

Pemanfaatan Baterai untuk Mengurangi Beban Puncak dan Meningkatkan Penyerapan Energi *Regenerative Braking* pada Kereta Api

Hari Maghfiroh

Program Studi Teknik Elektro, Universitas Sebelas Maret

Jl. Ir. Sutami 36A, Surakarta, Indonesia, 57126

hari.maghfiroh@gmail.com

Diterima: 4 Maret 2020, Direvisi: 24 Juni 2020, Disetujui: 26 Juni 2020

Abstract

Application of Battery as an on-board ESS to Reduce Peak Load and to Increase Regenerative Braking's Energy Absorption: Increasing transportation needs and global warming due to pollution, make mass transportation to be the main alternative solution. Train is one of the most efficient modes of transportation in terms of energy compared to other modes of transportation. Electric trains are environment friendly trains. However, this train requires large electrical energy. One way to reduce the energy consumption of electric trains is by regenerative braking. Energy from regenerative braking is not optimally utilized yet and most are disposed in the brake resistor. Energy Storage System (ESS) can be used to store energy resulting from regenerative braking. ESS can be placed beside the track (trackside) or on the rolling stock (on-board). On-board ESS (OB-ESS) has higher efficiency and easier energy management. The battery was chosen to be OB-ESS because it is one type of ESS that is superior to other types, namely flywheel and super-capacitor. Simulation testing is done by modeling the substations, trains, OB-ESS, and brake resistors. In the testing, the train runs between two substations and stops at three train passenger stations. The test results show that the addition of batteries as OB-ESS on the train is able to absorb energy from regenerative braking well and can reduce peak loads by 2.11%. This benefit will be multiple if applied in many trains with high trip frequency. The addition of this battery also increases train mass by 0.07%.

Keywords: battery; ESS; railway; regenerative braking.

Abstrak

Semakin meningkatnya kebutuhan transportasi dan meningkatnya pemanasan global akibat polusi, maka sistem transportasi massal merupakan alternatif utama. Kereta api merupakan salah satu moda transportasi yang paling efisien dari segi energi dibandingkan moda transportasi lain. Kereta api listrik merupakan kereta yang ramah lingkungan. Akan tetapi, kereta ini memerlukan energi listrik yang besar. Salah satu cara untuk mengurangi konsumsi energi kereta listrik adalah dengan regenerative braking. Listrik hasil regenerative braking kurang dapat dimanfaatkan dan kebanyakan dibuang di brake resistor. Energy Storage System (ESS) dapat dipakai untuk menyimpan energi hasil regenerative braking. ESS dapat diletakkan disamping lintas (track-side) maupun pada sarana kereta api (on-board). ESS on-board (ESS-OB) memiliki efisiensi dan manajemen energi yang lebih mudah. Baterai dipilih menjadi ESS-OB karena merupakan salah satu jenis ESS yang lebih unggul dibanding tipe lain yaitu flywheel dan super-capacitor. Pengujian simulasi dilakukan dengan memodelkan substasiun, kereta api, ESS-OB, dan brake resistor. Pada pengujian kereta berjalan diantara dua substasiun dan berhenti di tiga stasiun kereta api. Hasil pengujian menunjukkan bahwa penambahan baterai sebagai ESS-OB di kereta mampu menyerap energi hasil regenerative braking dengan baik dan mampu mengurangi beban puncak hingga 2,11 %. Penghematan energi akan lebih banyak jika diterapkan pada beberapa unit kereta dan frekuensi perjalanan yang lebih tinggi. Penambahan baterai ini juga meningkatkan massa kereta hingga 0,07%.

Kata kunci: baterai; ESS; kereta api; regenerative braking.

I. Pendahuluan

Semakin meningkatnya kebutuhan transportasi dan meningkatnya pemanasan global akibat polusi maka sistem transportasi massal merupakan alternatif utama. Kereta api merupakan salah satu moda transportasi yang paling efisien dari segi energi dibandingkan moda transportasi lain (K. Kondo, 2010). Teknologi kereta api sudah banyak berkembang.

Jika dahulu kereta api bertenaga uap, selanjutnya dikembangkan kereta api diesel yang lebih efisien. Seiring berkembangnya zaman, kereta api listrik menjadi solusi utama moda transportasi masal yang ramah lingkungan.

Kereta api listrik memerlukan energi listrik sebagai sumber energinya. Akan tetapi, kereta api listrik ternyata menyerap energi listrik yang cukup besar setiap tahunnya (M. Saleh, 2017).

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*. *Regenerative braking* terbukti dapat menghemat konsumsi energi hingga 33% (S. Su, dkk, 2016) sedangkan menurut S. Chenh dkk dapat menghemat konsumsi energi hingga 40 % (S. Chenh, dkk., 2008).

Regenerative braking adalah mengubah motor traksi pada kereta menjadi generator pada saat pengereman yang menghasilkan energi listrik. Energi listrik hasil *regerative 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.

Beberapa cara yang dilakukan untuk meningkatkan pemanfaatan listrik hasil *regenerative braking* yaitu pengaturan penjadwalan, *reversible substation*, dan pemasangan ESS (A. Gonzalez, dkk., 2013). Pemasangan ESS mampu menghemat energi hingga 30 % (M. Khodaparastan, 2019). ESS atau piranti penyimpan energi yang banyak dipakai untuk menyimpan energi hasil *regenerative braking* pada kereta api adalah baterai, *flywheel*, dan *super-capasitor*. Ada dua pemasangan ESS yaitu ESS yang ada di samping lintas (*track side*) dan ESS yang ada dalam sarana kereta api itu (*on-board*). Menurut Gonzalez-Gill dkk (2014), ESS *on-board* (ESS-OB) memiliki efisiensi dan manajemen energi yang lebih mudah dibandingkan ESS *track side*. Pada penelitian ini akan dianalisa peran ESS-OB dalam mengurangi beban puncak substation dan juga dalam penyerapan energi hasil *regenerative braking*.

Pada paper ini akan dibahas tentang peluang penggunaan ESS-OB khususnya baterai untuk mengurangi beban puncak dan meningkatkan penyerapan energi *regenerative braking* pada kereta api. Kontribusi dari paper ini adalah memberikan prediksi penghematan energi dengan penggunaan ESS-OB berdasarkan hasil simulasi. Selain itu saran untuk implementasi pada kereta api juga diberikan.

II. Metodologi Penelitian

A. Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian ini adalah simulasi dengan data yang diperoleh dari studi literatur. Penelitian dilakukan pada akhir tahun 2019 di Laboratorium Instrumentasi dan Kendali, Program Studi Teknik

Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Sebelas Maret, Surakarta.

B. Metode Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan dengan studi literatur untuk memperoleh parameter model untuk disimulasikan. Model sistem kemudian dibuat dengan simulasi menggunakan *software* MATLAB Simulink.

C. Pengolahan Data

Simulasi dilakukan dengan memodelkan *substation*, kereta api, ESS-OB, dan *brake resistor*. Pada penelitian ESS-OB yang dipilih adalah baterai karena berdasarkan tinjauan yang dilakukan oleh D. Ronanki dkk (2017) 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 1** menunjukkan perbandingan antara baterai dan *flywheel* serta *super-capasitor*.

Pada pengujian simulasi ini, kereta bergerak antara tiga stasiun yang terhubung dengan dua substation seperti dapat dilihat pada **Gambar 2**. Jarak antara substation adalah 1100m sedangkan jarak antara stasiun 1 dan stasiun 2 adalah 586m 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.

Kereta api dimodelkan dengan metode “*backward looking*” (R. Barrero, 2011) yaitu perhitungan dimulai dari tenaga gerak yang diperlukan roda, kemudian naik ke *gearbox* dan seterusnya sampai *substasion* dengan memperhatikan efisiensi pada masing-masing komponen seperti ditunjukkan pada **Gambar 3**. Sedangkan dinamika kereta dimodelkan dengan berdasarkan Hukum Newton-2 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).

$$F_{traction} - \Sigma F_R = M \frac{dv}{dt} \dots\dots\dots (1)$$

$$\Sigma F_R = F_{rr} + F_{ar} + F_{gr} \dots\dots\dots (2)$$

$$F_{rr} = f_r Mg(\cos \alpha) \dots\dots\dots (3)$$

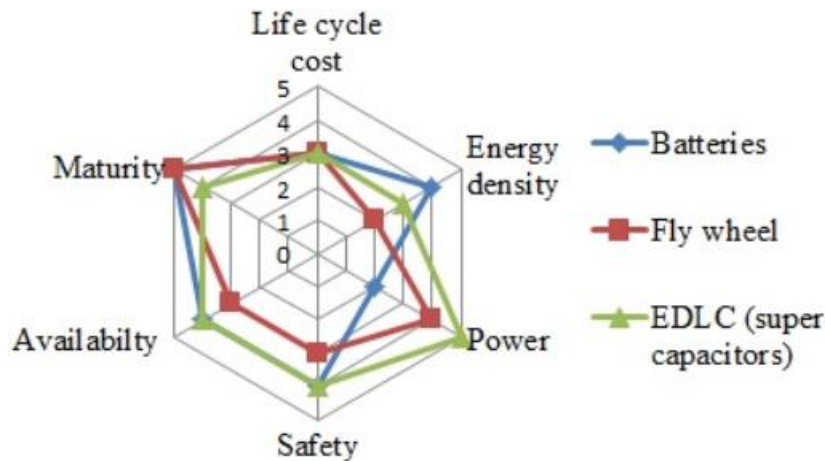
$$F_{ar} = \frac{1}{2} C_w A \rho v^2 \dots\dots\dots (4)$$

$$F_{gr} = Mg(\sin \alpha) \dots\dots\dots (5)$$

$$P_m = (F_{traction} / n)v \dots\dots\dots (6)$$

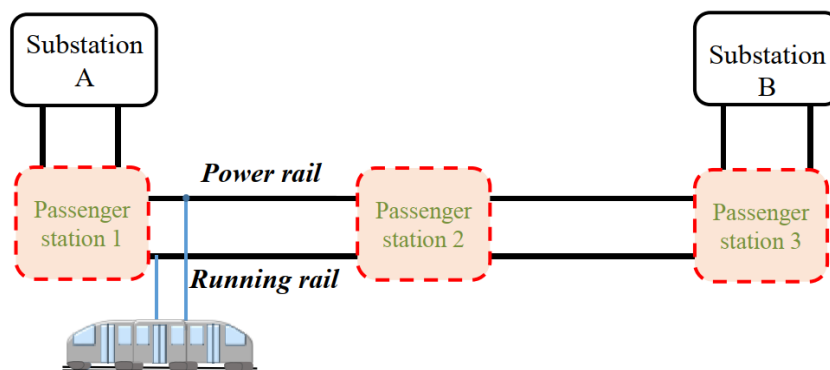
Setelah nilai $F_{traction}$ diperoleh dari persamaan (1) selanjutnya daya yang diperlukan oleh motor traksi, P_m pada Gambar 3, dihitung dengan persamaan (6). Metode “backward looking” dengan efisiensi setiap komponen dipakai untuk

menghitung daya yang harus dikeluarkan oleh substation. Secara lengkap penjelasan variable dan nilai yang dipakai dapat dilihat pada **Tabel 1**. Nilai variabel pemodelan merujuk pada (M. Saleh, 2017). Sedangkan spesifikasi baterai berdasarkan pertimbangan penambahan massa kereta api. Karena semakin berat baterai, massa total kereta api akan menjadi semakin berat



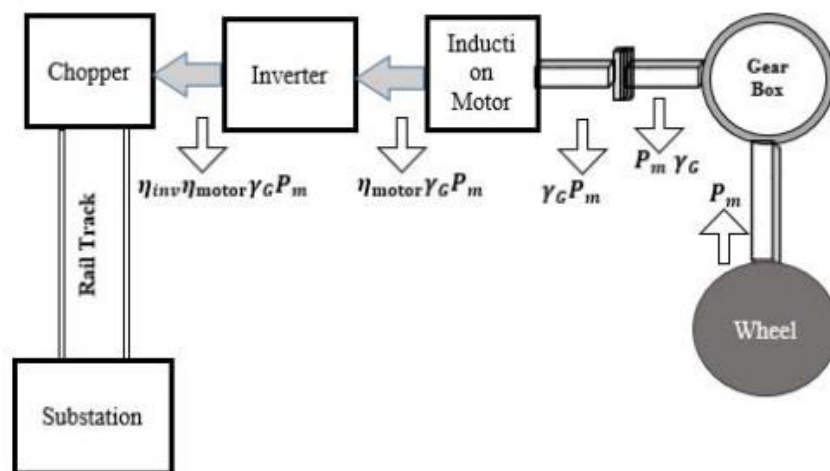
Sumber: D. Ronanki dkk, 2017

Gambar 1.
Perbandingan Tiga Jenis ESS.



Sumber: M. Saleh dkk, 2017

Gambar 2.
Skema Pengujian.



Sumber: M. Saleh dkk, 2017

Gambar 3.
Alur Pemodelan Backward Looking.

yang berarti pula kebutuhan gaya traksi akan semakin besar.

Selanjutnya ESS-OB dipilih menggunakan baterai jenis *Lithium-Ion (Li-ion)* karena memiliki kepadatan energi yang tinggi (Buchmann, 2011). 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 diluar batas tegangan yang mampu ditahan LAA. Logika pengkoneksian *brake resistor* ke bus DC-link dilakukan dengan menggunakan pensaklaran semi-konduktor, dalam hal ini IGBT. Kemudian keseluruhan komponen dirangkai dalam *software* MATLAB untuk dilakukan simulasi dan dianalisa hasilnya.

III. Hasil dan Pembahasan

Simulasi dilakukan dalam waktu 120 detik pada *software* MATLAB. **Gambar 4** menunjukkan

grafik kecepatan hasil simulasi. **Gambar 4(a)** menunjukkan grafik kecepatan terhadap waktu sedangkan **Gambar 4(b)** menunjukkan grafik kecepatan terhadap jarak. Dapat 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.

Kemudian dilakukan analisa pada daya listrik yang dikonsumsi kereta tanpa ESS-OB dan dengan ESS-OB seperti ditunjukkan pada **Gambar 5**. Gambar 5 terdiri dari 4 grafik yaitu grafik DC power 1 dan 2 yaitu daya listrik pada substasiun 1 dan 2. Selanjutnya ada daya listrik

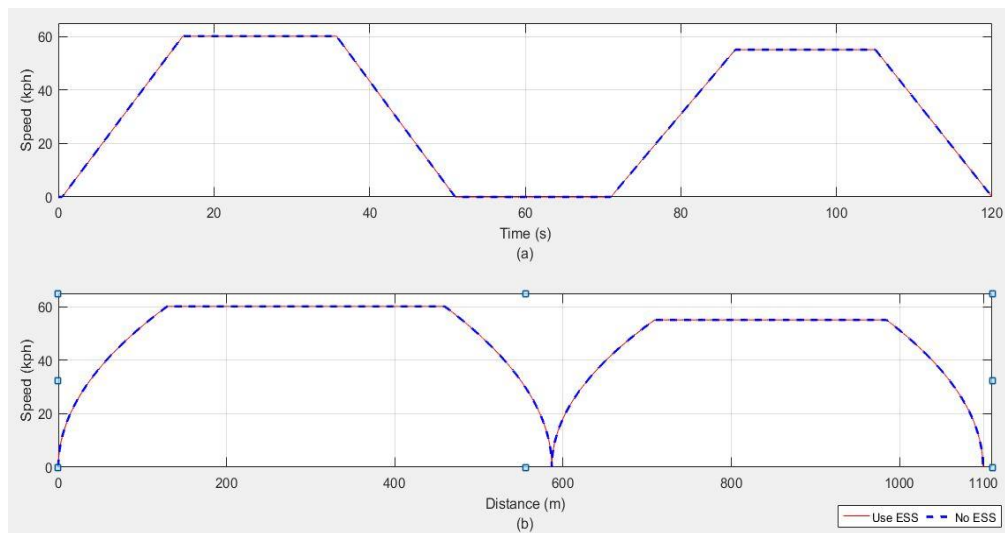
Tabel 1.
Keterangan dan Nilai Variabel

Parameter	Keterangan	Nilai
$F_{traction}$	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_{ar}	Gaya resistansi akibat aerodinamis	Berdasar formula (4)
F_{gr}	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

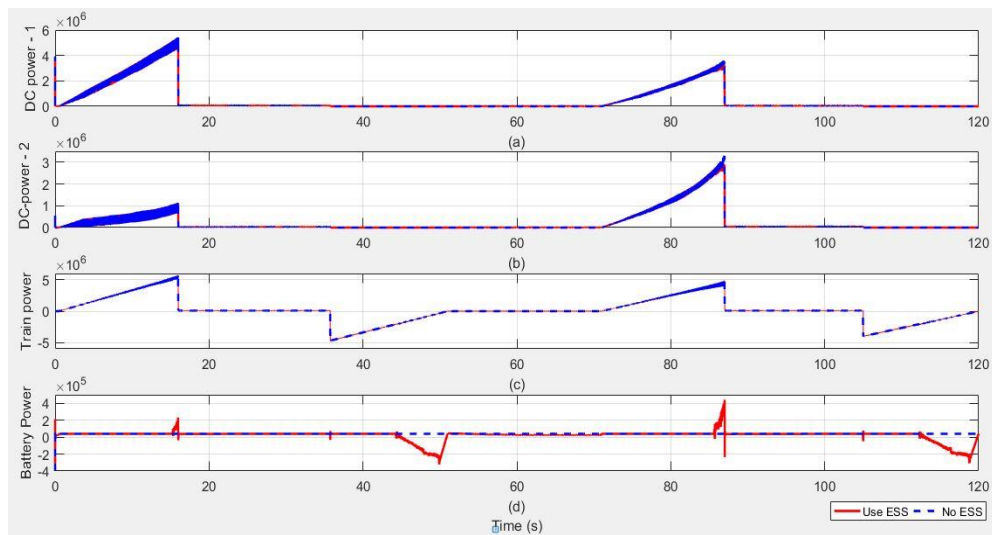
Sumber (M. Saleh, 2017)

Tabel 2.
Spesifikasi Baterai ESS-OB

Parameter	Nilai
Nominal voltase	300 V
Kapasitas	100 Ah
Massa	250 kg



Gambar 4.
Grafik Kecepatan.



Gambar 5.
Grafik Daya.

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 mendekat ke substasiun B. Kemudian pada grafik daya kereta, 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.

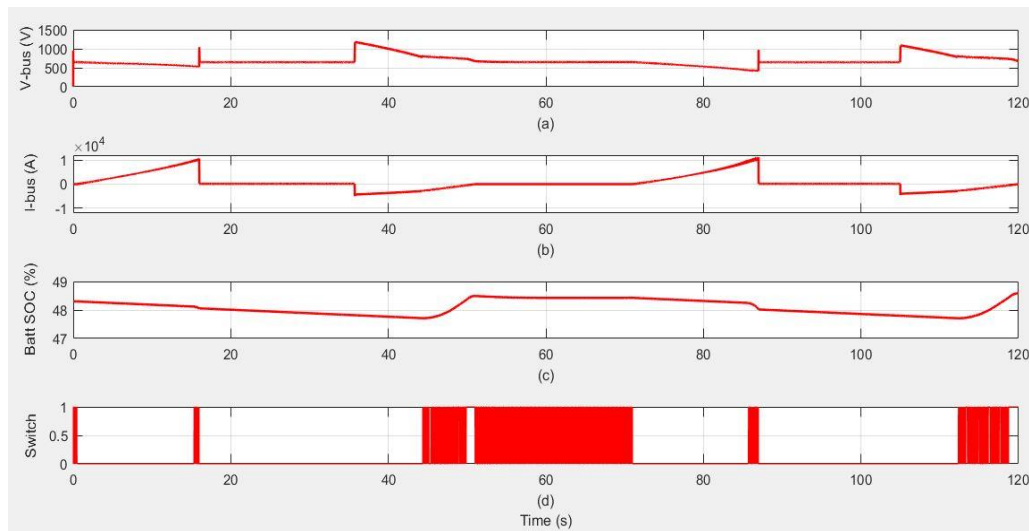
Pada grafik daya baterai, lonjakan positif menunjukkan baterai memberikan energi pada kereta, sedangkan lonjakan negatif menunjukkan saat baterai menerima energi hasil *regenerative braking*. Terlihat kontribusi baterai dalam mengurangi beban puncak cukup kecil. Hal ini karena daya baterai yang dipakai 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 5 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. Sumpavakup dkk (2017), diperlukan perhitungan jumlah baterai yang tepat karena penambahan baterai berarti juga menambah massa kereta. Selain itu, penghematan energi juga akan berlipat jika ESS-OB diterapkan pada banyak kereta dan dengan frekuensi perjalanan yang tinggi.

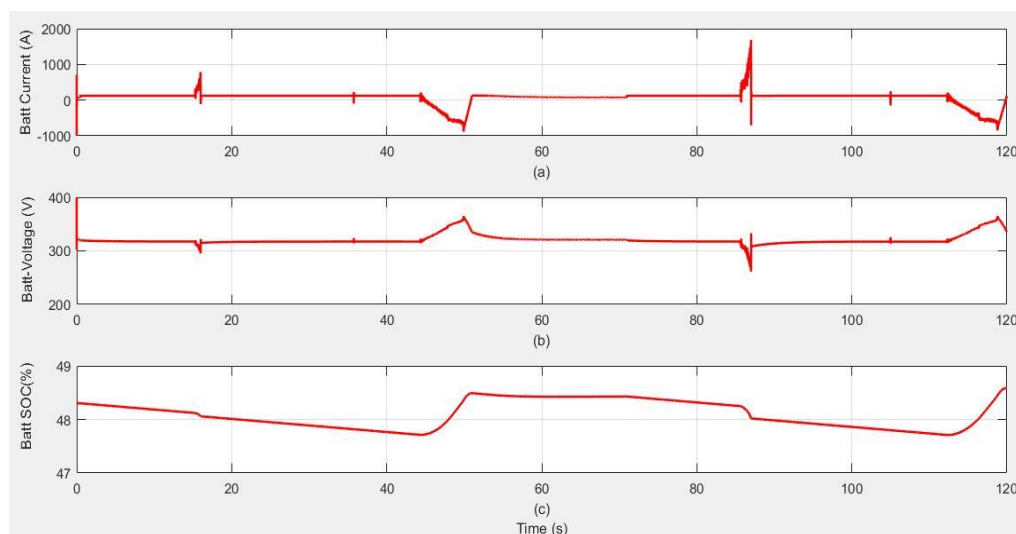
Gambar 6 menunjukkan grafik aktivasi koneksi baterai sebagai ESS-OB ke sistem propulsi kereta. Ada tiga syarat yang dipakai untuk koneksi baterai yaitu tegangan dan arus pada DC bus dan SOC baterai. Ketika motoring, baterai baru akan aktif saat nilai arus bus mencapai

10.000 A dan SOC baterai lebih dari 20%. Kondisi SOC baterai dijaga antara 20% - 90% untuk menjaga baterai agar tetap awet. Sedangkan ketika braking, saat tegangan bus melebihi 750 V maka *brake resistor* akan terkoneksi. Baterai dapat menyerap energi hasil *regenerative braking* ketika tegangannya dibawah 750 V. Pada detik ke-17 dan 88 baterai terkoneksi karena arus bus melebihi 10.000 A. Sedangkan pada detik ke 45-70 dan 112-118 baterai terkoneksi karena adanya *regenerative braking*, ditunjukkan dengan SOC baterai naik karena mendapat suplai energi.

Kondisi arus, tegangan dan SOC baterai ditunjukkan pada **Gambar 7**. Arus bernilai positif artinya baterai mensuplai daya listrik. Sebaliknya arus bernilai negatif berarti baterai menerima daya listrik. Voltase baterai memiliki pola grafik yang berlawanan dengan arus baterai, yaitu ketika arus naik maka tegangan turun dan



Gambar 6.
Aktivasi Baterai.



Gambar 7.
Grafik Baterai.

sebaliknya. Pada grafik SOC terlihat terjadi penurunan saat kereta mulai bergerak karena baterai ikut mensuplai energi. Ketika terjadi *regenerative braking*, sesuai syarat yang dapat dilihat pada Gambar 6, maka baterai akan terisi energi ditunjukkan dengan kenaikan SOC.

Pemanfaatan baterai sebagai ESS-OB selain dapat mengurangi beban puncak, akan memberikan kontribusi dalam mengurangi pajak penggunaan listrik untuk operasional kereta api. Hal ini karena, energi yang dihasilkan dari *regenerative braking* dapat dimanfaatkan kembali setelah disimpan di ESS-OB. Tinjauan ekonomi tentang biaya baterai dan instalasinya, serta besarnya dana yang dapat dihemat oleh operator kereta api diluar cakupan penelitian ini. Upaya 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. 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.

IV. Kesimpulan

Berdasarkan pengujian dan analisa yang telah dilakukan maka disimpulkan bahwa penggunaan ESS-OB dapat membantu mengurangi energi beban puncak dan dapat mengoptimalkan penyerapan energi hasil *regenerative braking*. 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.

V. Saran

Saran untuk penelitian selanjutnya adalah dengan menggunakan metode optimasi untuk mendapatkan spesifikasi seperti kapasitas dan massa baterai yang optimal sehingga dapat diperoleh penghematan yang maksimal. Selain itu, penggunaan ESS jenis lain seperti *super-capacitor* dan *flywheel* juga dapat dilakukan. Analisa ekonomi tentang biaya pemasangan dan penghematan juga dapat dilakukan untuk mendapatkan prediksi keuntungan dari metode ini.

Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Laboratorium Instrumentasi dan Kendali, Program Studi Teknik Elektro UNS yang telah memfasilitasi penelitian ini. Serta kepada tim www.keretalistrik.com yang telah memberikan banyak masukan.

Daftar Pustaka

- Buchmann, Isidor. 2011. *A Handbook on Rechargeable Batteries for Non-engineers*. 3rd edition, Fraserwood: Cadex Electronics.
- Chaiyut Sumpavakup, Tosaphol Ratniyomchai, Thanachai Kulworawanichpong. 2017. *Optimal energy saving in DC railway system with on-board energy storage system by using peak demand cutting strategy*. J. Mod. Transport, pp.223-235.
- Gonzalez-Gil A, Palacin R, Batty P, Powell JP. 2014. *Energyefficient urban rail systems: strategies for an optimal management of regenerative braking energy*. In: Proceedings of international conference transport research arena: transport solutions from research to deployment, pp 1-9.
- Gonzalez-Gil, R. Palacin, and P. Batty. 2013. *Sustainable urban rail systems: Strategies and technologies for optimal management of regenerative braking energy*. *Energy Convers. Manag.*, vol. 75, pp. 374-388.
- K. Kondo. 2010. *Review Paper Recent Energy Saving Technologies on Railway Traction Systems*. *IEEJ Trans*, vol. 5, pp. 298-303.
- M. Khodaparastan, A. A. Mohamed and W. Brandauer. 2019. *Recuperation of Regenerative Braking Energy in Electric Rail Transit Systems*. in *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 20, no. 8, pp. 2831-2847, Aug. 2019.
- M. Saleh, O. Dutta, Y. Esa and A. Mohamed. 2017. *Quantitative analysis of regenerative energy in electric rail traction systems*. *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Cincinnati, OH*, 2017, pp. 1-7.

- R. Barrero, O. Hegazy, P. Lataire, T. Coosemans, J. Van Mierlo. 2011. *An Accurate Multi-Train Simulation Tool for Energy Recovery Evaluation in DC Rail Networks*. International Review on Modelling & Simulations; Dec 2011, Vol. 4 Issue 6, p2985.
- Ronanki, S. A. Singh and S. S. Williamson. 2017. *Comprehensive Topological Overview of Rolling Stock Architectures and Recent Trends in Electric Railway Traction Systems*. in *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 3, no. 3, pp. 724-738, Sept. 2017.
- S. Chenh, M. Sautreuil, D. Riu, and N. Retière. 2008. *Quasi-Static Decoupled Load Flow Modelling of a Power Supply Network with AC-DC Converters Applied to Light Rail System*. in *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC*, 2008.
- S. Su, T. Tang, and Y. Wang. 2016. *Evaluation of Strategies to Reducing Traction Energy Consumption of Metro Systems Using an Optimal Train Control Simulation Model*. pp. 1-19.