proses regenerative braking melebihi kapasitas ESS-OB atau karena ESS-OB penuh dan listrik tidak bisa dikembalikan ke LAA karena logika pengkoneksian brake resistor ke bus DC-link dilakukan dengan menggunakan saklar semi-konduktor, dalam hal ini IGBT. Kemudian keseluruhan komponen dirangkai dalam software MATLAB untuk dilakukan simulasi dan dianalisa hasilnya.

Tabel 2. Spesifikasi Baterai ESS-OB

Parameter	Nilai
Nominal Voltage	300 V
Kapasitas	100 Ah
Massa	250 Kg

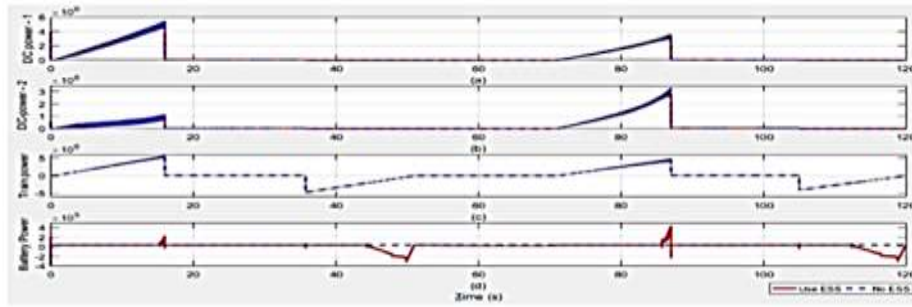
Simulasi dilakukan dalam waktu 120 detik pada software MATLAB. Gambar 4 menunjukkan grafik kecepatan hasil simulasi, gambar 7(a) menunjukkan grafik kecepatan terhadap waktu sedangkan gambar 7(b) menunjukkan grafik kecepatan terhadap jarak. Dilihat bahwa kereta berjalan pada waktu $T = 0$ detik (second) dari stasiun -1 ke stasiun -2 dalam waktu sekitar 50 detik kemudian berhenti yaitu ketika kecepatan kereta mencapai 0 kph (kilometer per hour-kilometer/jam). Kereta berhenti 20 detik dari detik ke-50 sampai detik ke-70 kemudian kereta berangkat dari stasiun-2 menuju stasiun ke -3. Kereta sampai dan berhenti di stasiun ke-3 pada detik ke 120 dengan total jarak tempuh 1100m. Kecepatan maksimum pada perjalanan dari stasiun-1 ke stasiun 2 adalah 60 kph dan 55 kph saat

menuju stasiun 3. Terlihat bahwa performa kecepatan pada kereta dengan ESS-OB dan tanpa ESS sama.



Gambar 7. Grafik Kecepatan

Kemudian analisa pada daya listrik yang dikonsumsi kereta tanpa ESS-OB dan dengan ESS-OB seperti ditunjukkan pada Gambar 8, terdiri dari 4 grafik yaitu grafik DC power 1 dan 2 yaitu daya listrik pada substasiun 1 dan 2. Selanjutnya ada daya listrik yang dikonsumsi kereta (*train power*) dan terakhir daya listrik dari baterai (*battery power*) dalam hal ini baterai Li-on. Pada grafik DC power hanya ada nilai positif artinya kereta mengambil daya dari substasiun dan tidak ada daya dari regenerative braking kereta yang dikembalikan. Sedangkan nilai daya yang negatif pada daya kereta dan baterai artinya daya yang diperoleh dari regenerative braking. Pada grafik DC power-1 memiliki lonjakan diawal gerak kereta yang besar, hal ini karena posisi kereta lebih dekat ke substasiun A. Sebaliknya grafik lonjakan kedua pada detik sekitar 80, DC power-2 memiliki lonjakan yang lebih besar karena kereta sudah mendekati ke substasiun B. sedangkan lonjakan positif pertama adalah saat kereta mulai gerak dari stasiun ke-1, dan lonjakan negative pada detik ke-40 menunjukkan terjadinya *regenerative braking* saat kereta hendak berhenti di stasiun ke-2. Proses ini terjadi lagi ketika kereta berjalan meninggalkan stasiun ke-2 menuju stasiun ke-3. Hal ini karena daya baterai yang dipakai cukup kecil dibandingkan daya total yang diperlukan kereta. Daya maksimum yang diperlukan kereta dari pengujian ini adalah 5000 kW sedangkan daya baterai yang dipakai hanya 30 kWh atau hanya sekitar 0,6 % saja. Kenaikan massa kereta dari penggunaan baterai ini adalah 0,07 %. Daya total yang terpakai pada kereta tanpa ESS adalah 6.170kW sedangkan pada kereta dengan ESS-OB adalah 6.040kW. Sehingga penghematan energi yang diperoleh mencapai 2,11 %. Gambar 8 telah membuktikan bahwa ESS-OB dapat mengurangi beban puncak dan menampung daya listrik hasil regenerative braking dengan baik. Untuk mendapatkan efektivitas yang lebih baik dari penggunaan ESS-OB ini, seperti disebutkan oleh C.



Gambar 8. Grafik Day

SIMPULAN

Berdasarkan pengujian dan analisa yang telah dilakukan disimpulkan bahwa penggunaan ESS-OB membantu mengurangi energi beban puncak dan mengoptimalkan penyerapan energi hasil regenerative braking. ESS-OB dapat mengurangi biaya listrik pada operasional kereta api listrik. Selain itu, pemakaian ESS-OB dapat menurunkan daya yang harus disuplai oleh substation sehingga dimungkinkan membangun substation dengan daya yang lebih rendah. Penambahan ESS-OB dapat dilakukan pada kereta lama maupun baru.

Pemanfaatan baterai sebagai ESS-OB selain dapat mengurangi beban puncak, akan memberikan kontribusi mengurangi pajak penggunaan listrik untuk operasional kereta api dikarenakan hasil dari regenerative braking dapat dimanfaatkan kembali setelah disimpan di ESS-OB, sehingga dapat menghemat biaya baterai dan instalasinya oleh operator kereta api. Upaya penambahan ESS-OB dapat dilakukan pada kereta lama maupun baru akan lebih menguntungkan karena perlu adanya integrasi sistem ESS. Selain itu, tidak akan mengganggu jadwal operasional kereta. Pada penambahan ESS-OB diperlukan juga komponen DC-DC converter untuk menyesuaikan level tangan sistem propulsi kereta dan ESS yang dipakai. Sehingga akan memerlukan biaya yang cukup mahal jika diaplikasikan pada kereta lama.

DAFTAR PUSTAKA

- Ardiansyah, Muhammad, Dwi Rahmalina. 2023. *Analisis Kerusakan Pada Permukaan Roda Kereta Rel Listrik*. Jurnal Asimetri: Jurnal Ilmiah Rekayasa Dan Inovasi Terakreditasi "Peringkat 4" oleh Kemenristek/BRIN, Nomor SK: 200/M/KPT/2020 Volume 5 Nomor 1 Tahun 2023, Januari 2023, Halaman 143-152.
- Damara, Allmy Bintang, Ahmad Qurthobi, Kharisma Bani Adam. 2021. *Rancang Bangun Purwarupa Pengereman Regeneratif Menggunakan Motor DC MY1016*. e-

Proceeding of Engineering, Vol.8, No.5, Oktober 2021, ISSN : 2355-9365, Hal. 5883-5889.

- Jakubowski, Aleksander, Natalia Karkosińska–Brzozowska, Krzysztof Karwowski, Andrzej Wilk. 2020. *Storage Electric Multiple Units On Partially Electrified Suburban Railway Lines*. Przegląd Elektrotechniczny, ISSN 0033-2097, R. 96 NR 4/2020, Pages 158-161.
- Kapetanović, Marko, Alfredo Núñez, Niels van Oort, Rob M.P. Goverde. 2021. *Reducing Fuel Consumption And Related Emissions Through Optimal Sizing Of Energy Storage Systems For Diesel-Electric Trains*. Applied Energy 294117018, Pages 1-20.
- Maghfiroh, Hari. 2020. *Pemanfaatan Baterai untuk Mengurangi Beban Puncak dan Meningkatkan Penyerapan Energi Regenerative Braking pada Kereta Api*. Jurnal Penelitian Transportasi Darat, Volume 22, Nomor 1, Juni 2020, Hal. 69-76.
- Pangestu, Alex William, I Nyoman Sutantra. 2020. *Studi Analisis Kinerja Sistem Rem Regeneratif pada Sepeda Motor Hybrid dengan Konfigurasi Seri*. Jurnal Teknik ITS Vol. 9, No. 2, ISSN: 2337-3539 (2301-9271 Print), Hal. 193-198.
- Putra, Rizki Pratama, Ibnu Hajar, Christine Widyastuti. 2021. *Desain Sistem Pengereman Regeneratif Pada Sepeda Listrik Ringkas*. Energi dan Kelistrikan: Jurnal Ilmiah Vol. 13, No. 1, Januari - Juni 2021, P-ISSN 1979-0783, E-ISSN 2655-5042, Hal. 11-19.
- Putra, Rizki Pratama, Novi Kurniasih, Dewi Purnama Sari, Zaky Syamsuddin. 2022. *Kontrol Torka Pengereman Regeneratif Pada Sepeda Listrik Dengan Integrasi Ultrakapasitor*. Prosiding Seminar Nasional Energi, Kelistrikan, Teknik Dan Informatika, Volume 3, Hal. 1-47.¥
- Samodrawati, Dian, Basilius Kevin Triantoro. 2022. *Analisis Perhitungan Energi Pengereman Regeneratif Kereta MRT Berdasarkan Mode Operasi Otomatis Kereta MRT Jakarta*. Seminar Nasional TREN D, Vol. 2, Hal. 189-198.
- Smith, David Murray. 2019. *A Review of Developments in Electrical Battery, Fuel Cell and Energy Recovery Systems for Railway Applications*. Honorary Senior Research Fellow and Emeritus Professor of Engineering Systems and Control, James Watt School of Engineering, University of Glasgow.