

ANALISIS EVALUASI TEGANGAN BUS TERHADAP PEMBEBANAN BATERAI KENDARAAN LISTRIK 12 V DAN SUPERKAPASITOR MENGGUNAKAN METODE *STATE OF ENERGY*

Setyadi Tri Yoga^{1*}

¹ Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik dan Informatika, Universitas Bina Sarana Informatika, Jl. Kramat Raya No.98, Jakarta Pusat, DKI Jakarta. Telp. (021) 21231170

Received: 12 November 2024

Accepted: 14 Januari 2025

Published: 20 Januari 2025

Keywords:

Tegangan bus,
Superkapasitor, *State of Energy*

Correspondent Email:

setyadi.seg@bsi.ac.id

Abstrak. Penggunaan baterai sebagai suplai tenaga listrik dalam sistem elektromekanik saat ini memiliki alternatif penambahan sumber energi dengan mode hibrida sebagai aspek utama dalam manajemen energi listrik secara otonom yang umumnya terdapat pada sistem kendaraan listrik. Komponen kendaraan listrik sederhana berskala kecil dapat diciptakan dengan motor DC, pengendali frekuensi dan baterai 12V jenis *Lead Acid* mampu bekerja untuk mengampu suatu beban. Fluktuasi torsi motor DC dapat bergantung pada frekuensi lebar pulsa yang mengakibatkan terjadinya penurunan energi baterai menuju bus beban. Pengaturan suplai bus pembebanan secara praktis dapat menggunakan superkapasitor yang dihubungkan secara paralel terhadap beban memiliki keunggulan mampu mengurangi lonjakan arus dan mempertahankan tegangan pada bus pembebanan. Akan tetapi implementasi dari beban arus searah dalam periode konstan juga menyebabkan penurunan suplai energi listrik pada superkapasitor sehingga memerlukan dc-dc konverter untuk mengatur tegangan bus beban. Dalam penelitian ini telah dikembangkan metode *State of Energy* (SOE) sebagai pembatas tegangan maksimum sistem melalui penambahan XL6009 *Boost Converter* untuk sisi bus beban. Hasil dari penelitian menunjukkan setpoint untuk tegangan bus beban 12 V dan 13 V mengashilkan SOE tertinggi sebesar 75,56% dan 87,68%.

Abstract. The utility of batteries as a power supply in electromechanical systems currently has the alternative of an additional energy source with hybrid mode as the main aspect in autonomous electrical energy management which was generally found in electric vehicle systems. The Simple small-scaled electric vehicle component can be created with a DC motor, frequency controller, and 12V Lead Acid battery enabled to support a load. DC motor torque fluctuation depends on the pulse width frequency which causes decreases in battery energy towards the load bus. The control of the loading bus supply was practically enabled using supercapacitor connected in parallel to the load having the advantage enabled to reducing current surges and maintaining voltage on the loading bus. However, implementing a direct current load in a constant period also causes a decrease in the electrical energy supply to the supercapacitor, thus requiring dc-dc converter to regulate the voltage of the load bus. In this research, the State of Energy method has been developed as a maximum system voltage limiter by adding an XL6009 Boost Converter for the load bus's side. The results show that the setpoint for bus

load voltages of 12 V and 13 V produces the highest SOE of 75.56% and 87.68%.

1. PENDAHULUAN

Utilitas baterai sebagai suplai tenaga listrik DC (*Direct Current*) dalam pemanfaatan beban mikro mengalami perkembangan skenario penyimpanan energi dengan mengedepankan mode hibrida sebagai fungsi utama untuk menginjeksi suplai energi ke dalam *bus* beban yakni dengan memakai superkapasitor. Penggunaan beban DC khususnya pada motor listrik skala kecil masih dapat ditemukan pada prototipe sepeda motor listrik dan mobil listrik dengan baterai jenis *Lead Acid* yang memiliki sistem kontrol pengaturan kecepatan berbasis PWM (*Pulse Width Modulation*) [1]. Sistem pengaturan kecepatan bekerja dengan memberikan sinyal frekuensi ke dalam terminal gerbang (*gate*) komponen pensklaran yang umumnya menggunakan Mosfet. Adanya *input* pensklaran tentunya dapat menyebabkan perubahan nilai tegangan dan arus secara konstan dalam motor DC yang berakibat pada menurunnya kinerja suplai energi dari baterai [2]. Skema untuk mempertahankan energi baterai terhadap kontinuitas beban DC yang dikembangkan oleh penelitian Farhad, dkk [3] dapat dilakukan dengan mode pembagian beban (*load share*) menjadi dua sub-sistem dalam satu suplai *bus* yang dipisahkan dengan *buck converter* untuk menyerap kelebihan arus beban dan *boost converter* untuk menguatkan tegangan sistem yang dihubungkan dengan superkapasitor. Penambahan superkapasitor ke dalam sistem suplai energi dapat dirangkai dengan pemodelan rangkain R-C secara seri dan dihubungkan secara paralel ke dalam sistem yang bertujuan untuk mengurangi kelebihan arus *starting* pada motor listrik [4].

Kombinasi penggunaan superkapasitor dengan baterai menurut penelitian Suryahadi, dkk dapat memberikan batas minimum tegangan sistem untuk mitigasi pengisian baterai dengan menggunakan metode *State of Charge (SOC)* sebesar 50% dari kapasitas maksimum baterai guna menghindari kekosongan energi baterai [5]. Kapasitas beban konstan sangat mempengaruhi kualitas konsumsi arus listrik dalam baterai, baik pada sistem suplai terpisah maupun terhubung

dengan sumber *dc microgrid* [6], sehingga penempatan superkapasitor oleh peneliti Farshid dan Ebrahim [7] juga dapat diberikan rangkaian penstabil tegangan berupa kontrol kapasitansi adaptif dalam sebuah simulator transportasi listrik untuk motor DC berkapasitas 1,5 kW mampu meningkatkan nilai tegangan *bus* sebesar 91,5% dari nilai nominal *drop* tegangan sebesar 1350 V terhadap kondisi kecepatan penuh yang mencapai kenaikan tegangan maksimum sebesar 1475 V. Kontrol kapasitansi adaptif mampu mereduksi arus beban motor DC dari 400 A menjadi 200 A, sehingga kelebihan arus dapat diatasi secara signifikan.

Pemasangan kombinasi superkapasitor dengan baterai *Lead Acid* memiliki spesifikasi batas kinerja arus berdasarkan *rating* arus per-jam (*Ampere-hour*) melalui penyesuaian suplai arus pengisian. Proses pengisian superkapasitor dan baterai *Lead Acid* 12 V dalam penelitian Prasit, dkk [8] mengemukakan pengisian arus ke dalam baterai mobil listrik mulai dari 79,15 A hingga 10 A menghasilkan efisiensi pemakaian sebesar 17,26% hingga 98,88% untuk pemakaian jarak jauh maupun jarak dekat. Pengoperasian sistem tersebut direpresentasikan dengan sistem pensklaran berupa relai *SPDT (Single Pole Double Throw)* untuk menentukan mode pengisian energi ke sistem dan operasi beban motor DC. Karakteristik baterai *Lead Acid* mode *VRLA (Valve Regulated Lead Acid)* memiliki nilai impedansi internal yang rendah dan mampu menahan arus *overcharging*, namun eksistensi arus yang tinggi dalam baterai juga mengakibatkan terjadinya penurunan siklus usia pemakaian [9], [10].

Teknik pengalihan arus beban konstan untuk baterai *Lead Acid* dalam penelitian Alitsar, dkk [11] menggunakan mode pengereman (*braking*) sebagai pembangkit sumber energi DC dari generator serta mengisi energi listrik ke komponen baterai dan superkapasitor dengan spesifikasi sebesar 16,2 V / 83,3 F mampu menyerap kelebihan arus beban ke dalam masing-masing komponen sebesar 1,5A. Kemudian mode kontrol arus beban DC yang

dikembangkan dalam penelitian Al Tahtawi, dkk [12] menggunakan bantuan sistem *fuzzy logic* dengan parameter tegangan baterai, tegangan superkapasitor dan arus beban untuk merespon kebutuhan beban dapat menyerap arus yang lebih besar oleh superkapasitor ketika tegangan *bus* mencapai nilai maksimum dengan regulasi “*i superkapasitor > i baterai*” dengan selisih nominal arus beban sebesar 0,51 A pada dua model beban resistif 20 Ω dan 12 Ω . Kemampuan adaptasi baterai dengan pemakaian beban listrik konstan memiliki pengaruh pada kesehatan baterai (*State of Health*) yang ditentukan melalui laju arus dengan akurasi yang tinggi, akan tetapi pengukuran parameter laju arus jarang digunakan dalam kondisi nyata dikarenakan perubahan kapasitas nominal tertentu pada baterai yang dapat berubah setiap waktu [13], sehingga memerlukan salah satu pengaturan pada sisi tegangan sistem agar mampu mempertahankan kapasitas nominalnya secara konstan. Pengembangan evaluasi tegangan sistem untuk memenuhi kebutuhan suplai *bus* dalam penelitian ini didesain dengan pendekatan *State of Energy (SOE)* menggunakan parameter persentase perbandingan tegangan superkapasitor terhadap tegangan sistem yang ditentukan dengan nilai maksimum melalui pengaturan tegangan keluaran pada sisi *boost converter* dari superkapasitor [14]. Adapun penambahan *boost converter* menggunakan tipe *XL6009* yang bertujuan untuk menaikkan tegangan sistem secara konstan, sehingga diharapkan dapat membantu mempertahankan nilai tegangan masukan pada sisi *bus* dengan beban motor DC sebagai simulasi pengoperasian mesin kendaraan listrik [15], [16].

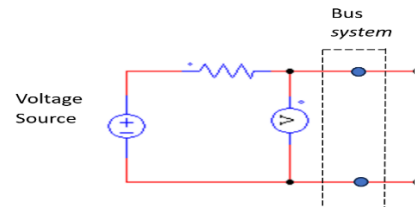
2. TINJAUAN PUSTAKA

Konsep sistem pembebanan DC menggunakan teorema tegangan *bus* dan nilai *State Of Energy* sebagai tinjauan utama untuk menganalisa kondisi titik beban dan suplai energi dari baterai melalui *input* referensi tegangan sistem.

2.1. Tegangan Bus

Sistem *bus* merupakan bagian dari suatu sub sistem sebagai terminal *input* tenaga [12], [14] listrik dalam percabangan rangkaian yang

dapat digunakan untuk menentukan nilai tegangan. Konsep sistem *bus* merupakan bagian dari suplai koneksi antara titik sumber tenaga listrik dengan beban. Skema dari suatu *bus* sistem rangkaian listrik ditunjukkan pada gambar 1.



Gambar 1. Skema Suplai Bus Rangkaian

Suatu sistem *bus* rangkaian dapat direpresentasikan sebagai titik koneksi sumber tenaga listrik maupun beban yang dapat diterapkan berdasarkan kebutuhan sistem. Melalui deskripsi tersebut maka kondisi sistem *bus* pembebanan DC dapat digunakan sebagai *input* dan percabangan suatu suplai energi listrik dengan batas regulasi tegangan yang ditentukan.

2.2. Nilai State Of Energy

State Of Energy dalam suatu *bus* sistem dapat dinyatakan melalui perbandingan kapasitas persentase dari nilai tegangan yang diperlukan dalam sebuah sistem pembebanan DC untuk menjaga batas nilai tegangan suplai dari baterai hingga superkapasitor. Pendekatan dari *State of Energy* dapat ditentukan melalui persamaan berikut [14].

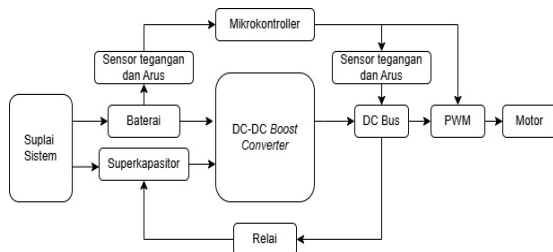
$$\text{State of Energy} = \left(\frac{V_{sc}}{V_{\max}} \right)^2 \times 100 \quad (1)$$

V_{sc} merupakan nilai tegangan dari superkapasitor dan $V_{\max}$ merupakan nilai tegangan yang ditentukan berdasarkan kebutuhan referensi tegangan sistem sesuai dengan pembebanan.

3. METODE PENELITIAN

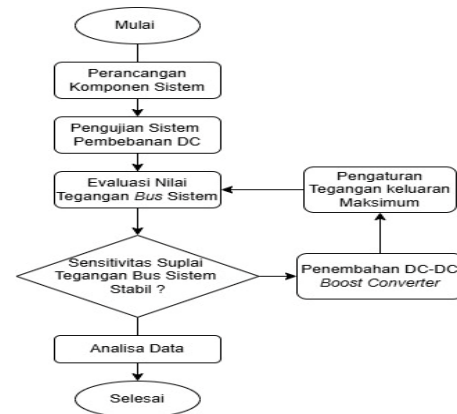
Skema pengaturan tegangan sistem suplai *bus* menggunakan kombinasi superkapasitor dan baterai *Lead Acid* 12 V dengan komponen pengaturan tegangan tambahan yakni *boost*

converter melalui *input* penyetelan *trimpot* untuk mengkondisikan nilai tegangan menuju suplai *bus* berdasarkan pada pengoperasian beban secara konstan. Skema dari alur pengaturan tegangan sistem *bus* ditunjukkan pada diagram blok berikut.



Gambar 2. Diagram blok alur kerja sistem

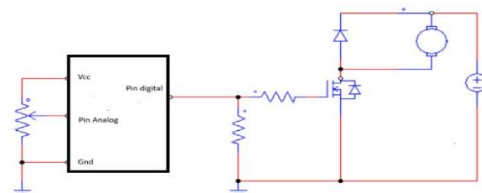
Pengoperasian sistem diawali dengan memanfaatkan *power supply* sebagai suplai utama untuk baterai dan superkapasitor, kemudian pengaturan pemakaian baterai dan superkapasitor dapat dikendalikan menggunakan mikrokontroller. Mikrokontroller yang digunakan dalam penelitian ini memakai arduino mega yang dikembangkan sebagai monitoring pengukuran dan umpan balik tegangan DC *bus* sistem untuk mengaktifkan mode energi hibrida (*hybrid*) menggunakan relai, serta mengendalikan nilai keluaran PWM (*Pulse Width Modulation*) untuk pengaturan kecepatan motor DC. Penambahan komponen *boost converter* dalam penelitian ini difokuskan untuk menentukan batas nilai tegangan maksimum dari sisi keluaran *boost converter* menuju *bus* pembebanan. Hasil yang diuji pada pengembangan sistem dalam penelitian ini adalah mekanisme pengaruh ketahanan suplai tegangan *bus* terhadap pembebanan motor DC secara konstan untuk setiap pengaturan nilai tegangan pada komponen *boost converter* melalui prosedur pengembangan sistem yang terdapat pada gambar 3.



Gambar 3. Alur prosedur penelitian

3.1. Pengembangan Komponen Sistem

Tahapan pengembangan sistem dalam penelitian ini dilakukan dengan perancangan komponen sistem yang terdiri dari *power supply* 12V/2A sebagai sumber pengisian energi listrik, baterai 12V/2,6 Ah tipe *Lead Acid* dan enam buah superkapasitor seri sebesar 16,2 V / 16,67 F dengan kapasitas arus maksimum sebesar 2,025 A, kemudian mengembangkan sistem kontrol melalui modul mikrokontroller untuk menentukan pemakaian sensor tegangan dan sensor arus berdasarkan nilai yang dihasilkan melalui *input* pin analog dan pin digital dengan kecepatan pembacaan data melalui perintah *serial.begin* untuk menghasilkan data secara konstan. Pengaturan kecepatan motor DC dikembangkan dengan pembangkit sinyal PWM (*Pulse Width Modulation*) melalui pin *digital* 3 dengan nilai tegangan *digital* maksimum sebesar 5V untuk mengaktifkan pensaklaran pada Mosfet tipe IRFZ44N. Skema dari rangkaian kontrol kecepatan motor DC ditunjukkan pada gambar 4.



Gambar 4. Skema Pengendali Kecepatan Motor DC

3.2. Pengujian Sistem Pembebanan DC

Kinerja sistem *bus* pembebanan DC diuji dengan mengatur *setpoint* tegangan keluaran

DC-DC *boost converter* tipe *XL6009* dengan spesifikasi tegangan *input* minimum 12 V dan maksimum sebesar 18,5 V, serta kinerja arus maksimum sebesar 2,5 A sebagai pembatas tegangan maksimum menuju *bus* pembebanan terhadap perubahan kecepatan motor DC yang disertakan dengan evaluasi tegangan sistem. Beban motor DC dalam penelitian ini menggunakan tipe RS 775 dengan kapasitas 12V / 1,2 A dan hanya dikondisikan berbeban setelah pengisian baterai dan superkapasitor dengan menaikkan nilai tegangan keluaran pada *boost converter*. Mode kontrol pensaklaran suplai energi hibrida menggunakan relai *dual channel* yang difokuskan pada rangkaian superkapasitor sebagai suplai tegangan tambahan pada baterai serta tegangan operasi *bus* diberikan dengan 12V hingga 13V.

3.3. Evaluasi Tegangan Bus Sistem

Perancangan evaluasi tegangan sistem *bus* digunakan untuk menentukan batas tegangan maksimum yang dapat dianalisa melalui nilai tegangan referensi sistem menggunakan metode *State Of Energy (SOE)* dengan persamaan berikut [14].

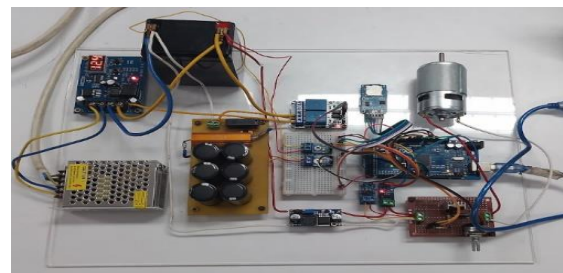
$$\text{State of Energy} = \left(\frac{V_{sc}}{V_{max}} \right)^2 \times 100 \quad (1)$$

Nilai dari *State of Energy* dapat digunakan untuk menentukan kapasitas baterai dari selisih kondisi maksimum yakni sebesar 100% terhadap nilai persentase *SOE* yang dihasilkan. Dari persamaan tersebut maka persentase kapasitas tegangan suatu sistem dapat ditentukan secara relatif berdasarkan referensi tegangan maksimum *bus* sistem. Tegangan referensi maksimum sistem dalam penelitian ini hanya ditetapkan sebesar 14 V untuk mengurangi terjadinya *streesing* pada komponen baterai dalam kondisi pembebanan konstan.

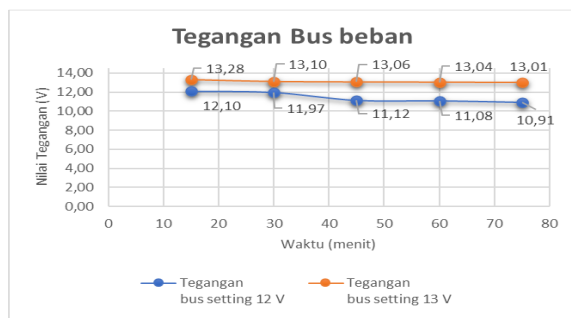
4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengoperasian rangkain secara keseluruhan diberikan dengan kondisi baterai *Lead Acid* dan superkapasitor yang telah terisi secara penuh dengan masing-masing kapasitas 12,38 V dan 13,30 V melalui *power supply*. Proses dari pemakaian serta pengukuran beban secara

konstan melalui sistem mikrokontroller dilakukan pengambilan data setiap 15 detik untuk setiap kondisi kecepatan motor yang diberikan sumber tenaga listrik dari *bus* beban dan terhubung dengan pengendali *PWM* untuk mengatur rotasi dan pembebanan dengan menyesuaikan batas nilai yang terukur dalam *bus* beban. Bentuk fisik dari komponen rangkaian terdapat pada gambar 5. Proses pembebanan sistem *bus* dengan kondisi kecepatan motor DC dan suplai tegangan yang berbeda menghasilkan kapasitas tegangan, arus dan nilai *State of Energy* yang berbeda yang terdapat pada tabel 1 dan tabel 2. Karakteristik pada nilai *setpoint* tegangan untuk *bus* beban 12V memiliki nilai tegangan tertinggi sebesar 12,10 V dan terendah sebesar 10,91 V. Kondisi tegangan mewakili keadaan arus listrik yang mengalir ke motor DC dengan arus *bus* maksimum sebesar 1,73A. Rangkaian superkapasitor dioperasikan dengan tegangan awal 12,17 V dan terhubung langsung dengan beban. Kemudian nilai *setpoint* untuk bus beban 13 V memiliki nilai tegangan tertinggi sebesar 13,28 V dan terendah sebesar 13,01 V memiliki nilai arus *bus* maksimum pembebanan sebesar 1,63 A, serta tegangan awal superkapasitor sebesar 13,11. Adanya proses penyusutan tegangan maupun arus dikarenakan adanya beban konstan serta perubahan *rpm* yang mengacu pada kondisi kecepatan di setiap level tegangan. Kinerja dari kondisi tegangan *bus* ditunjukkan pada gambar 6.



Gambar 5. Rangkaian Fisik DC Load bus



Gambar 6. Kinerja Tegangan Bus beban

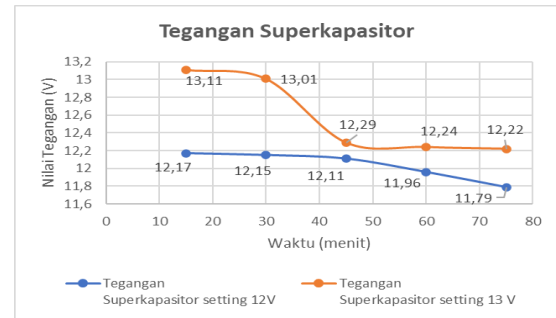
Tabel 1. Hasil Pengaturan Tegangan bus 12 V Melalui Boost Converter XL6009

Tegangan Baterai (V)	Tegangan Sc (V)	Arus Sc (A)	Volta se bus (V)	Arus bus (A)	SOE (%)	Rpm
12,31	12,17	1,52	12,10	1,73	75,56	3613
12,29	12,15	1,50	11,97	1,33	75,31	3425
12,26	12,11	1,48	11,12	1,30	74,82	3233
12,22	11,96	1,47	11,08	1,26	72,98	3126
12,20	11,79	1,44	10,91	1,22	70,92	3114

Tabel 2. Hasil Pengaturan Tegangan bus 13 V Melalui Boost Converter XL6009

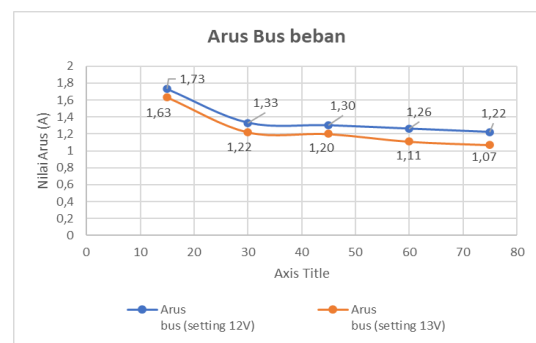
Tegangan Baterai (V)	Tegangan Sc (V)	Arus Sc (A)	Volta se bus (V)	Arus bus (A)	SOE (%)	Rpm
12,35	13,11	1,54	13,28	1,63	87,68	3721
12,30	13,01	1,52	13,10	1,22	86,35	3656
12,29	12,29	1,51	13,06	1,20	77,06	3634
12,25	12,24	1,50	13,04	1,11	76,44	3621
12,23	12,22	1,49	13,01	1,07	76,19	3562

Nilai tegangan yang terdapat pada tegangan pada bus beban sangat berpengaruh pada kondisi input suplai baterai dan superkapasitor sebagai koponen energi listrik tambahan untuk merespon sensitivitas beban. Arus bus yang juga merupakan bagian dari beban motor DC berdampak pada naiknya arus yang dibangkitkan melalui sumber baterai saat kondisi pensaklaran awal. Karakteristik dari kinerja tegangan pada superkapasitor ditunjukkan pada gambar 7.



Gambar 7. Kinerja Tegangan Superkapasitor

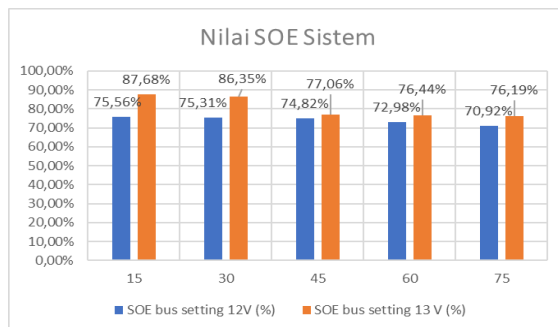
Tegangan superkapasitor dioperasikan menggunakan tegangan awal setelah pengisian secara penuh. Rangkaian superkapasitor dapat bekerja dengan memberikan respon pengisian muatan berupa tegangan yang kemudian terhubung secara paralel terhadap beban untuk mempertahankan nilai tegangan secara konstan, kemudian menyerap arus beban berlebih sehingga dapat mengurangi lonjakan arus beban secara konstan akibat menurunnya suplai energi baterai. Nilai terendah untuk *setpoint* bus 12 V menghasilkan 11,79 V dan *setpoint* bus 13 V menghasilkan 12,22 V. Kondisi tersebut menunjukkan adanya selisih tegangan superkapasitor sebesar 0,43 V disertai dengan terjadinya penyusutan suplai energi baterai yang terbatas pada kapasitas maksimum baterai *Lead Acid* sebesar 12 V. Respon dari kondisi arus bus beban ditunjukkan pada gambar 8.



Gambar 8. Kinerja Arus Bus beban

Arus bus yang dihasilkan dalam pembebanan motor DC memberikan perbedaan penurunan nilai nominal dari *setpoint* bus 12 V sebesar 1,22 A dan *setpoint* bus 13 V sebesar 1,07 A. Kondisi tersebut memberikan selisih arus pembebanan sebesar 0,15 A terhadap penyusutan energi dari baterai. Adapun besaran tegangan superkapasitor pada titik grafik

tersebut berkisar pada 11,79 V dan 13,01 V. Kinerja tegangan superkapasitor pada gambar 6 menunjukkan adanya titik ekuivalen pada 12,11 V untuk arus 1,30 A dan 12,29 V untuk arus *bus* 1,20 A. Kondisi tersebut terjadi dikarenakan kecepatan motor DC mencapai nilai kesetabilan dengan selisih kecepatan sebesar 401 rpm dengan nilai tegangan frekuensi *PWM* sebesar 4,89 V, sehingga tegangan yang diperkirakan untuk suatu *bus* pembebanan berkisar 12 V dengan pengaturan nilai tegangan yang lebih tinggi, serta mampu mempertahankan pembebanan secara konstan. Kinerja dari nilai *State of Energy* yang dihasilkan dari pengoperasian beban ditunjukkan pada gambar 9.



Gambar 9. Nilai SOE Sistem Pembebanan DC Nilai dari *State of Energy* (SOE) pada nilai tegangan yang dihasilkan dari superkapasitor dan tegangan referensi sistem sebesar 14 V memberikan kemampuan nilai pembatas tegangan maksimum untuk masing-masing *setpoint* pada *bus* beban motor DC. Kondisi *setpoint* untuk nilai tegangan *bus* 12V memiliki evaluasi nilai tertinggi sebesar 75,56% merepresentasikan pemakaian beban sebesar 24,44%, kemudian untuk nilai terendah sebesar 70,92% pemakaian beban sebesar 29,08%. Adapun *setpoint* untuk nilai tegangan *bus* 13 V memiliki nilai evaluasi tertinggi sebesar 87,68% dengan pemakaian sebesar 12,32 %, serta nilai terendah 76,19% dengan pemakaian sebesar 23,81%. Dengan adanya koreksi dari nilai *State of Energy* suatu sistem beban DC, maka besarnya nilai SOE dapat dipengaruhi oleh faktor tegangan kapasitor yang dapat mempertahankan nilai tegangan dan mengurangi arus ke beban sehingga dapat menjaga kualitas arus *bus* ke motor DC dalam kondisi stabil untuk mode simulasi kendaraan listrik skala kecil.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan pengoperasian pembebanan motor DC 12 V dengan evaluasi tegangan *bus* sistem diperoleh kesimpulan sebagai berikut :

- Kinerja sistem pembebanan *bus* dengan motor DC menggunakan kombinasi superkapasitor berkapasitas 16,2 V / 16,67 F dan baterai jenis *Lead Acid* 12V mampu bekerja dengan mengurangi lonjakan arus pada *bus* beban untuk kondisi operasi beban dalam kecepatan yang beragam.
- Parameter SOE mampu mengkoreksi nilai persentase kapasitas suatu suplai energi listrik DC untuk *bus* beban dengan *setpoint* tegangan 12 V hingga 13 V. Kondisi *setpoint* tegangan *bus* bekerja secara maksimum dengan persentase evaluasi kapasitas energi sebesar 75,56 % dan 87,68 % terhadap beban motor DC yang hanya dapat diterapkan sebagai simulasi prototipe kendaraan listrik skala kecil.
- Penggunaan sistem hibrida dalam penelitian dapat dikembangkan lebih lanjut dengan melakukan optimasi pada sistem pengendalian beban DC dan manajemen energi untuk melakukan pengaturan tegangan *bus* secara proporsional yang sesuai dengan spesifikasi sumber energi pada baterai untuk sebuah sistem prototipe pengendali motor DC dengan *rpm* rendah.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Universitas Bina Sarana Informatika dan staff laboratorium Teknik Elektro yang telah membantu dalam proses perancangan dan pengujian perangkat sistem dalam penelitian ini, sehingga pengembangan model sistem dapat terselesaikan dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. P. Moholkar, D. S. Bankar, and P. B. Karandikar, "Supercapacitor based cost effective hybrid energy storage system with reduction in battery size for diesel generator

- cold cranking,” *Indones. J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 31, no. 1, p. 22, Jul. 2023, doi: 10.11591/ijeecs.v31.i1.pp22-32.
- [2] C. D. S and A. Ramkumar, “Design and Implementation of Adaptive Deep Learning-Based DC-DC Converters for Photovoltaic Systems with Battery Storage in Electric Vehicles,” *preprints.org*, vol. 1, pp. 1–22, Jul. 2024, doi: 10.20944/preprints202407.0545.v1.
- [3] F. Barati, B. Ahmadi, and O. Keysan, “A Hierarchical Control of Supercapacitor and Microsources in Islanded DC Microgrids,” *IEEE Access*, vol. 11, pp. 7056–7066, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3237684.
- [4] N. K. M. and S. S. Kumar, “A Novel Idea of Balanced Super Capacitors with Fuzzy Control Using Renewable Energy Harvesting System,” *Perspect. Commun. Embed.-Syst. Signal-Process. PiCES – Int. J.*, vol. 5, pp. 73–77, Sep. 2020, doi: 10.5281/ZENODO.4018797.
- [5] S. Hardi, R. Nur Salam, S. Suherman, and S. Riadi, “Optimizing Microgrid Efficiency with Battery and Super Capacitor Hybrid Systems,” *E3S Web Conf.*, vol. 519, pp. 1–8, 2024, doi: 10.1051/e3sconf/202451902010.
- [6] C. Wang, K. Huang, and C. Wu, “Enhanced power supply circuitry with long duration and high-efficiency charging for indoor photovoltaic energy harvesting internet of things end device,” *IET Power Electron.*, vol. 17, no. 5, pp. 663–674, Apr. 2024, doi: 10.1049/pel2.12683.
- [7] F. Naseri, E. Farjah, Z. Kazemi, E. Schaltz, T. Ghanbari, and J.-L. Schanen, “Dynamic Stabilization of DC Traction Systems Using a Supercapacitor-Based Active Stabilizer With Model Predictive Control,” *IEEE Trans. Transp. Electrification*, vol. 6, no. 1, pp. 228–240, Mar. 2020, doi: 10.1109/TTE.2020.2964423.
- [8] P. Phoosomma, “Application of a Single Supercapacitor for Driving an Electric Vehicle,” *PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY*, vol. 1, no. 8, pp. 36–42, Aug. 2022, doi: 10.15199/48.2022.08.07.
- [9] W. G. Suci, “Increasing Electric Bicycle Performance using Lithium Ferro Phosphate Batteries with a Battery Management System,” *Energy Storage Technol. Appl.*, vol. 2, no. 1, p. 30, Jun. 2022, doi: 10.20961/esta.v2i1.61525.
- [10] W. Irdianto, I. M. Nauri, and Moh. Nursalim, “Analysis of supercapacitor as a battery substitute in motorcycle,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 1034, no. 1, pp. 1–9, Feb. 2021, doi: 10.1088/1757-899X/1034/1/012044.
- [11] A. Teasdale, L. Ishaku, C. V. Amaechi, I. Adelusi, and A. Abdelazim, “A Study on an Energy-Regenerative Braking Model Using Supercapacitors and DC Motors,” *World Electr. Veh. J.*, vol. 15, no. 7, p. 326, Jul. 2024, doi: 10.3390/wevj15070326.
- [12] A. R. Al Tahtawi, M. R. Iskandar, S. Yahya, T. Tohir, and D. Aming, “Battery-Supercapacitor Current Control Using Fuzzy Supervisory with PI Controller for Electric Vehicle Application,” *Curr. J. Int. J. Appl. Technol. Res.*, vol. 3, no. 2, pp. 106–119, Oct. 2022, doi: 10.35313/ijatr.v3i2.82.
- [13] C. Vidal, P. Malysz, P. Kollmeyer, and A. Emadi, “Machine Learning Applied to Electrified Vehicle Battery State of Charge and State of Health Estimation: State-of-the-Art,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 52796–52814, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2980961.
- [14] R. A. S. Pena, A. Hijazi, P. Venet, and F. Errigo, “Balancing Supercapacitor Voltages in Modular Bidirectional DC–DC Converter Circuits,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 37, no. 1, pp. 137–149, Jan. 2022, doi: 10.1109/TPEL.2021.3093767.
- [15] A. R. Bhatti, H. Lakhair, H. A. Sher, and T. A. Cheema, “Portable Solar-Station with Integrated Battery Management and Load Monitoring System,” *MATEC Web Conf.*, vol. 398, p. 01025, 2024, doi: 10.1051/matecconf/202439801025.
- [16] C. R. Harahap, R. A. Nasution, and F. X. A. Setyawan, “PENGENDALIAN KECEPATAN MOTOR INDUKSI 3 FASA DENGAN SUMBER PANEL SURYA,” *J. Inform. Dan Tek. Elektro Terap. JITET*, vol. 11, no. 3, Sep. 2023, doi: 10.23960/jitet.v11i3.3424.