

Analisis *Hybrid Energy Storage System* (HESS) dengan Pengujian Kombinasi Baterai Lithium-Ion dan Superkapasitor pada Kendaraan Listrik

Ma'arif Hasan^{1*}, Chairul Hudaya²

¹²Universitas Indonesia

*Corresponding author, e-mail: maarif.hasan@ui.ac.id

Abstrak

Paper ini bertujuan untuk melakukan analisis *Hybrid Energy Storage System* (HESS) pada kendaraan listrik melalui pengujian kinerja hibridisasi antara beberapa baterai lithium-ion dengan nilai superkapasitor yang variatif. Spesifikasi baterai dan nilai superkapasitor yang digunakan mengacu pada nilai yang tersedia dipasaran dan sudah digunakan oleh para produsen kendaraan listrik di Indonesia. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah analisis simulasi parameter menggunakan *simulink* pada Matlab R2022a. Paper ini berfokus pada pengujian performansi HESS melalui parameter ketercapaian daya operasi yang disesuaikan dengan daya yang dibutuhkan kendaraan listrik untuk dapat bekerja optimal. Penelitian pada paper ini menggunakan 3 spesifikasi baterai lithium-ion dan superkapasitor yang berbeda-beda. Sehingga hasil dari penelitian ini dapat menghasilkan hibridisasi baterai lithium-ion dan superkapasitor yang menunjukkan unjuk kerja yang baik dalam mengantisipasi 3 (tiga) kondisi mobilitas dari kendaraan listrik yaitu kondisi akselerasi, stabil dan deselerasi. Berdasarkan penelitian ini didapatkan bahwa 3 (tiga) kombinasi HESS yang diujikan masing-masing dapat memenuhi besar daya operasi yang dibutuhkan yaitu pada nilai daya 2400 W, 2150 W dan 3500 W. Kinerja HESS juga terbukti dapat memenuhi kondisi mobilitas kendaraan listrik yang dibutuhkan.

Kata Kunci: Baterai Lithium-Ion, superkapasitor, HESS, daya operasi, Kendaraan listrik

Abstract

This paper aims to analyze the Hybrid Energy Storage System (HESS) on electric vehicles by testing the hybridization performance between several lithium-ion batteries with various supercapacitor values. The battery specifications and supercapacitor values used refer to the values available on the market and have been used by electric vehicle manufacturers in Indonesia. The method used in this research is parameter simulation analysis using simulink on Matlab R2022a. This paper focuses on testing the performance of HESS through parameters of achieving operating power that are adjusted to the power required for electric vehicles to work optimally. Research in this paper uses 3 different specifications of lithium-ion batteries and supercapacitors. So that the results of this study can produce hybridization of lithium-ion batteries and supercapacitors which show good performance in anticipating 3 (three) mobility conditions of electric vehicles, namely conditions of acceleration, stability and deceleration. Based on this research, it was found that the 3 (three) HESS combinations tested were each able to meet the required operating power, namely at a power value of 2400 W, 2150 W and 3500 W. HESS performance was also proven to be able to meet the required mobility conditions for electric vehicles.

Keywords: Lithium-Ion batteries, supercapacitors, HESS, operating power, Electric vehicles

PENDAHULUAN

Pencemaran lingkungan akibat emisi karbondioksida (CO₂) menjadi salah satu isu penting dunia saat ini. Salah satu sektor yang berkontribusi cukup tinggi adalah pada sektor transportasi yang mana menyumbang hampir 29-32% dan menjadi kedua tertinggi setelah sektor industri. Emisi CO₂ yang berlebihan merupakan penyebab terjadinya fenomena Gas Rumah Kaca (GRK) yang menyebabkan pemanasan global yang berujung pada terjadinya perubahan iklim di berbagai belahan dunia [1][2][16][17].

Isu fenomena GRK khususnya yang berkaitan dengan adanya kontribusi besar dari sektor transportasi kemudian mendorong seluruh dunia tanpa terkecuali Indonesia, untuk melakukan berbagai upaya mulai dari hal-hal yang bersifat korektif sampai pada hal yang bersifat pencegahan. Salah satu bentuk

upaya pencegahan adalah dengan mengakselerasi perkembangan industri kendaraan listrik. Hal ini juga didukung oleh kebutuhan minyak bumi dunia yang sejak 1,5 dekade terakhir terus meningkat baik dari sektor transportasi maupun sektor lainnya, dimana konsumsi minyak global sebesar 60% digunakan untuk transportasi. Sementara penemuan cadangan minyak bumi kian melambat dari peningkatan permintaan [1][2][3][4]. Dengan tingginya permintaan bahan bakar fosil setiap hari dan tingkat konsumsi 22 miliar barel per tahun, diperkirakan cadangan minyak hanya bertahan 45–100 tahun [16][18].

Sebagai bentuk keseriusan Indonesia dalam mengembangkan kendaraan listrik sebagai pengganti kendaraan berbasis energi konvensional adalah dengan adanya peraturan presiden (Perpres) No.55 tahun 2019 tentang percepatan Program Kendaraan Bermotor Listrik Berbasis Baterai untuk transportasi jalan. Pemerintah secara aktif mendorong semua pihak baik pemerintah daerah, badan uahan milik negara (BUMN) maupun pelaku transportasi online untuk mulai berpindah pada transportasi publik berbasis listrik. Tidak hanya dimulai dari lini transportasi publik saja, namun pemerintah Indonesia pun mendorong agar masyarakat dapat segera beralih pada kendaraan listrik pribadi dan mempercepat program elektrifikasi kendaraan bermotor nasional yang mana peraturannya telah tertuang pada Peraturan Menteri Perhubungan (Permenhub) No. 65 Tahun 2020 tentang Konversi Sepeda Motor dengan Penggerak Motor Bakar Menjadi Sepeda Motor Listrik Berbasis Baterai [5][6].

Indonesia memiliki beberapa alasan yang memperkuat timbulnya banyak upaya pengembangan kendaraan listrik di tanah air, salah satunya adalah komitmen pemerintah Indonesia kepada dunia untuk menurunkan emisi GRK sebesar 29% pada 2030 sekaligus menjaga ketahanan energi khususnya pada sektor transportasi darat. Tidak hanya itu, kendaraan listrik diharapkan dapat menjadi salah satu solusi atas tingginya subsidi bahan bakar minyak (BBM) dalam negeri serta tingginya angka impor minyak bumi yang mana merupakan strategi untuk meningkatkan perekonomian negara [4][5][6].

Diantara perangkat penyimpanan energi pada kendaraan listrik, baterai, fuel cell dan superkapasitor adalah tiga elemen yang dianggap terbaik. Baterai dapat menjamin energi dalam jumlah besar yang dapat menyuplai beban daya yang dibutuhkan kendaraan listrik. Namun, baterai memiliki beberapa kekurangan yaitu tidak cukup cepat menyuplai saat beban puncak. Hal ini menjadi penting sebab mobilitas kendaraan listrik sangat bergantung pada tingkah laku (*behavior*) pengemudi dan kondisi lalu lintas yang tidak menentu. Kendaraan listrik setidaknya dibagi dalam tiga kondisi yaitu saat terjadi akselerasi atau permintaan daya puncak, kondisi stabil maupun deselerasi atau pengereman mendadak [7][8][9][14]. Di sisi lain, Superkapasitor memiliki kelebihan berupa kerapatan daya yang besar dan memiliki siklus pengisian/pengosongan yang lebih tinggi dibanding baterai sehingga dapat memenuhi beberapa kondisi mobilitas kendaraan listrik [10][11][14].

Dikarenakan masing-masing sumber energi tidak mampu memberikan kinerja terbaik pada segi kepadatan daya maupun energi, hibridisasi menjadi solusi yang diandalkan. Oleh karena itu, penggunaan Sistem Penyimpanan Energi Hybrid (*Hybrid Energy Storage System*) menjadi pilihan yang tepat untuk diaplikasikan pada kendaraan listrik. Arsitektur hibrida pada kendaraan listrik adalah didasarkan pada kombinasi kinerja baterai dan Superkapasitor dimana baterai memberikan pasokan daya pada tingkat rata-rata pada kendaraan sedangkan superkapasitor bekerja pada permintaan daya puncak [12][13].

Dari hasil penelitian [14], penggunaan *Hybrid Energy Storage System* (HESS) pada kendaraan listrik khususnya hibridisasi antara baterai lithium ion dan superkapasitor lebih bagus dibandingkan kendaraan listrik yang hanya menggunakan baterai. Baterai yang bereaksi lebih lambat terhadap permintaan daya menyebabkan tidak terpenuhinya kebutuhan daya kendaraan listrik, sementara superkapasitor menyediakan arus transien yang cepat dan sesuai kebutuhan, sehingga dapat memenuhi kebutuhan daya kendaraan listrik. Selain itu, superkapasitor juga menghilangkan dampak arus puncak pada baterai.

Penelitian ini berfokus pada pengujian kinerja hibridisasi antara baterai Lithium-Ion dan superkapasitor untuk menghasilkan daya luaran yang dibutuhkan agar kendaraan listrik dapat beroperasi optimal. Variabel penting dalam penelitian ini adalah pada varian nilai superkapasitor dan baterai Lithium-ion yang diuji untuk mendapatkan kombinasi terbaik yang dapat memenuhi daya operasi yang telah ditentukan sebelumnya dan dapat diandalkan dalam semua kondisi mobilitas kendaraan listrik baik saat akselerasi yang membutuhkan beban puncak, kondisi stabil maupun deselerasi/pengereman mendadak sesuai dengan kondisi lalu lintas dan *behavior* pengemudi. Pengujian simulasi rangkaian HESS dilakukan dengan menggunakan *simulink* pada *software* Matlab R2022a. Simulasi HESS ini dilakukan dengan menggunakan baterai lithium ion dan superkapasitor. Spesifikasi baterai lithium ion didapatkan dari ekplorasi *website*

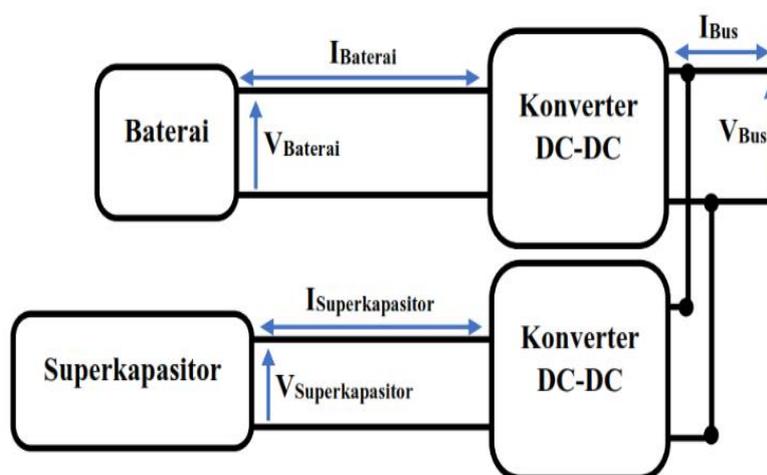
beberapa manufaktur kendaraan listrik roda dua yang telah dipasarkan di Indonesia, dalam hal ini didapatkan 3 data spesifikasi baterai kendaraan listrik dengan spesifikasi yang berbeda-beda dan dapat dilihat pada tabel 1. Sistem penyimpanan energi dari ketiga kendaraan listrik yang didapatkan adalah tipe *Battery Electric Vehicle*, yaitu hanya menggunakan baterai sebagai sumber energinya, dalam hal ini jenis baterai lithium ion. Begitu juga dengan spesifikasi superkapasitor, yang didapatkan dari eksplorasi *website* penyedia superkapasitor yang berada di pasaran. Adapun data spesifikasi superkapasitor yang didapatkan adalah 3 tipe superkapasitor dengan spesifikasi yang berbeda-beda dan dapat dilihat pada tabel 2.

Berdasarkan penelitian, simulasi hibridisasi antara baterai lithium ion dan superkapasitor dilakukan dengan menggunakan 1 spesifikasi baterai lithium ion dan superkapasitor. Sehingga penelitian tersebut hanya menunjukkan hasil unjuk kerja 1 jenis spesifikasi baterai lithium ion dan superkapasitor [14][15][16][19][20][21][22].

Penelitian pada paper ini melakukan simulasi HESS dengan menggunakan 3 spesifikasi baterai lithium ion dan superkapasitor yang berbeda-beda. Sehingga hasil dari penelitian ini menampilkan perbandingan unjuk kerja masing-masing spesifikasi HESS dalam memenuhi kebutuhan daya dan kondisi mobilitas kendaraan listrik. Selain itu, jenis baterai lithium ion maupun superkapasitor telah dijual dipasaran, sehingga baterai lithium ion maupun superkapasitor tersebut mudah untuk didapatkan.

METODE

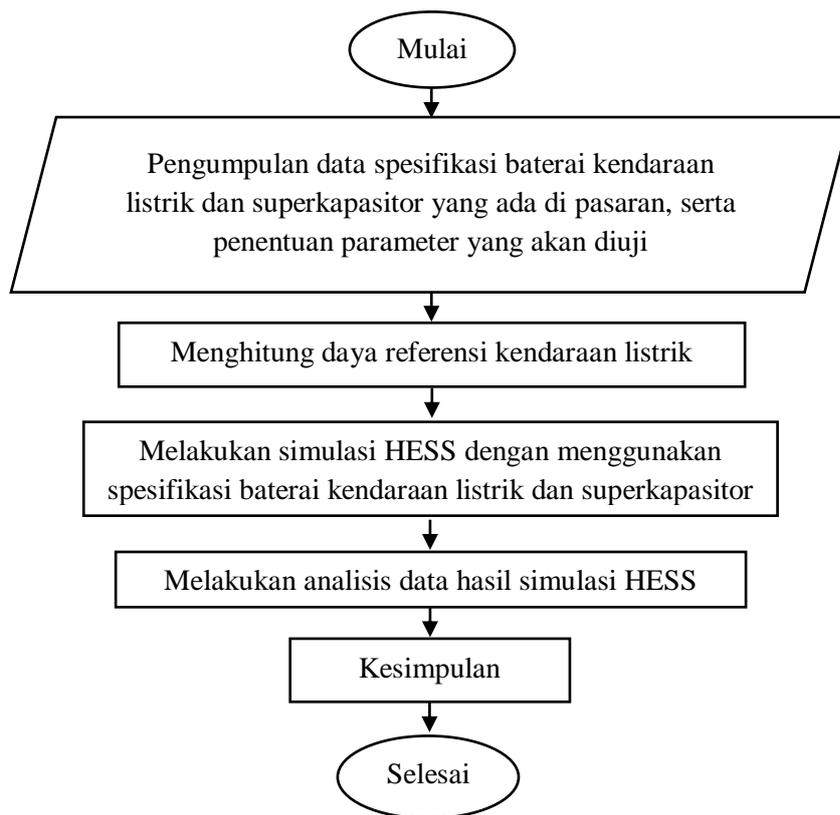
Penelitian ini menggunakan metode analisis simulasi HESS pada kendaraan listrik dengan menguji 3 (tiga) nilai kapasitansi dari superkapasitor yang dikombinasikan dengan 3 (tiga) spesifikasi baterai Lithium-Ion yang sering digunakan pada kendaraan listrik dan dapat dengan mudah ditemukan dipasaran. Pada penelitian ini besar daya operasi yang dibutuhkan kendaraan listrik untuk beroperasi optimal telah dihitung dengan menggunakan beberapa parameter yang berkaitan dengan spesifikasi dari kendaraan listrik. Berikut di bawah ini rangkaian simulasi HESS dapat dilihat pada gambar 1.



Gambar 1. Rangkaian HESS yang digunakan [7]

Gambar 1 menampilkan rangkaian HESS yang digunakan dalam simulasi penelitian ini. Pada rangkaian ini, baterai dan superkapasitor terhubung ke *buck/boost* converter (converter DC-DC) sebagai pengontrol tegangan yang juga terhubung pada daya referensi yang telah ditentukan sebelumnya. Daya referensi ini berperan sebagai nilai daya acuan yang telah ditentukan dan disesuaikan mengikuti nilai daya operasi yang dibutuhkan kendaraan listrik agar bekerja optimal.

Penelitian terkait HESS yang merupakan kombinasi baterai dan superkapasitor dalam aplikasinya untuk kendaraan listrik dapat dilihat pada alur penelitian di bawah ini:



Gambar 2. Alur Penelitian

Pengumpulan data spesifikasi baterai kendaraan listrik dan superkapasitor dilakukan dengan melakukan eksplorasi pada website manufaktur kendaraan listrik dan superkapasitor yang telah dikomersialkan. Parameter pengujian pada simulasi HESS adalah arus baterai, tegangan baterai, arus superkapasitor dan tegangan superkapasitor.

Daya referensi/operasi kendaraan listrik ditentukan dengan melakukan perhitungan kecepatan motor dalam RPM. Kecepatan motor dalam RPM diubah menjadi daya motor dalam watt, yang selanjutnya daya motor dalam watt yang digunakan sebagai daya referensi/operasi. Hasil perhitungan daya referensi/operasi dapat dilihat pada tabel 3, 4 dan 5. Perhitungan daya referensi/operasi dilakukan dengan menggunakan persamaan-persamaan sebagai berikut:

$$Kecepatan\ RPM = \frac{Kecepatan\ Motor\ (km/h)}{Diameter\ Roda\ (m) \times 0,1885} \dots\dots\dots (1)$$

$$Daya\ Motor\ (W) = \frac{Kecepatan\ RPM \times Torsi\ (Nm)}{9549} \times 1000 \dots\dots\dots (2)$$

$$Daya\ Referensi\ (W) \approx Daya\ Motor\ (W) \dots\dots\dots (3)$$

Simulasi rangkaian HESS dilakukan dengan menggunakan *simulink* pada *software* Matlab R2022a. Spesifikasi baterai dan superkapasitor yang digunakan dapat dilihat pada tabel 1 dan 2. Hasil dari simulasi HESS adalah arus dan tegangan baterai, serta arus dan tegangan superkapasitor. Pada simulasi, perhitungan daya baterai, daya superkapasitor dan daya HESS dilakukan dengan menggunakan persamaan-persamaan sebagai berikut:

$$\text{Daya Baterai } (W) = \text{Tegangan Baterai } (V) \times \text{Arus Baterai } (A) \dots\dots\dots (4)$$

$$\text{Daya Superkapasitor } (W) = \text{Tegangan Superkapasitor } (V) \times \text{Arus Superkapasitor } (A) \dots\dots\dots (5)$$

$$\text{Daya HESS } (W) = \text{Daya Baterai } (W) + \text{Daya Superkapasitor } (W) \dots\dots\dots (6)$$

Analisis data hasil simulasi HESS dilakukan untuk mengamati karakteristik daya HESS terhadap daya referensi. Jika kurva karakteristik daya HESS sama dengan daya referensi, maka kombinasi baterai dan superkapasitor yang digunakan memenuhi kebutuhan daya pada kendaraan listrik, sebaliknya jika kurva karakteristik daya HESS tidak sama dengan daya referensi, maka kombinasi baterai dan superkapasitor yang digunakan tidak memenuhi kebutuhan daya pada kendaraan listrik [14][15].

A. Spesifikasi Baterai Lithium-Ion dan Superkapasitor

Penelitian ini menggunakan 3 (tiga) spesifikasi baterai dan 3 (tiga) nilai kapasitansi superkapasitor yang berbeda untuk disimulasikan pada rangkaian yang ditunjukkan pada gambar 1. Spesifikasi baterai dan nilai kapasitansi superkapasitor ditentukan berdasarkan nilai yang tersedia dipasaran dan telah digunakan pada kendaraan listrik khususnya oleh produsen yang ada di Indonesia. Berikut di bawah ini adalah spesifikasi baterai lithium-ion dan superkapasitor yang akan digunakan dalam penelitian ini:

Tabel 1. Spesifikasi baterai Lithium-Ion

No.	Spesifikasi Baterai	Nilai	Keterangan
1	Tegangan Nominal	72 V	
2	Kapasitas	20 Ah	Baterai 1
3	Tegangan Operasi	54 V – 82 V	
4	Tegangan Nominal	60 V	
5	Kapasitas	23 Ah	Baterai 2
6	Tegangan Operasi	45 V – 69,8 V	
7	Tegangan Nominal	60 V	
8	Kapasitas	45 Ah	Baterai 3
9	Tegangan Operasi	45 V – 69,8 V	

Table 2. Spesifikasi Superkapasitor

No.	Spesifikasi Superkapasitor	Nilai	Keterangan
1	Tegangan Nominal	16 V	
2	Kapasitas	500 F	Superkapasitor 1
3	Tahanan Seri Ekuivalen	2,1 mOhm	
4	Tegangan Nominal	48,6 V	
5	Kapasitas	166 F	Superkapasitor 2
6	Tahanan Seri Ekuivalen	5 mOhm	
7	Tegangan Nominal	69 V	
8	Kapasitas	130 F	Superkapasitor 3
9	Tahanan Seri Ekuivalen	6,7 mOhm	

Baterai lithium-ion yang digunakan pada penelitian ini memiliki spesifikasi sesuai dengan tabel 1 di atas yang mana memiliki tegangan kerja serta kapasitas yang berbeda-beda untuk di kombinasikan dengan 3 (tiga) superkapasitor yang memiliki nilai kapasitansi masing-masing 500 F, 166 F dan 130 F sesuai yang tersedia di pasaran.

B. Parameter Pengujian dan Daya Operasi yang Diinginkan

Pada sub-bab sebelumnya telah ditampilkan spesifikasi baterai lithium-ion dan superkapasitor yang akan diuji dalam penelitian ini. Baterai lithium-ion dan superkapasitor tersebut akan terhubung dengan daya referensi yang telah di hitung sebelumnya. Besar daya referensi yang dimaksud, didapatkan dari perhitungan daya dengan mempertimbangkan beberapa parameter penting yang berkaitan dengan spesifikasi kendaraan listrik yang telah ada di Indonesia. Berikut pada tabel dibawah ini ditampilkan 3 (tiga) rentang daya operasi kendaraan listrik yang sesuai dengan kecepatan kendaraan listrik dari 0-70 km/h:

Tabel 3. Spesifikasi daya operasi kendaraan listrik 1 (menggunakan baterai 1)

No.	Kecepatan Motor (km/h)	Diameter Roda (mm)	Kecepatan RPM	Daya Motor (W)	Daya Referensi (W)*	Keterangan
1	0	488	0	0	0	
2	10	488	109	341	350	Kecepatan Maksimal Motor = 70 km/h
3	20	488	217	683	700	
4	30	488	326	1024	1050	
5	40	488	435	1366	1350	
6	50	488	543	1707	1700	Torsi Maksimal = 30 N.m
7	60	488	652	2049	2050	
8	70	488	761	2390	2400	

Tabel 4. Spesifikasi daya operasi kendaraan listrik 2 (menggunakan baterai 2)

No.	Kecepatan Motor (km/h)	Diameter Roda (mm)	Kecepatan RPM	Daya Motor (W)	Daya Referensi (W)*	Keterangan
1	0	465	0	0	0	
2	10	465	114	358	350	Kecepatan Maksimal Motor = 60 km/h
3	20	465	228	716	700	
4	30	465	342	1075	1050	
5	40	465	456	1433	1450	
6	50	465	570	1791	1800	Torsi Maksimal = 30 N.m
7	60	465	648	2149	2150	

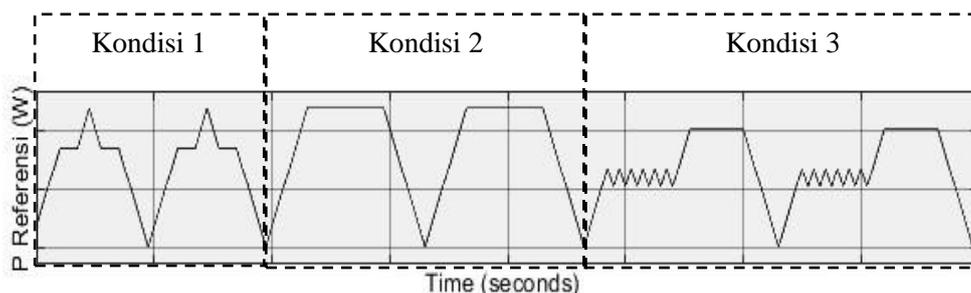
Tabel 5. Spesifikasi daya operasi kendaraan listrik 3 (menggunakan baterai 3)

No.	Kecepatan Motor (km/h)	Diameter Roda (mm)	Kecepatan RPM	Daya Motor (W)	Daya Referensi (W)*	Keterangan
1	0	516	0	0	0	
2	10	516	103	501	500	Kecepatan Maksimal Motor = 70 km/h
3	20	516	206	1001	1000	
4	30	516	308	1502	1500	
5	40	516	411	2002	2000	
6	50	516	514	2503	2500	Torsi Maksimal = 46,5 N.m
7	60	516	617	3003	3000	
8	70	516	720	3504	3500	

*Daya Referensi merupakan pembulatan dari Daya Motor

Dengan rangkaian simulasi pada gambar 1, akan diuji kombinasi baterai lithium-ion dan superkapasitor sesuai dengan varian spesifikasi baterai lithium-ion dan nilai kapasitansi yang telah ditentukan pada tabel 1 dan 2. Masing-masing dari kombinasi tersebut akan diuji daya keluarannya dengan membandingkannya dengan daya operasi yang telah ditentukan sebelumnya pada tabel 3, 4 dan 5. Adapun beberapa performansi/unjuk kerja yang akan diukur dan dianalisis di bab hasil dan pembahasan adalah:

1. Daya baterai, daya superkapasitor, daya HESS dan daya referensi/operasi.
2. 3 (tiga) kondisi mobilitas kendaraan listrik yaitu akselerasi/saat beban puncak, kondisi stabil dan deselerasi/saat pengereman mendadak.

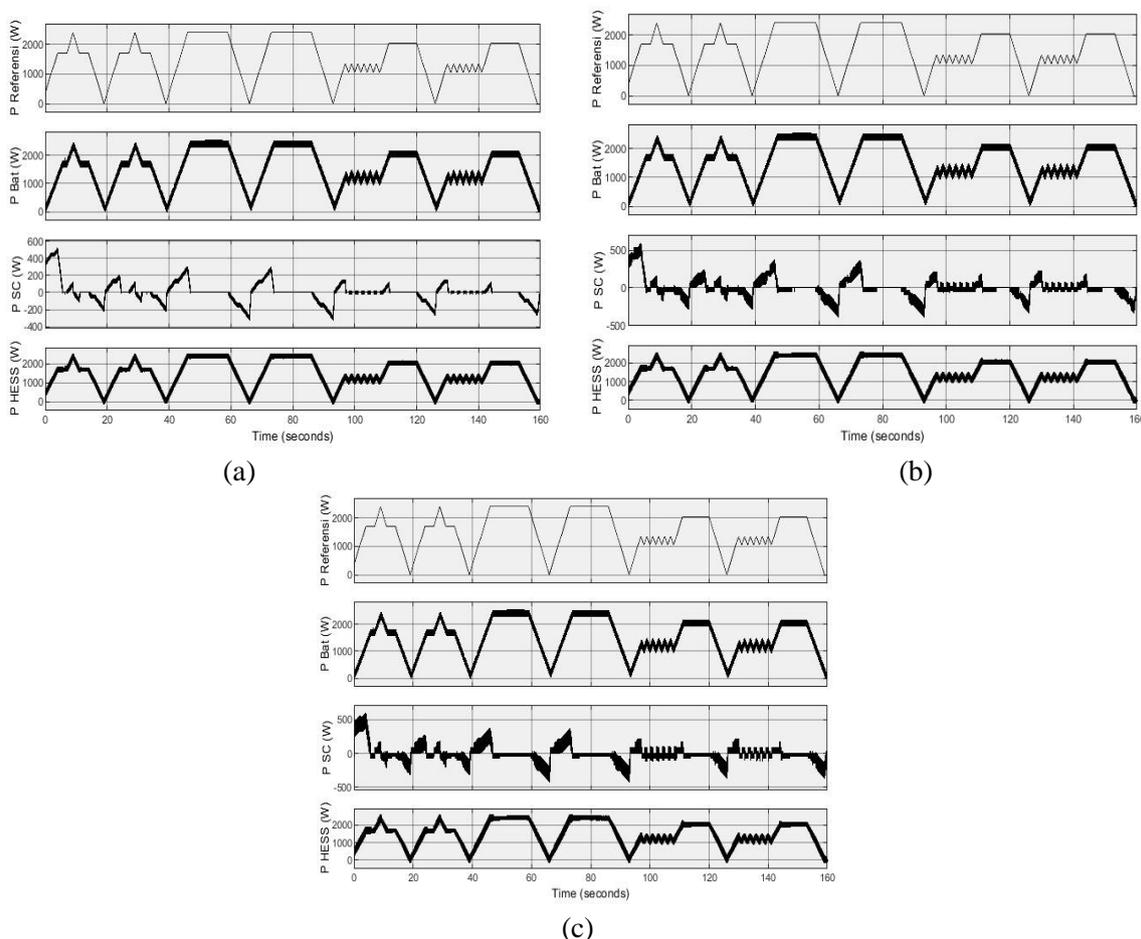


Gambar 3. Kurva daya referensi/operasi pada simulasi HESS

Gambar 3 di atas menunjukkan kurva daya referensi/operasi yang digunakan pada simulasi HESS. Kondisi 1 diatur untuk melihat kinerja superkapasitor saat baterai tidak bisa memenuhi 3 (tiga) kondisi mobilitas pada kendaraan listrik. Kondisi 2 diatur untuk melihat kinerja baterai dan superkapasitor saat kecepatan kendaraan listrik dalam kondisi stabil. Kondisi 3 diatur untuk melihat kinerja HESS dengan pembebanan yang sesuai dengan kondisi riil di jalan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

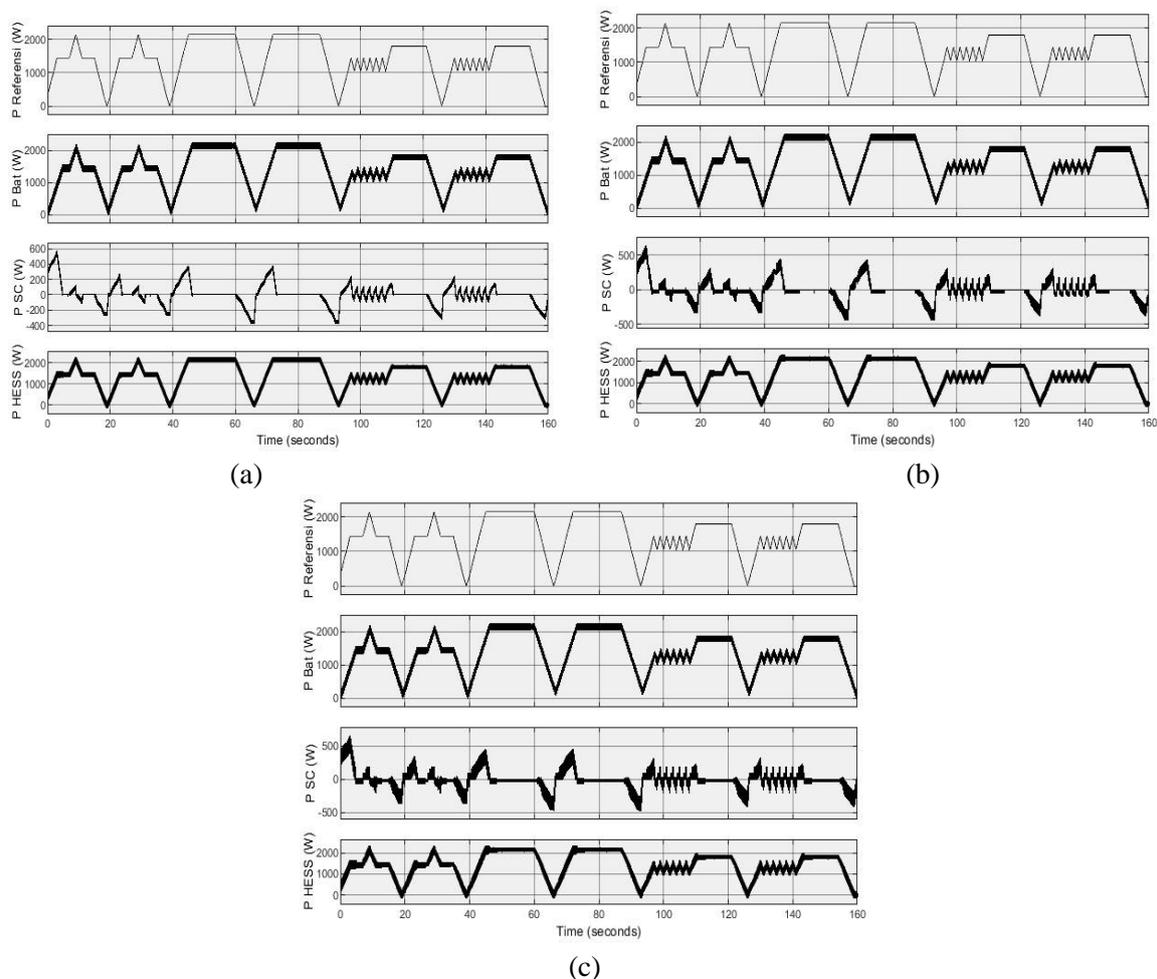
A. Hasil Pengujian Kendaraan Listrik 1 (Baterai 1)



Gambar 4. (a) Kurva daya referensi/operasi, daya baterai, daya superkapasitor dan daya HESS kendaraan listrik 1 dan superkapasitor 1, (b) Kurva daya referensi/operasi, daya baterai, daya superkapasitor dan daya HESS kendaraan listrik 1 dan superkapasitor 2, (c) Kurva daya referensi/operasi, daya baterai, daya superkapasitor dan daya HESS kendaraan listrik 1 dan superkapasitor 3

Pada gambar 4 di atas dapat di lihat kombinasi spesifikasi baterai 1 dengan 3 (tiga) varian nilai superkapasitor yang ketiganya tersedia di pasaran. Spesifikasi baterai 1 juga diambil dari salah satu produsen kendaraan listrik dalam negeri yang saat ini sudah dikomersialkan. Baterai yang digunakan memiliki kapasitas 20 Ah dengan tegangan operasi 54V-82V. Dari gambar 4, terlihat daya operasi dari baterai, superkapasitor, serta daya hibridisasi/HESS yang dibandingkan dengan daya referensi yang telah ditentukan sebelumnya. Daya referensi yang merupakan daya acuan yang disesuaikan dengan daya operasi kendaraan listrik memiliki nilai maksimal 2400 W dengan asumsi kecepatan motor listrik maksimal 70 km/hr. Dapat dilihat dari gambar 4, masing-masing daya HESS dari 3 (tiga) nilai superkapasitor dapat memenuhi daya referensi/daya operasi yang dibutuhkan oleh kendaraan listrik. Ketiga kombinasi hibridisasi ini juga memperlihatkan karakteristik dari baterai dan superkapasitor saat beroperasi. Dapat dilihat disaat kendaraan listrik membutuhkan daya maksimal/puncak dalam kondisi akselerasi, baterai tidak dapat langsung memenuhi dalam waktu yang cepat, kebutuhan daya puncak dipasok dari daya luaran superkapasitor. Dapat dilihat pada gambar 4, saat kendaraan listrik dalam kondisi deselerasi bahkan pengereman mendadak, baterai tidak langsung dapat merespon perlambatan dalam waktu yang cepat. Baterai masih terus memasok daya walaupun menurun secara linier. Olehnya, dalam kondisi ini, superkapasitor kembali berperan untuk dengan cepat menurunkan daya pasokan dengan menyerap arus yang dihasilkan agar kendaraan listrik dapat memenuhi kondisi ini.

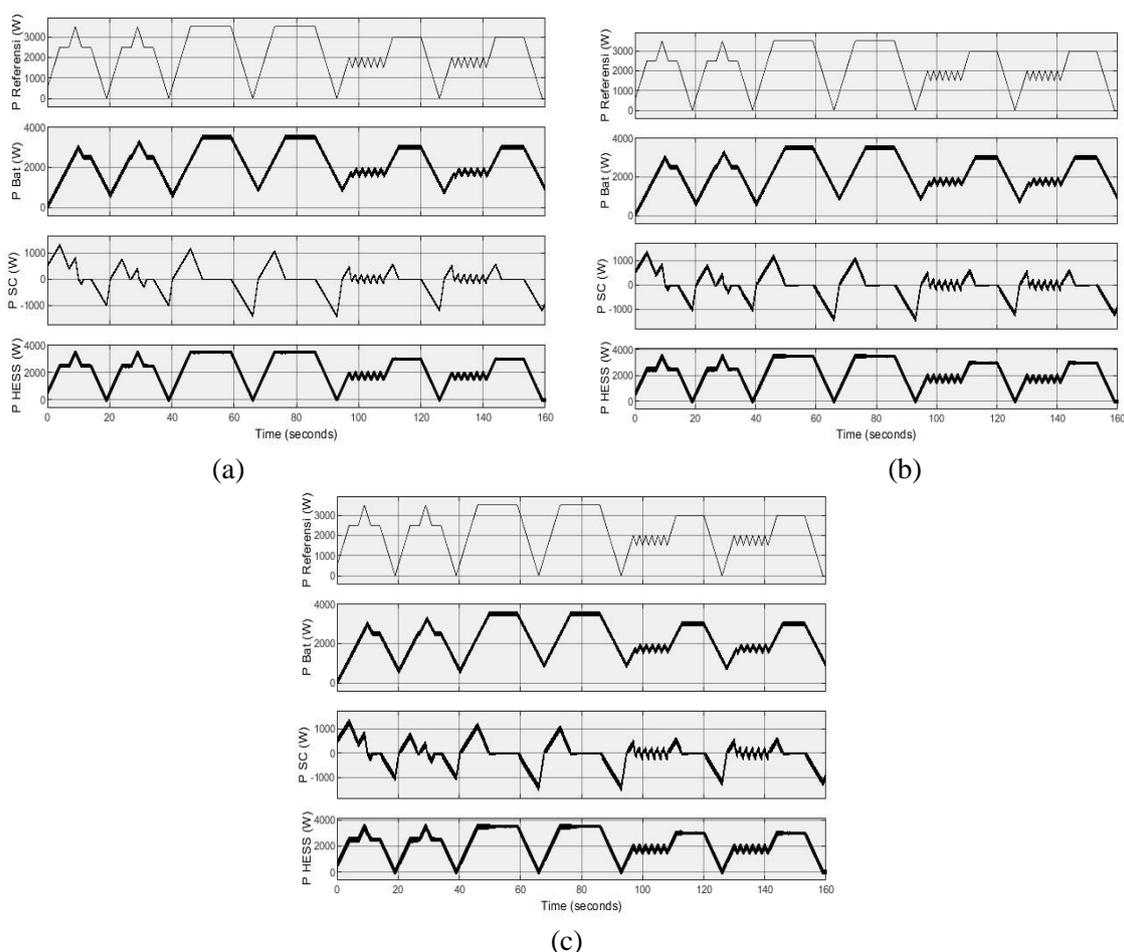
B. Hasil Pengujian Kendaraan Listrik 2 (Baterai 2)



Gambar 5. (a) Kurva daya referensi/operasi, daya baterai, daya superkapasitor dan daya HESS kendaraan listrik 2 dan superkapasitor 1, (b) Kurva daya referensi/operasi, daya baterai, daya superkapasitor dan daya HESS kendaraan listrik 2 dan superkapasitor 2, (c) Kurva daya referensi/operasi, daya baterai, daya superkapasitor dan daya HESS kendaraan listrik 2 dan superkapasitor 3

Pada gambar 5 di atas dapat di lihat kombinasi spesifikasi baterai 2 dengan 3 (tiga) varian nilai superkapasitor yang ketiganya tersedia di pasaran. Spesifikasi baterai 2 juga diambil dari salah satu produsen kendaraan listrik dalam negeri yang saat ini sudah dikomersialkan. Baterai yang digunakan memiliki kapasitas 23 Ah dengan tegangan operasi 45V-69,8V. Dari gambar 5, terlihat daya operasi dari baterai, superkapasitor, serta daya hibridisasi/HESS yang dibandingkan dengan daya referensi yang telah ditentukan sebelumnya. Daya referensi merupakan daya acuan yang telah dihitung berdasarkan parameter-parameter tertentu sesuai dengan spesifikasi kendaraan listrik yang diasumsikan sebagai daya operasi kendaraan listrik. Daya referensi yang digunakan pada simulasi gambar 5 memiliki nilai maksimal 2150 W dengan asumsi kecepatan motor listrik maksimal 60 km/hr. Dapat dilihat dari gambar 5, masing-masing daya HESS dari 3 (tiga) nilai superkapasitor dapat memenuhi daya referensi/daya operasi yang dibutuhkan oleh kendaraan listrik. Ketiga kombinasi hibridisasi ini juga memperlihatkan karakteristik dari baterai dan superkapasitor saat beroperasi. Dapat dilihat disaat kendaraan listrik membutuhkan daya maksimal/puncak dalam kondisi akselerasi, baterai tidak dapat langsung memenuhi dalam waktu yang cepat, kebutuhan daya puncak dipasok dari daya luaran superkapasitor. Dapat dilihat pada gambar 5, saat kendaraan listrik dalam kondisi deselerasi bahkan pengereman mendadak, baterai tidak langsung dapat merespon perlambatan dalam waktu yang cepat. Baterai masih terus memasok daya walaupun menurun secara linier. Olehnya, dalam kondisi ini, superkapasitor kembali berperan untuk dengan cepat menurunkan daya pasokan dengan menyerap arus yang dihasilkan agar kendaraan listrik dapat memenuhi kondisi ini.

C. Hasil Pengujian Kendaraan Listrik 3 (Baterai 3)



Gambar 6. (a) Kurva daya referensi/operasi, daya baterai, daya superkapasitor dan daya HESS kendaraan listrik 3 dan superkapasitor 1, (b) Kurva daya referensi/operasi, daya baterai, daya superkapasitor dan daya HESS kendaraan listrik 3 dan superkapasitor 2, (c) Kurva daya referensi/operasi, daya baterai, daya superkapasitor dan daya HESS kendaraan listrik 3 dan superkapasitor 3

Pada gambar 6 di atas dapat di lihat kombinasi spesifikasi baterai 3 dengan 3 (tiga) varian nilai superkapasitor yang ketiganya tersedia di pasaran. Spesifikasi baterai 3 juga diambil dari salah satu produsen kendaraan listrik dalam negeri yang saat ini sudah dikomersialkan. Baterai yang digunakan memiliki kapasitas 45 Ah dengan tegangan operasi 45V-69,8V. Dari gambar 6, terlihat daya operasi dari baterai, superkapasitor, serta daya hibridisasi/HESS yang dibandingkan dengan daya referensi yang telah ditentukan sebelumnya. Daya referensi merupakan daya acuan yang telah dihitung berdasarkan parameter-parameter tertentu sesuai dengan spesifikasi kendaraan listrik yang diasumsikan sebagai daya operasi kendaraan listrik. Daya referensi yang digunakan pada simulasi gambar 6 memiliki nilai maksimal 3400 W dengan asumsi kecepatan motor listrik maksimal 70 km/hr. Dapat dilihat dari gambar 6, masing-masing daya HESS dari 3 (tiga) nilai superkapasitor dapat memenuhi daya referensi/daya operasi yang dibutuhkan oleh kendaraan listrik. Ketiga kombinasi hibridisasi ini juga memperlihatkan karakteristik dari baterai dan superkapasitor saat beroperasi. Dapat dilihat disaat kendaraan listrik membutuhkan daya maksimal/puncak dalam kondisi akselerasi, baterai tidak dapat langsung memenuhi dalam waktu yang cepat, kebutuhan daya puncak pasok dari daya luaran superkapasitor. Dapat dilihat pada gambar 6, saat kendaraan listrik dalam kondisi deselerasi bahkan pengereman mendadak, baterai tidak langsung dapat merespon perlambatan dalam waktu yang cepat. Baterai masih terus memasok daya walau menurun secara linier. Olehnya, dalam kondisi ini, superkapasitor kembali berperan untuk dengan cepat menurunkan daya pasokan dengan menyerap arus yang dihasilkan agar kendaraan listrik dapat memenuhi kondisi ini.

PENUTUP

Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi dan pengujian HESS pada aplikasi kendaraan listrik, dapat disimpulkan pada paper ini dapat dilihat bahwa hibridisasi kinerja baterai lithium-ion dan superkapasitor terbukti dapat memenuhi daya operasi yang dibutuhkan oleh kendaraan listrik yaitu masing-masing pada nilai 2400 W, 2150 W dan 3400 W. Kinerja HESS yang diujikan pada paper ini setidaknya dapat memenuhi 3 (tiga) kondisi mobilitas yang dibutuhkan kendaraan listrik yaitu pada kondisi akselerasi, stabil dan deselerasi/pengereman mendadak. Dari hasil simulasi di atas dapat diamati bahwa saat kendaraan listrik membutuhkan daya puncak maupun permintaan pengereman mendadak yang tidak dipenuhi oleh baterai dalam waktu cepat maka superkapasitor berperan penting dalam pemenuhan kondisi tersebut. Dari hasil simulasi di atas dapat diamati bahwa untuk mendesain dan merancang HESS memerlukan perhitungan yang baik untuk menentukan nilai superkapasitor yang digunakan agar sesuai dengan daya operasi yang diinginkan. Hal tersebut berkaitan dengan efisiensi baik dari segi ukuran maupun biaya.

Rencana Pengembangan

Sebagai rencana pengembangan pada penelitian selanjutnya, maka perancangan HESS sebaiknya dilakukan dengan perhitungan matematis dan simulasi parameter yang baik. Terutama pada penentuan spesifikasi baterai lithium-ion dan nilai superkapasitor yang digunakan. Kombinasi yang berasal dari perhitungan yang tepat akan menghasilkan kombinasi nilai baterai dan superkapasitor yang sesuai dengan daya operasi yang dibutuhkan kendaraan listrik. Hal tersebut berkaitan dengan efisiensi baik dari segi ukuran maupun biaya yang dikeluarkan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] E. Pratiwi, "Emisi Kendaraan Membahayakan Kesehatan Serta Penyebab dalam Perubahan Iklim," *Dinas Kesehatan Provinsi Kalimantan Barat*, <https://dinkes.kalbarprov.go.id/emisi-kendaraan-membahayakan-kesehatan-serta-penyebab-dalam-perubahan-iklim/>. 2021.
- [2] Anonim, "Uji Emisi Kendaraan Sebagai Bentuk Kontribusi Masyarakat Terhadap Pengendalian Pencemaran Udara," *Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia*, https://www.menlhk.go.id/site/single_post/4078/uji-emisi-kendaraan-sebagai-bentuk-kontribusi-masyarakat-terhadap-pengendalian-pencemaran-udara. 2021.
- [3] U. Mahapatra, "Energy Storages and Technologies for Electric Vehicle," *Proc. 2021 Innovations in Energy Management and Renewable Resources (IEMRE)*, pp. 1-3, Feb. 2021, doi: 10.1109/IEMRE52042.2021.9386526.

-
- [4] N. Nurdjanah, "Emisi Co2 Akibat Kendaraan Bermotor Di Kota Denpasar," *J. Transportasi Darat*, vol. 16, no. 4, pp. 189-202, Dec. 2014, [Online]. Available: <https://ojs.balitbanghub.dephub.go.id/index.php/jurnaldarat/article/view/1361>.
- [5] Anonim, "Studi Mobil Listrik: Hemat Energi Hingga 80 Persen," *Kementerian Perindustrian Republik Indonesia*, <https://kemenperin.go.id/artikel/19877/Studi-Mobil-Listrik:-Hemat-Energi-Hingga-80-Persen>. 2018.
- [6] Anonim, "Pemerintah Terus Dorong Penggunaan Mobil Listrik," *Biro Komunikasi dan Informasi Publik Kementerian Perhubungan Republik Indonesia*, <https://dephub.go.id/post/read/pemerintah-terus-dorong-penggunaan-mobil-listrik>. 2022.
- [7] P. Livreri, V. Castiglia, F. Pellitteri, and R. Miceli, "Design of a battery/ultracapacitor energy storage system for electric vehicle applications," *2018 IEEE 4th International Forum on Research and Technology for Society and Industry (RTSI)*, Sep. 2018, doi: 10.1109/RTSI.2018.8548502.
- [8] A. Khaligh and Z. Li, "Battery, Ultracapacitor, Fuel Cell, and Hybrid Energy Storage Systems for Electric, Hybrid Electric, Fuel Cell, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles: State of the Art," *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, vol. 59, no. 6, pp. 2806–2814, Jul. 2010, doi: 10.1109/TVT.2010.2047877.
- [9] T. Mesbahi, F. Khenfri, N. Rizoug, P. Bartholomeus, and P. L. Moigne, "Combined Optimal Sizing and Control of Li-Ion Battery/Supercapacitor Embedded Power Supply Using Hybrid Particle Swarm–Nelder–Mead Algorithm," *IEEE Trans. on Sustainable Energy*, vol. 8, no. 1, pp. 59–73, Jan. 2017, doi: 10.1109/TSTE.2016.2582927.
- [10] M. Ruba, R. O. Nemes, R. Raia, C. Martis, D. Zuber, and C. Husar, "Hardware in the loop analysis of urban utility electric vehicle powered from supercapacitor," *2022 International Symp. on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)*, pp. 838-843, Aug. 2022, doi: 10.1109/SPEEDAM53979.2022.9842032.
- [11] R. Nemes, S. Ciornei, R. Raia, M. Ruba, H. Hedesiu, C. Martis, C. Husar, and M. Grovu, "Hardware in the Loop Testing of an Urban Electric Vehicle Model Supplied with Supercapacitors," *2021 International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics (ACEMP) & 2021 International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM)*, pp. 123-128, 2021, doi: 10.1109/OPTIM-ACEMP50812.2021.9590059.
- [12] L. Zhang, X. Hu, Z. Wang, F. Sun, J. Deng, and D. G. Dorrell, "Multiobjective Optimal Sizing of Hybrid Energy Storage System for Electric Vehicles," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 67, no. 2, pp. 1027-1035, Feb. 2018, doi: 10.1109/TVT.2017.2762368.
- [13] V. Lystianingrum, A. Irawan, I. B. Santoso, I. M. Y Negara, and A. Priyadi, "On Feasibility of Ultracapacitor Full Electric Transit Bus for Jakarta, Indonesia," *2021 International Conference on Technology and Policy in Energy and Electric Power (ICT-PEP)*, Nov. 2021, doi: 10.1109/ICT-PEP53949.2021.9600983.
- [14] Z. Cabrane, D. Batool, J. Kim, and K. Yoo, "Design and simulation studies of battery-supercapacitor hybrid energy storage system for improved performances of traction system of solar vehicle," *Journal of Energy Storage*, vol. 32, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.est.2020.101943.
- [15] Y. Wang, W. Wang, Y. Zhao, L. Yang, and W. Chen, "A Fuzzy-Logic Power Management Strategy Based on Markov Random Prediction for Hybrid Energy Storage Systems," *Energies*, vol. 9, no. 1, Jan. 2016, doi: 10.3390/en9010025.
- [16] L. Mamouri, T. Mesbahi, P. Bartholomeus, and T. Paul, "Design of a DC/DC Power Converter for Li-ion Battery/Supercapacitor Hybrid Energy Storage System in Electric Vehicles," *2020 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, Feb. 2021, doi: 10.1109/VPPC49601.2020.9330905.
- [17] A. Desreveaux, A. Bouscayrol, R. Trigui, E. Hittinger, E. Castex, and G.M. Sirbu, "Accurate energy consumption for comparison of climate change impact of thermal and electric vehicles," *Energy*, vol. 268, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.energy.2023.126637.
- [18] F. Mohammadi, and M. Saif, "A comprehensive overview of electric vehicle batteries market," *e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, vol. 3, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.prime.2023.100127.
- [19] Y. Wu, Z. Huang, H. Hofmann, Y. Liu, J. Hunag, X. Hu, J. Peng, and Z. Song, "Hierarchical predictive control for electric vehicles with hybrid energy storage system under vehicle-following scenarios," *Energy*, vol. 251, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.energy.2022.123774.
- [20] F. Chen, C. Ge, D. Tang, S. Ding, and X. Gong, "Energy management and nonlinear control strategy of hybrid energy storage system for electric vehicle," *Energy Reports*, vol. 8, pp. 11161-11173, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.egy.2022.08.250.
- [21] Q. Zhang, L. Wang, G. Li, and Y. Liu, "A real-time energy management control strategy for battery and supercapacitor hybrid energy storage systems of pure electric vehicles," *Journal of Energy Storage*, vol. 31, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.est.2020.101721.
- [22] J. Cao, and A. Emadi, "A New Battery/UltraCapacitor Hybrid Energy Storage System for Electric, Hybrid, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles," *IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS*, vol. 27, no. 1, Jan. 2012, doi: 10.1109/TPEL.2011.2151206.
-

Biodata Penulis

Ma'arif Hasan, lahir di Ujung Pandang, 25 Juli 1996. Mendapatkan gelar Sarjana Teknik Jurusan Teknik Elektro Universitas Hasanuddin pada tahun 2017. Tahun 2021 mendapatkan beasiswa pendanaan Lembaga Pengelola Dana Pendidikan (LPDP) untuk program gelar Magister di jurusan Teknik Elektro Program Pascasarjana Universitas Indonesia dengan bidang konsentrasi Tenaga Listrik dan Sistem Cerdas.

Chairul Hudaya, adalah Rektor ke-4 Universitas Teknologi Sumbawa (UTS) periode 2020-2024. Bergabung sebagai dosen Teknik Elektro Universitas Indonesia (UI) pada tahun 2009. Mendapatkan gelar Sarjana Teknik dari UI pada tahun 2006, gelar *Master of Engineering* dari Teknik Sistem Energi, Seoul *National University* pada tahun 2009 dan gelar Ph.D dari *University of Science and Technology – Korea Institute of Science and Technology* pada tahun 2016. Sebelum menjabat sebagai Rektor UTS, pernah diamanahi sebagai Ketua Program Studi Magister Teknik Sistem Energi Fakultas Teknik UI (2018-2020), Kepala Laboratorium Konversi Energi Listrik Teknik Elektro UI (2019-2020) dan Manager Keuangan dan Hibah *SMART CITY* UI (2017-2020).