

APLIKASI KONTROL FUZZY PADA MANAJEMEN PENYIMPANAN ENERGI KENDARAAN LISTRIK

Dary Rafi Brafiyanto¹, Ir. Wijono, MT., Ph.D², Dr. Tri Nurwati, ST., MT.³

¹Teknik Elektro Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Malang, Indonesia

²Teknik Elektro Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Malang, Indonesia

³Teknik Elektro Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Malang, Indonesia

¹drafibrافیanto@student.ub.ac.id, ²wijono@ub.ac.id, ³trinurt@ub.ac.id

Abstract. Batteries are mostly used in electric vehicles for the energy storage unit because it has a large energy storage capacity. The disadvantages of the common battery are that it has a small power density, a limited service life, and a relatively high price. Due to the driving cycle characteristics of electric vehicles, which are often not constant, because an excessive charge-discharge process causes them, it decreases battery life. Additional energy storage systems such as the supercapacitor are recently applied to overcome energy fulfillment. Since the batteries and the supercapacitors have different characteristics in charging and discharging operation, a proper energy management system should be applied. A smart method to share the energy consumption to both batteries and supercapacitors is proposed in this research. A fuzzy logic controller (FLC) is applied to control the energy sharing for that hybrid storage system to get the optimal energy distribution. The energy management is simulated for the normal, starting, and braking operation. The main parameters considered in the simulation are speed, current, and power. Electric components include batteries, supercapacitors, 3-phase inverters, BLDC motors, and motor drivers. Drivers operate as regulators for the motor running and braking. The simulation uses MATLAB Simulink software. The simulation result shows that the FLC can successfully manage the energy sharing between the battery and supercapacitor. In addition, it is found that supercapacitors can accept large current and power surges. It also shows that the optimal value of energy-sharing in this hybrid storage is achieved.

Keywords. Battery, Supercapacitor, Electric Vehicle, FLC

Abstrak— Baterai banyak digunakan pada kendaraan listrik sebagai unit penyimpanan energi karena memiliki kapasitas penyimpanan energi yang besar. Kelemahan umum dari baterai adalah memiliki kerapatan daya yang kecil, usia pakai yang terbatas, dan harga yang relatif tinggi. Dikarenakan karakteristik *drive cycle* pada kendaraan listrik seringkali tidak konstan karena disebabkan proses *charge-discharge* berlebih sehingga mengakibatkan penurunan usia baterai. Penambahan sistem penyimpanan energi seperti superkapasitor saat ini diaplikasikan untuk mengatasi keterbatasan pemenuhan energi. Dikarenakan baterai dan superkapasitor memiliki karakteristik yang berbeda dalam beroperasi *charging* dan *discharging*, sistem manajemen energi yang tepat harus diterapkan. Metode cerdas untuk pembagian konsumsi energi pada baterai dan superkapasitor diusulkan pada penelitian ini. *Fuzzy logic controller* (FLC) digunakan untuk mengendalikan pembagian energi pada media penyimpanan energi hibrid untuk mendapatkan pembagian yang optimum. Manajemen energi disimulasikan pada kondisi normal, *starting*, dan pengereman. Parameter utama yang diperhatikan adalah

kecepatan, arus, dan daya. Komponen-komponen pada kendaraan listrik meliputi baterai, superkapasitor, inverter 3 fasa, motor BLDC, dan driver motor (*speed control*) sebagai pengatur kecepatan dan mendukung adanya pengereman regeneratif. Simulasi tiap komponen dilakukan menggunakan perangkat lunak MATLAB simulink 2018b. Dari hasil pengujian FLC dapat membagi besarnya arus dan daya yang harus disuplai oleh baterai dan superkapasitor. Selain itu superkapasitor dapat menerima lonjakan arus dan daya. Dengan pengaturan tersebut diharapkan pembagian daya dapat dicapai nilai optimumnya.

Kata Kunci— Baterai, Superkapasitor, Kendaraan Listrik, FLC

I. Pendahuluan

Kendaraan listrik dipercaya dapat menggantikan era transportasi mesin berbahan bakar minyak karena memiliki kelebihan ramah lingkungan dan keuntungan ekonomis lainnya. Sebagian besar kendaraan listrik menyimpan energi listrik ke dalam baterai. Namun, pemanfaatan energi baterai secara optimal merupakan tantangan tersendiri karena baterai memiliki kapasitas penyimpanan energi yang besar, namun memiliki kepadatan daya yang kecil [1]. Selain itu, baterai memiliki kelemahan usia pakai yang terbatas dan harga yang relatif mahal [2]. Karakteristik *drive cycle* pada kendaraan listrik seringkali tidak konstan karena disebabkan proses *charge-discharge* berlebih sehingga mengakibatkan penurunan usia baterai.

Supercapacitor memiliki kepadatan daya yang tinggi dengan kepadatan energi yang kecil [3]. Sehingga superkapasitor dapat menerima dan memberikan lonjakan arus sesaat lebih baik dibandingkan baterai [4]. Namun, superkapasitor tidak bisa digunakan sebagai media penyimpanan energi utama karena kapasitas penyimpanan yang kecil. Penambahan superkapasitor sebagai media penyimpanan energi dapat mengatasi keterbatasan pemenuhan energi oleh baterai. *Hybrid energy storage system* (HESS) merupakan sistem daya pada kendaraan listrik dengan memanfaatkan dua atau lebih media penyimpanan energi [5] dengan memanfaatkan superkapasitor sebagai penunjang energi ketika terjadi lonjakan arus baik saat *charge* maupun *discharge* dan baterai sebagai penyedia penyimpanan energi utama dapat mengoptimalkan pemanfaatan energi pada

kendaraan listrik. Namun, untuk mencapai hal tersebut dibutuhkan metode pengendalian pembagian daya yang optimal yang dapat menyesuaikan kondisi media penyimpanan energi dan juga kendaraan listrik. Sehingga dibutuhkan suatu sistem pembagian besarnya daya yang harus disuplai ke beban oleh sumber energi hibrid baterai dan superkapasitor secara optimum dengan mempertimbangkan SOC kedua sumber energi ketika kendaraan beroperasi dalam kondisi berjalan normal, *starting*, dan saat pengereman regeneratif yang masing-masing mempunyai karakteristik kurva variasi arus.

Pada penelitian ini ditawarkan pembagian suplai daya pada sumber energi hibrid baterai dan superkapasitor dengan menggunakan *fuzzy logic controller* (FLC) untuk mendapatkan pembagian yang optimum. Dengan pengaturan tersebut diharapkan pembagian daya dapat dicapai nilai optimumnya. Tujuan dari penelitian ini adalah merancang sistem manajemen energi pada kendaraan listrik hibrid baterai dan superkapasitor dengan menerapkan pengaturan pembagian daya menggunakan FLC untuk mendapatkan nilai pembagian daya yang optimum.

II. Metode Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan simulasi pembagian suplai daya pada penyimpan energi hibrid baterai dan superkapasitor kendaraan listrik dengan menggunakan FLC ketika kondisi normal, *starting*, dan pengereman regeneratif. Komponen-komponen pada sistem meliputi baterai, superkapasitor, inverter 3 fasa, motor BLDC, dan driver motor (*speed control*) sebagai pengatur kecepatan dan mendukung adanya pengereman regeneratif. Parameter utama yang diperhatikan pada penelitian ini adalah kecepatan, arus, dan daya. Simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak MATLAB simulink 2018b dan parameter-parameter yang diuji pada penelitian ini adalah arus (A), daya (W), dan kecepatan (RPM).

III. Hasil dan Pembahasan

Analisis Pembahasan

Pada penelitian ini digunakan jenis HESS dengan kontrol daya pada baterai, sehingga arus *charge* dan *discharge* baterai dapat diatur. Pada jenis ini superkapasitor dapat menerima lonjakan arus dan daya dengan respon yang cepat [5]. Pembagian daya kendaraan listrik HESS dikontrol melalui konverter DC-DC dan sistem manajemen energi. Berikut persamaan matematis daya pada kendaraan listrik HESS:

$$P_{req} = P_{bat} + P_{sc} \tag{1}$$

Pada kendaraan listrik HESS terdapat faktor pembagi daya untuk mendeskripsikan output daya baterai dan superkapasitor (K_{bat} dan K_{sc}) dengan persamaan matematis sebagai berikut:

$$P_{bat} = P_{req} K_{bat} \tag{2}$$

$$P_{sc} = P_{req} K_{sc}$$

$$K_{bat} + K_{sc} = 1$$

Sehingga dari persamaan (1) didapatkan:

$$P_{req} = (P_{req} K_{bat}) + (P_{req} K_{sc})$$

Keterangan:

P_{req} = Kebutuhan daya (W)

P_{bat} = Daya baterai (W)

P_{sc} = Daya superkapasitor (W)

K_{bat} = Faktor distribusi daya baterai

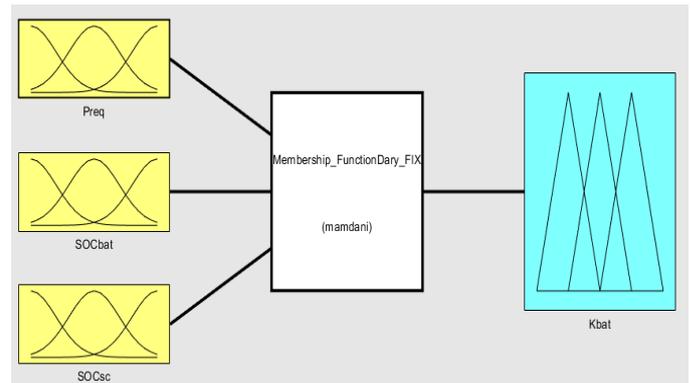
K_{sc}^{bat} = Faktor distribusi daya superkapasitor

FLC digunakan untuk mengendalikan nilai keluaran arus dan daya dari konverter *buck* agar pembagian daya sesuai dengan nilai yang ditentukan. Parameter dari konverter *buck* ditunjukkan pada **Tabel 1**.

Tabel 1. Parameter Konverter *Buck*

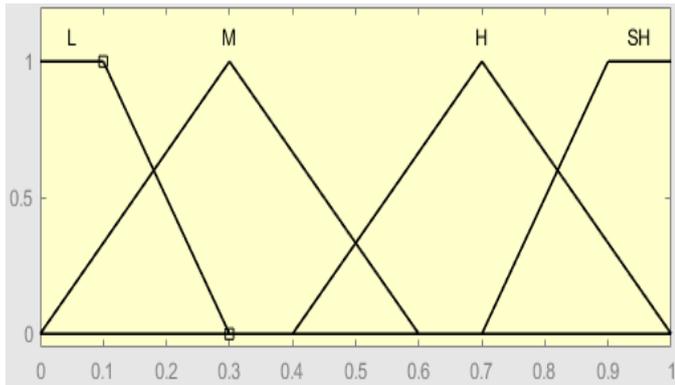
Parameter	Nilai
Tegangan Sumber (Vin)	465 V
Tegangan Keluaran (Vout)	365 V
Frekuensi <i>Switching</i>	5 kHz
Resistansi	100 Ω
Riak Tegangan (ΔV)	5%

Input fuzzy berupa kebutuhan daya oleh beban (P_{req}), SOC baterai (SOC_{bat}), dan SOC superkapasitor (SOC_{sc}) dengan *output* fuzzy berupa nilai *duty cycle* untuk mengendalikan *output* dari konverter *buck* berupa level arus dan daya.

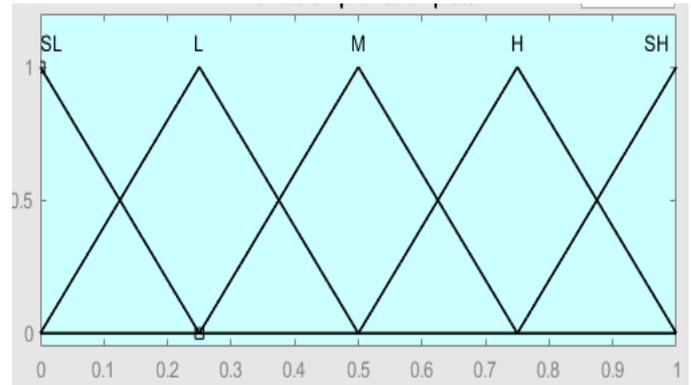


Gambar 1. Fuzzy Logic Controller

Membership function pada *input* fuzzy terdiri dari P_{req} , SOC_{bat} , dan SOC_{sc} . P_{req} terbagi menjadi 4 kategori yaitu Low (L), Medium (M), High (H), dan Super High (SH)

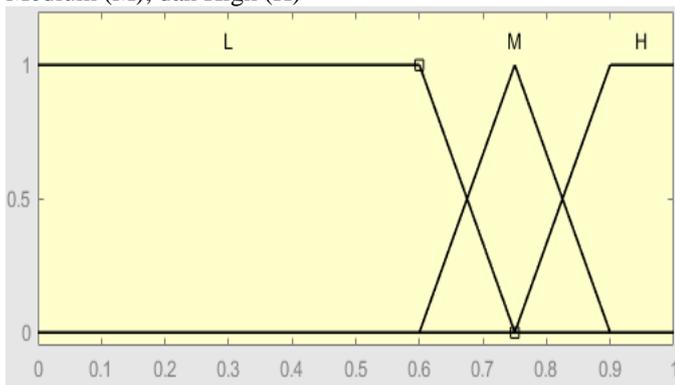


Gambar 2. Membership Function Kebutuhan Daya Beban (Preq)



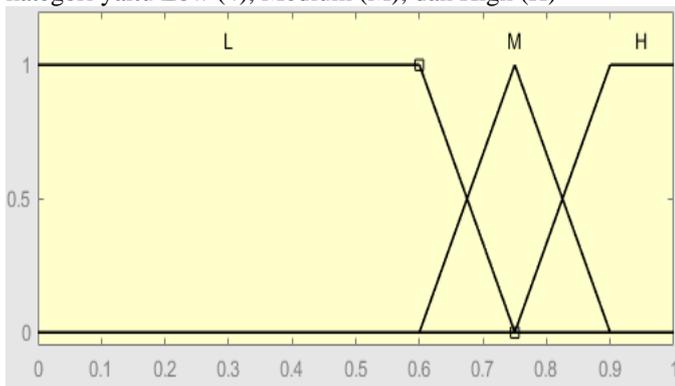
Gambar 5. Membership Function Level Distribusi Daya Baterai (Kbat)

SOCbat terbagi menjadi tiga kategori yaitu Low (L), Medium (M), dan High (H)



Gambar 3. Membership Function SOC Baterai (SOCbat)

Sama seperti SOCbat, SOCsc terbagi menjadi tiga kategori yaitu Low (L), Medium (M), dan High (H)



Gambar 4. Membership Function SOC Superkapasitor (SOCsc)

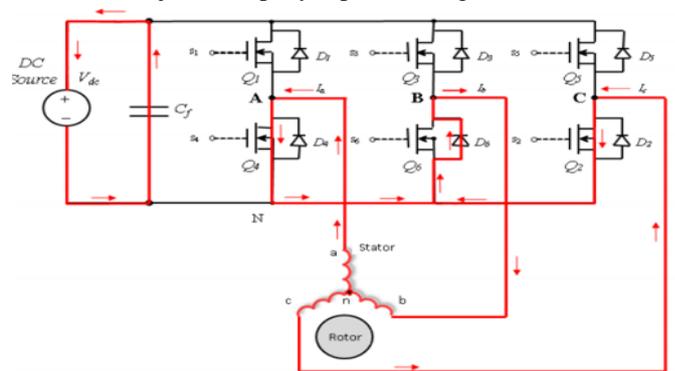
Output dari FLC berupa level distribusi daya oleh baterai yang terdiri dari lima kategori yaitu Super Low (SL), Low (L), Medium (M), High (H), dan Super High (SH).

Pada penelitian ini motor BLDC digunakan karena memiliki torsi yang tinggi serta dapat menghasilkan *back-emf* untuk pengereman regeneratif yang nantinya disimpan pada superkapasitor. Parameter motor BLDC yang digunakan pada penelitian ini terdapat pada **Tabel 2**.

Tabel 2. Parameter Motor BLDC

Parameter	Nilai
Arus Nominal	5 A
Putaran Nominal	1500 RPM
Induktansi Stator	0.0128 H
Resistansi Stator	0.7 Ω

Pengereman regeneratif didapatkan dengan memanfaatkan induktor pada fasa motor bersama dengan *switch* pada inverter menjadi konverter *boost* dan memungkinkan arus fasa untuk membalikkan arahnya ke konverter bus dc. Hal ini bisa didapatkan dengan membuat *switch* posisi bawah menjadi tertutup dan *switch* bagian atas menjadi terbuka. Saat sinyal PWM bernilai ON, aliran arus fasa diarahkan untuk mengalir pada arah berlawanan pada *switch* yang tertutup. Saat PWM bernilai OFF arus fasa tetap mempertahankan arah arus yang berlawanan, sehingga arus ke DC bus menuju media penyimpanan energi [6].

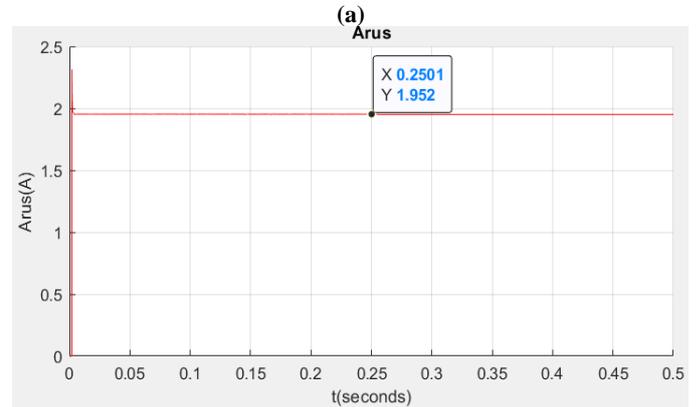


Gambar 6. Aliran Daya saat Mode ON

Dari **Gambar 9**, terjadi lonjakan pada kecepatan, arus, dan daya saat sistem dalam kondisi *starting*. Ketiga parameter tersebut berada dalam kondisi *steady state* dan dapat dikontrol dengan baik sesuai dengan nilai *set point* pada detik ke- 0.01s. Pada detik ke- 0.25 terjadi pengereman regeneratif dimana kecepatan pada motor perlahan menurun menjadi nol serta arus dan daya menjadi bernilai negatif. Nilai negatif yang muncul menunjukkan bahwa inverter bekerja saat terjadi pengereman regeneratif.

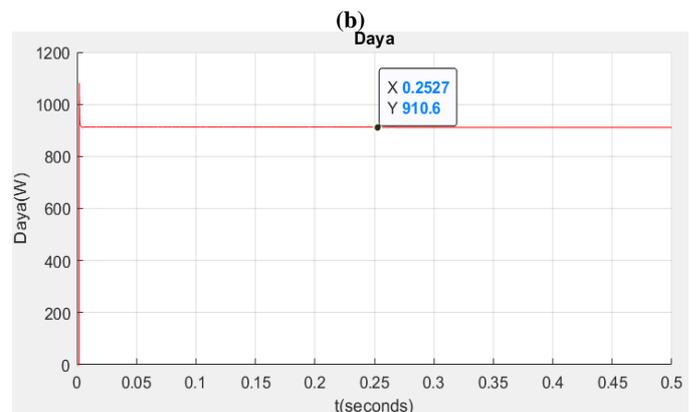
Pengujian FLC terhadap nilai *duty cycle* pada konverter *buck* digunakan untuk mengendalikan nilai keluaran arus dan daya dari konverter *buck* agar pembagian daya sesuai dengan nilai yang ditentukan. *Input* fuzzy berupa kebutuhan daya oleh beban, SOC baterai, dan SOC superkapasitor dengan *output* fuzzy berupa nilai *duty cycle* untuk mengendalikan *output* dari konverter *buck* berupa arus dan daya. Hasil pengujian *output* fuzzy berupa nilai *duty cycle* untuk pembagian besar arus dan daya pada media penyimpanan energi hibrid baterai dan superkapasitor ditunjukkan pada **Tabel 5**.

dan pengereman. Pengujian dilakukan pada kendaraan listrik dengan sumber tenaga baterai dan superkapasitor. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh FLC terhadap pembagian besar arus dan daya pada penyimpanan energi hibrid baterai dan superkapasitor.



Tabel 5. Hasil Pengujian Pengaruh Perubahan *Duty Cycle* pada Pembagian Besar Arus dan Daya

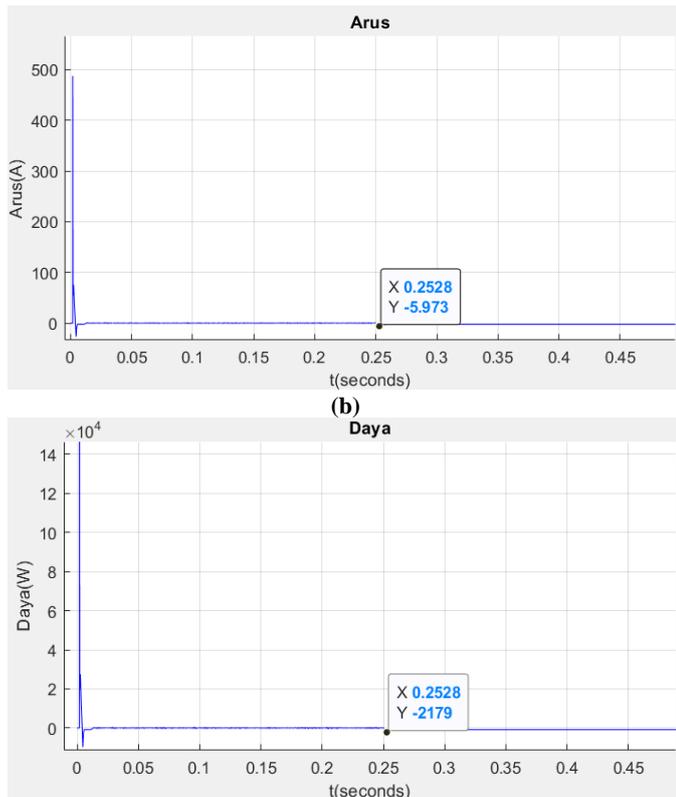
No	<i>Duty Cycle</i>	Baterai		Superkapasitor	
		Arus (A)	Daya (W)	Arus (A)	Daya (W)
1	0.05	0.0191	8.93	2.51	919
2	0.1	0.0528	24.7	2.36	861.4
3	0.15	0.102	47.67	2.31	843.15
4	0.2	0.167	78.01	2.25	821.25
5	0.25	0.247	115.6	2.11	770.15
6	0.3	0.343	160.5	1.99	726.35
7	0.35	0.455	212.7	1.86	678.9
8	0.4	0.582	272	1.67	609.55
9	0.45	0.724	338.3	1.47	536.55
10	0.5	0.882	411.9	1.21	441.65
11	0.55	1.05	492.2	1.12	408.8
12	0.6	1.24	579.4	0.844	308.06
13	0.65	1.44	673.7	0.56	204.4
14	0.7	1.66	777.5	0.283	103.295
15	0.75	1.95	912.4	0.0156	5.694



Gambar 10 Grafik Parameter Baterai (a) Arus (b) Daya

Dari **Tabel 5**, didapatkan bahwa nilai *duty cycle* berbanding lurus dengan besar arus dan daya yang dikeluarkan oleh baterai serta berbanding terbalik dengan arus dan daya yang dikeluarkan oleh superkapasitor.

Pengujian keseluruhan sistem dilakukan dengan tiga kondisi kendaraan yang berbeda yaitu saat *starting*, normal,



Gambar 12 Grafik Parameter Supercapacitor (a) Arus (b) Daya

Hasil pengujian menunjukkan bahwa, saat kendaraan dalam kondisi *starting* superkapasitor mensuplai sebagian besar kebutuhan daya oleh beban. Saat kondisi *starting* superkapasitor mensuplai arus sebesar 477.3 A dan daya sebesar 172.200 W sedangkan baterai mensuplai arus sebesar 2.296 A dan daya sebesar 1080 W. Saat kondisi pengereman, arus dan daya sepenuhnya masuk ke superkapasitor. Hal ini ditunjukkan saat terjadi pengereman arus dan daya pada superkapasitor turun menjadi -5.973 A dan -2179 W. Arus dan daya yang bernilai negatif menunjukkan bahwa arah aliran daya mengalir kembali ke media penyimpanan energi. Saat kendaraan berjalan dalam kondisi normal, baterai berperan sebagai penyedia energi utama dengan arus dan daya sebesar 1.95 A dan 910.6 W. Sedangkan arus dan daya superkapasitor saat kendaraan berjalan normal adalah 0.223 A dan 49.6 W.

IV. Kesimpulan

Penelitian ini menyajikan pengaturan pembagian daya menggunakan FLC. Baterai dan superkapasitor digabungkan menjadi sistem manajemen penyimpanan energi hibrid. Arus dan daya baterai serta superkapasitor pada saat kendaraan dalam kondisi normal, *starting*, dan pengereman regeneratif menjadi kriteria evaluasi sistem. Hasil simulasi menunjukkan bahwa FLC dapat membagi daya dengan optimum sesuai dengan aturan-aturan yang telah ditentukan, menyesuaikan dengan kondisi SOC dan kondisi kendaraan. Saat kendaraan dalam kondisi *starting* superkapasitor mensuplai sebagian besar kebutuhan daya oleh beban. Saat kondisi pengereman, arus dan daya sepenuhnya masuk ke superkapasitor. Hal ini ditunjukkan dengan arus dan daya superkapasitor yang bernilai negatif saat terjadi pengereman. Saat kendaraan berjalan dalam kondisi normal, baterai dapat berperan sebagai penyedia energi utama.

V. Daftar Pustaka

- [1] Afif, M., & Pratiwi, I. (2015). Analisis Perbandingan Baterai Lithium-Ion, Lithium-Polymer, Lead Acid dan Nickel-Metal Hydride pada Penggunaan Mobil Listrik-Review. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 6(2), pp. 95-99. doi:<https://doi.org/10.21776/ub.jrm.2015.006.02.1>
- [2] Aswathi, E.R. & Prathibha, P.K. & Nair, Jayasri. (2018). Regenerative Braking of BLDC Motor using Fuzzy Control for Electric Vehicles. 1661-1665. 10.1109/ICICCT.2018.8473242.
- [3] Rizki, A. Y. J. T. E. T. B. (2018). *RANCANG BANGUN SISTEM Pengereman Regeneratif pada Mobil Listrik TEUB SEV*. Jurnal Mahasiswa TEUB.
- [4] Chou, Pai & Kim, Sehwan. (2021). Techniques for Maximizing Efficiency of Solar Energy Harvesting Systems (Invited Paper).
- [5] Wang, Kai & Wang, Wanli & Wang, Licheng & Li, Liwei. (2020). An Improved SOC Control Strategy for Electric Vehicle Hybrid Energy Storage Systems. *Energies*. 13. 5297.
- [6] Adib, Andrew & Dhaouadi, Rached. (2018). Performance Analysis of Regenerative Braking in Permanent Magnet Synchronous Motor Drives. *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*. 3. 460-466. 10.25046/aj030156