



TUGAS AKHIR - EE 184801

**PERBANDINGAN KELAYAKAN EKONOMI
SISTEM BATERAI DAN SISTEM HIBRIDA
BATERAI-SUPERKAPASITOR PADA MOBIL
LISTRIK**

Qaedi Aufar Saifuddin Bantasyam
NRP 071116400000133

Dosen Pembimbing
Vita Lystianingrum, ST., M.Sc., Ph.D.
Ir. Sjamsjul Anam, MT.

DEPATERMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro dan Informatika Cerdas
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020



TUGAS AKHIR - EE 184801

**PERBANDINGAN KELAYAKAN EKONOMI SISTEM
BATERAI DAN SISTEM HIBRIDA BATERAI-
SUPERKAPASITOR PADA MOBIL LISTRIK**

Qaedi Aufar Saifuddin Bantasyam
NRP 07111640000133

Dosen Pembimbing
Vita Lystianingrum, ST., M.Sc., Ph.D.
Ir. Sjamsjul Anam, MT.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro dan Informatika Cerdas
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020



FINAL PROJECT - EE 184801

***COMPARISON OF ECONOMIC VIABILITY OF
BATTERY-ONLY SYSTEM AND HYBRID BATTERY-
SUPERCAPACITOR SYSTEM ON ELECTRIC VEHICLES***

Qaedi Aufar Saifuddin Bantasyam
NRP 07111640000133

Supervisors
Vita Lystianingrum, ST., M.Sc., Ph.D.
Ir. Sjamsjul Anam, MT.

ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Electrical Technology and Intelligent Informatics
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020

Halaman ini sengaja dikosongkan

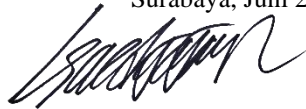
PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul **“PERBANDINGAN KELAYAKAN EKONOMI SISTEM BATERAI DAN SISTEM HIBRIDA BATERAI-SUPERKAPASITOR PADA MOBIL LISTRIK”** adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diizinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Juni 2020



Qaedi AUFAR Saifuddin Bantasyam
07111640000133

Halaman ini sengaja dikosongkan

**PERBANDINGAN KELAYAKAN EKONOMI SISTEM BATERAI
DAN SISTEM HIBRIDA BATERAI-SUPERKAPASITOR PADA
MOBIL LISTRIK**

TUGAS AKHIR

Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik

Pada

Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Departemen Teknik Elektro
Fakultas Teknologi Elektro dan Informatika Cerdas
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Menyetujui,

Dosen Pembimbing I,



16-07-2020

Vita Lystianingrum, ST., M.Sc., Ph.D.

NIP. 198208292006042001

**SURABAYA
JULI, 2020**

Halaman ini sengaja dikosongkan

**PERBANDINGAN KELAYAKAN EKONOMI SISTEM BATERAI
DAN SISTEM HIBRIDA BATERAI-SUPERKAPASITOR PADA
MOBIL LISTRIK**

TUGAS AKHIR

Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik

Pada

Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Departemen Teknik Elektro
Fakultas Teknologi Elektro dan Informatika Cerdas
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Menyetujui,

Dosen Pembimbing II,



Ir. Sjamsjul Anam, MT.
NIP. 196307251990031002

**SURABAYA
JULI, 2020**

Halaman ini sengaja dikosongkan

PERBANDINGAN KELAYAKAN EKONOMI SISTEM BATERAI DAN SISTEM HIBRIDA BATERAI-SUPERKAPASITOR PADA MOBIL LISTRIK

Nama Mahasiswa : Qaedi Aufar Saifuddin Bantasyam
Dosen Pembimbing I : Vita Lystianingrum, ST., M.Sc., Ph.D.
Dosen Pembimbing II : Ir. Sjamsjul Anam, MT.

Abstrak:

Mobil listrik merupakan salah satu alternatif yang telah berkembang dengan pesat untuk menjawab masalah polusi udara dan penggunaan kendaraan ramah lingkungan. Salah satu sistem penyimpanan energi mobil listrik yang paling sering ditemukan adalah sistem penyimpanan energi baterai-saja (BESS). Namun sistem ini memiliki kekurangan dari segi kerapatan daya yang tidak terlalu tinggi, siklus kerja yang tidak terlalu banyak, dan umur yang tidak terlalu lama. Hal ini akan mempengaruhi efisiensi sistem dan kapasitas sistem penyimpanan energi yang dibutuhkan, serta berpengaruh kepada kelayakan ekonomi mobil listrik. Sistem penyimpanan energi hibrida baterai-superkapasitor (HESS) merupakan salah satu alternatif yang ditemukan untuk mengatasi masalah tersebut. Superkapasitor (*supercapacitor*) memiliki kerapatan daya yang lebih tinggi, siklus kerja yang lebih banyak, dan umur yang lebih panjang, namun memiliki densitas energi yang rendah. HESS dapat memberikan performa mobil listrik yang lebih optimal serta memiliki kelayakan ekonomi yang lebih baik. Tugas akhir ini berisi mengenai studi perbandingan kelayakan ekonomi sistem penyimpanan energi baterai-saja dan sistem penyimpanan energi hibrida baterai-superkapasitor, dengan berfokus kepada proses *sizing* penyimpanan energi kedua sistem dan membandingkan hasil analisis kelayakan ekonominya. Berdasarkan hasil simulasi dan perhitungan pada tugas akhir ini, dapat disimpulkan bahwa penambahan superkapasitor membuat masa pakai baterai menjadi lebih lama, serta HESS memiliki kelayakan ekonomi yang lebih baik dibandingkan sistem BESS.

Kata Kunci: Baterai, Superkapasitor, Sistem Penyimpanan Energi Hibrida, Kelayakan Ekonomi, Mobil Listrik

Halaman ini sengaja dikosongkan

COMPARISON OF ECONOMIC VIABILITIES OF BATTERY-ONLY SYSTEM AND HYBRID BATTERY-SUPERCAPACITOR SYSTEM ON ELECTRIC VEHICLES

Student's Name : Qaedi Aufar Saifuddin Bantasyam
Supervisor I : Vita Lystianingrum, ST., M.Sc., Ph.D.
Supervisor II : Ir. Sjamsjul Anam, MT.

Abstract:

Electric cars have become a well-developed alternative to handle the issues of air pollution and environmental-friendly vehicle. One of the most found electric cars energy storage system is the battery-only energy storage system (BESS). BESS has shortcomings in terms of having low power density, short duty cycle, and short life span. This will affect the efficiency of the system and the capacity of the energy storage system needed, as well as affect the car's economic viability. The hybrid-battery energy storage system (HESS) has been found to overcome this problem. Supercapacitors have higher power density, longer duty cycle, and longer life cycle, but have a lower energy density. HESS can provide better electric car's performance while having better economic viability. This final project provides a comparative study of the economic viability of a battery-only energy storage system and hybrid battery-supercapacitors energy storage system, focusing on the sizing prices of the energy storage of the two systems, and comparing its economic viability's results analysis. According to the simulations and calculations provided in this final project, it can be concluded that the addition of supercapacitors will extend the batteries life span, while having better economic viability in comparison to the BESS.

Keywords: *Battery, Supercapacitors, Hybrid Energy Storage System, Economic Viabilities, Electric Vehicles*

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT. Atas segala Rahmat, Karunia, dan Petunjuk yang telah dilimpahkan-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan Judul **“PERBANDINGAN KELAYAKAN EKONOMI SISTEM BATERAI DAN SISTEM HIBRIDA BATERAI-SUPERKAPASITOR PADA MOBIL LISTRIK”**.

Tugas akhir ini disusun sebagai salah satu persyaratan untuk menyelesaikan jenjang pendidikan Sarjana pada bidang studi Teknik Sistem Tenaga, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro dan Informatika Cerdas, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Allah SWT atas segala Rahmat, Karunia, dan Petunjuk-Nya.
2. Umi Hj. Zahrah dan Ayah H. Saifuddin Bantasyam di Aceh, atas segala doa, cinta, dan kasih sayang kepada penulis dimanapun dan dalam keadaan apapun. Semoga Allah SWT senantiasa melindungi Umi dan Ayah dan mendapatkan tempat terbaik kelak di Surga-Nya.
3. Ibu Vita Lystianingrum, ST., M.Sc., Ph.D. dan Bapak Ir. Sjamjsul Anam, MT. selaku dosen pembimbing yang telah memberikan arahan, bimbingan dan perhatiannya selama proses penyelesaian tugas akhir ini.
4. Yah Ngah Hamdani Bantasyam yang selalu memberikan dukungan dan arahan kepada penulis selama berkuliah di Surabaya.
5. Bang Amal di Dumai dan Cut Ngoh di Banda Aceh atas segala perhatian yang telah diberikan kepada penulis selama ini.
6. Para asisten Laboratorium Instrumentasi, Pengukuran, dan Identifikasi sistem tenaga (LIPIST) yang selalu menjadi tempat untuk bercerita, bercengkrama, dan sepejuangan dalam menyelesaikan Tugas Akhir.
7. Tim Superkapasitor Hebat LIPIST 2020, Andi Irawan, Ilham Bagus Santoso, yang telah menjadi teman diskusi

yang luar biasa bagi penulis dalam mengerjakan Tugas Akhir.

8. Teman-teman Elektro Aceh 2016, Mar'ie Muhammad, TM Raza Alfieri, Teuku Rizki Firdausi yang telah menjadi teman seperjuangan selama berkuliah di Teknik Elektro ITS.
9. Mahasiswa ITS Aceh 2016 yang selalu menjadi tempat penulis untuk dapat melepas penat dan teman seperjuangan.
10. Teman-teman Kos BME C52, Muhammad Farhan, Di Fitra Rezky Zain, Diaz Laksamana, yang senantiasa menjadi teman penulis dalam keseharian.
11. Adik-adik “Kantor Cabang WHO”, Faiz Azhanzi Yazid, Midrar Yusya, Ghazi Muharam, M. Ghifari Karsa, M. Shidqan Taraziq, yang selalu menemani penulis dalam keseharian.
12. Teman-teman seperjuangan e56 yang telah menemani dan menorehkan cerita selama masa kuliah sampai penyusunan Tugas Akhir ini.
13. Seluruh dosen dan karyawan Departemen Teknik Elektro ITS yang telah memberikan banyak ilmu dan menciptakan suasana belajar yang luar biasa.

Penulis telah berusaha maksimal dalam penyusunan tugas Akhir ini. Tentu Tugas Akhir ini masih jauh dari kata sempurna. Oleh karena itu, segala kritik dan saran akan sangat berharga bagi penulis dan bagi pengembangan Tugas Akhir ini. Semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat yang luas.

Banda Aceh, Juni 2020

Qaedi Aufar Saifuddin Bantasyam
07111640000133

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
PERNYATAAN KEASLIAN	
LEMBAR PENGESAHAN	
ABSTRAK	xi
ABSTRACT	xiii
KATA PENGANTAR	xv
DAFTAR ISI	xvii
DAFTAR GAMBAR	xix
DAFTAR TABEL	xxi
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Permasalahan	2
1.3 Tujuan	2
1.4 Batasan Masalah	2
1.5 Metodologi	3
1.6 Sistematika Penulisan	4
1.7 Relevansi	5
BAB II KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI	7
2.1 Penelitian Terkait	7
2.2 Baterai	9
2.3 Superkapasitor	10
2.4 Perbandingan Karakteristik Baterai dan Superkapasitor	12
2.5 Sistem Penyimpanan Energi Baterai-saja pada Mobil Listrik	13
2.6 Sistem Penyimpanan Energi Hibrida Baterai-Superkapasitor pada Mobil Listrik	14
2.6.1 <i>Regenerative Braking</i>	16
2.7 <i>Life Cycle Cost (LCC)</i> sebagai Analisis Kelayakan Ekonomi	16
2.7.1 <i>Initial Cost</i>	17
2.7.2 <i>Operational and Maintenance Cost</i>	17
BAB III SIMULASI DAN PERHITUNGAN KAPASITAS SISTEM PENYIMPANAN ENERGI PADA KENDARAAN LISTRIK	19
3.1 Model kendaraan listrik yang digunakan	19
3.2 Simulasi Kendaraan Listrik menggunakan Program ADVISOR ..	20
3.2.1 Parameter Kendaraan Listrik	23
3.2.2 Siklus Berkendara (<i>Driving Cycle</i>)	24
3.2.3 Hasil Simulasi	25

3.3	Perhitungan Kapasitas Sistem Penyimpanan Energi berdasarkan Simulasi.....	26
3.3.1	Perhitungan Kapasitas Sistem Penyimpanan Energi Baterai-saja pada Mobil Listrik.....	27
3.3.2	Perhitungan Kapasitas Sistem Penyimpanan Energi Hibrida Baterai-Superkapasitor pada Mobil Listrik.....	32
3.4	Rekapitulasi Hasil Perhitungan Kapasitas Sistem Penyimpanan Energi pada Mobil Listrik.....	37
3.5	Perhitungan Analisis Kelayakan Ekonomi.....	40
3.5.1	<i>Operational and Maintenance Cost</i>	40
3.5.2	<i>Replacement Cost</i>	40
	BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	43
4.1	Perbandingan Kinerja antara Sistem Penyimpanan Energi Baterai-saja dan Sistem Penyimpanan Energi Hibrida Baterai-Superkapasitor.....	43
4.1.1	Karakteristik Arus.....	43
4.1.2	Perbandingan Bobot dan Harga Konfigurasi Sistem Penyimpanan Energi.....	47
4.2	Analisis Kelayakan Ekonomi Sistem Baterai-saja dan Sistem Hibrida Baterai-Superkapasitor pada Mobil Listrik.....	48
4.2.1	Perhitungan <i>Initial Cost</i>	49
4.2.2	Perhitungan <i>Operational and Maintenance (O&M) Cost</i>	49
4.2.3	Perhitungan <i>Life Cycle Cost (LCC)</i>	50
	BAB V KESIMPULAN	57
5.1	Kesimpulan.....	57
5.2	Saran.....	57
	DAFTAR PUSTAKA	59

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Aliran ion litium dalam suatu cell baterai	9
Gambar 2.2	Struktur internal dari superkapasitor	10
Gambar 2.3	Perbandingan struktur baterai, kapasitor, dan superkapasitor	11
Gambar 2.3	Analogi wadah air, superkapasitor (kiri), dan baterai (kanan)	12
Gambar 2.4	Rangkaian tipikal konfigurasi sistem penyimpanan energi baterai saja pada mobil listrik	13
Gambar 2.5	Topologi Sistem Penyimpanan Energi Hibrida Baterai- Superkapasitor pada Mobil Listrik	15
Gambar 3.1	Mobil listrik EZZY ITS II	19
Gambar 3.2	Tampilan awal program ADVISOR di MatLab/Simulink R2019b	21
Gambar 3.3	Halaman masukan spesifikasi/model kendaraan pada ADVISOR	22
Gambar 3.4	Halaman masukan parameter siklus berkendara simulasi pada ADVISOR	22
Gambar 3.5	Halaman <i>output</i> hasil simulasi menggunakan ADVISOR	23
Gambar 3.6	Input model kendaraan listrik dalam simulasi menggunakan program ADVISOR	24
Gambar 3.7	Grafik siklus berkendara UDDS	25
Gambar 3.8	Grafik daya yang dibutuhkan oleh motor	26
Gambar 3.9	Topologi sistem penyimpanan energi baterai-saja pada mobil listrik	27
Gambar 3.8	Topologi sistem penyimpanan energi hibrida baterai- superkapasitor pada mobil listrik	32
Gambar 3.9	Metode pembagian daya antara baterai dan superkapasitor	33
Gambar 4.1	Grafik arus baterai konfigurasi sistem penyimpanan energi baterai saja	44
Gambar 4.2	Grafik arus baterai konfigurasi sistem penyimpanan energi hibrida baterai-superkapasitor	44
Gambar 4.3	Grafik perbandingan arus baterai antara sistem penyimpanan enegi baterai-saja dan sistem penyimpanan energi hibrida baterai-superkapasitor	45

Gambar 4.4 Grafik arus superkapasitor konfigurasi sistem penyimpanan hibrida baterai-superkapasitor.....46

Gambar 4.5 Perbandingan komponen biaya LCC.....51

Gambar 4.6 Perbandingan biaya LCC antara konfigurasi sistem penyimpanan energi baterai-saja dan sistem penyimpanan energi hibrida baterai-superkapasitor54

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Spesifikasi mobil listrik EZZY ITS II	20
Tabel 3.2	Data siklus berkendara UDDS	25
Tabel 3.3	Spesifikasi baterai <i>high energy</i> Saft VL 34570 xlr	28
Tabel 3.4	Rekapitulasi Hasil Proses <i>Sizing</i> Sistem Penyimpanan Energi Baterai-Saja pada Mobil Listrik.	38
Tabel 3.5	Rekapitulasi Hasil Proses <i>Sizing</i> Sistem Penyimpanan Energi Hibrida Baterai-Superkapasitor pada Mobil Listrik.	39
Tabel 4.1	Perbandingan biaya total peralatan sistem penyimpanan energi pada mobil listrik	48
Tabel 4.2	Perhitungan <i>initial cost</i>	49
Tabel 4.3	Perhitungan <i>replacement cost</i> baterai sistem penyimpanan energi baterai-saja	52
Tabel 4.4	Perhitungan <i>replacement cost</i> baterai sistem penyimpanan energi hibrida baterai-superkapasitor	52
Tabel 4.5	Perhitungan Total LCC selama 10 Tahun untuk Sistem Penyimpanan Energi Baterai-saja	53
Tabel 4.6	Perhitungan Total LCC selama 10 Tahun untuk Sistem Penyimpanan Energi Hibrida Baterai-Superkapasitor.....	54

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Mobil merupakan salah satu sarana transportasi yang paling banyak digunakan manusia dalam kehidupan sehari-hari. Mobil menjadi pilihan utama sarana transportasi, terutama transportasi rumah tangga akibat dari penggunaannya yang nyaman dan praktis. Dibalik kenyamanan dan kepraktisan dari sebuah mobil, sayangnya mobil menjadi salah satu penyebab utama polusi udara. Kehadiran mobil listrik merupakan salah satu solusi utama dan yang paling berkembang dalam upaya mengurangi polusi udara dari sarana transportasi. Hal ini mendorong hampir semua produsen kendaraan di dunia untuk berlomba-lomba menciptakan mobil listrik dengan berbagai fitur yang unik dan spesifikasi yang hampir menyaingi kendaraan berbasis mesin bakar. Hal ini mengakibatkan penggunaan mobil listrik sudah mulai ditemukan di banyak negara maju di dunia. Indonesia, sebagai salah satu negara berkembang di dunia, menyadari bahwa perkembangan mobil listrik dunia harus mampu diikuti oleh Indonesia. Hal ini mendorong pemerintah hingga akhirnya mengeluarkan Peraturan Presiden (Perpres) Nomor 55 Tahun 2019 tentang Percepatan Program Mobil Listrik.

Baterai selalu menjadi salah satu pilihan utama sebagai media penyimpanan energi pada mobil listrik. Baterai memiliki keunggulan dibandingkan media penyimpanan lainnya dari segi rasio daya terhadap berat yang tinggi dan kerapatan energi yang juga tinggi. Namun, baterai juga memiliki kendala dalam pengoperasiannya, yaitu baterai tidak memiliki kerapatan daya yang terlalu tinggi dan memiliki durasi pengisian yang relatif lama. Baterai juga memiliki usia yang terbatas pada masa kurang dari lima tahun [1]. Hal ini mempengaruhi performa kendaraan listrik dari segi kemampuan akselerasi dan masa pakai yang rendah akan mempengaruhi kelayakan ekonomi kendaraan.

Untuk mengatasi hal ini, teknologi sistem hibrida baterai-superkapasitor (*supercapacitor*) menjadi salah satu alternatif utama dalam meningkatkan efisiensi dari sistem penyimpanan energi pada mobil listrik. Jika dibandingkan dengan baterai, superkapasitor memiliki nilai kapasitansi yang sangat tinggi, mencapai ribuan Farad. Karakteristik superkapasitor dapat dikatakan merupakan sifat komplemen dari baterai. Superkapasitor memiliki beberapa keunggulan dibandingkan baterai baterai, yaitu kerapatan daya lebih tinggi, siklus kerja yang lebih lama,

dan umur yang lebih lama. Sistem hibrida baterai-superkapasitor ini secara teori mampu memberikan performa yang lebih maksimal pada mobil listrik. Untuk mendukung teori ini, penelitian dan analisis kelayakan ekonomi lanjutan tentang sistem hibrida baterai-superkapasitor masih perlu dilakukan. Sehingga sistem hibrida baterai-superkapasitor dapat terbukti kebenarannya dalam menghasilkan efisiensi dan kelayakan ekonomi yang lebih baik dibandingkan dengan sistem baterai saja.

1.2 Permasalahan

Adapun perumusan masalah dari tugas akhir ini adalah:

1. Bagaimana menentukan kapasitas (*sizing*) sistem hibrida baterai-superkapasitor pada mobil listrik.
2. Bagaimana hasil perbandingan kelayakan ekonomi antara sistem baterai dan sistem hibrida baterai-superkapasitor pada mobil listrik.

1.3 Tujuan

Tugas Akhir ini bertujuan untuk:

1. Mengetahui bagaimana menentukan kapasitas (*sizing*) sistem hibrida-baterai superkapasitor pada mobil listrik.
2. Mengetahui hasil perbandingan kelayakan ekonomi antara sistem baterai dan sistem hibrida baterai-superkapasitor pada mobil listrik.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah pada tugas akhir ini adalah:

1. Pada Tugas Akhir ini dipilih satu jenis baterai dan satu jenis superkapasitor tertentu, sehingga tidak mempertimbangkan pemilihan jenis lain.
2. Parameter kendaraan yang digunakan untuk pengerjaan Tugas Akhir ini mengikuti kendaraan listrik produksi Mobil Listrik Nasional EZZY ITS II. Data yang tidak tersedia akan dilengkapi dengan data dan asumsi dari referensi lain.
3. Perhitungan analisis kelayakan ekonomi yang dilakukan hanya untuk konfigurasi sistem penyimpanan energi pada kendaraan listrik saja (tidak keseluruhan komponen kendaraan).

4. Lingkup Tugas Akhir ini tidak mencakup metode pengontrolan baterai maupun superkapasitor.
5. Lingkup Tugas Akhir ini tidak mencakup detail proses pengisian maupun stasiun pengisian, sehingga diasumsikan penyimpanan energi dapat diisi sesuai kebutuhan.
6. Lingkup Tugas Akhir ini tidak mencakup simulasi temperatur baterai maupun superkapasitor.

1.5 Metodologi

Metodologi yang digunakan dalam menyusun penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Studi Literatur
Mengumpulkan referensi-referensi dan literatur yang berhubungan dengan sistem baterai dan sistem hibrida baterai-superkapasitor pada mobil listrik. Referensi yang berkaitan dengan perhitungan dan analisis perbandingan kelayakan ekonomis dari sebuah mobil listrik juga diperlukan sehingga hasil analisis dapat sesuai dengan prinsip-prinsip ekonomi yang ada.
2. Survey Lapangan
Pada tahap ini dilakukan survey lapangan untuk melihat konfigurasi sistem kelistrikan mobil listrik (sistem baterai dan sistem hibrida baterai-superkapasitor) dan mempelajari pola pengoperasian dari sebuah mobil listrik.
3. Pengumpulan Data
Pada tahap ini dilakukan pengambilan data-data yang diperlukan untuk mendukung tugas akhir ini. Data-data yang diperlukan adalah data pola pengoperasian sistem baterai dan sistem hibrida baterai-superkapasitor seperti lama charging, siklus kerja, efisiensi sistem mobil listrik, jarak tempuh rata-rata kedua sistem mobil listrik tersebut, dan lain-lain. Untuk mendukung agar data menjadi lebih akurat dan akuntabel, studi literatur juga diperlukan untuk mencari referensi-referensi tentang data-data tipikal tentang mobil listrik yang mungkin tidak tersedia di Pusat Mobil Listrik Nasional.
4. Simulasi dan Pemodelan
Tahap ini berisi proses pengolahan data-data yang diperoleh dari proses proses sebelumnya untuk mendapatkan hasil yang

diinginkan. Simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak Matlab R2019b melalui Advisor (*Advanced Vehicle Simulair*). Advisor merupakan program MatLab yang dikembangkan oleh NREL (*National Renewable Energy Laboratory*) yang berfungsi untuk menciptakan simulasi pengoperasian mobil listrik dengan parameter-parameter yang berbeda. Hasil dari simulasi ini diharapkan dapat memberikan informasi daya yang dibutuhkan pada sebuah kendaraan listrik dalam suatu siklus kerja, sehingga proses kalkulasi *sizing* sistem penyimpanan energi dapat dilakukan.

5. Perhitungan Kelayakan Ekonomi
Pada tahap ini dilakukan perhitungan komponen nilai-nilai ekonomis dari kedua sistem. Data nilai ekonomis dari komponen nilai-nilai akan diambil dari data-data tipikal berdasarkan studi literatur, dan mengikuti data yang tersedia pada model Matlab R2019b Advisor. Metode perhitungan kelayakan ekonomi yang digunakan adalah metode perhitungan *Life cycle cost* (LCC) dalam periode 10 tahun.
6. Analisis Hasil Perhitungan dan Analisis Perbandingan
Pada tahap ini dilakukan proses analisis terhadap hasil simulasi yang sudah dilakukan, dan hasil simulasi ini akan mempengaruhi faktor kelayakan ekonomi. Kemudian akan dilakukan analisis perbandingan kelayakan ekonomi dari sistem baterai dan sistem hibrida baterai-superkapasitor. Pada proses ini akan dihasilkan sebuah table dan grafik yang berisi perbandingan hal-hal teknis dan eknomis, untuk kemudian ditarik kesimpulan.
7. Penyelesaian Laporan Tugas Akhir
Tahap ini dilakukan sebagai tahap akhir dari serangkaian pengerjaan tugas akhir ini. Tahap ini juga dilakukan untuk memenuhi persyaratan kelulusan mata kuliah tugas akhir.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dalam tugas akhir ini terdiri dari 5 (lima) Bab dengan uraian sebagai berikut:

1. BAB 1 merupakan pendahuluan yang berisikan latar belakang masalah, tujuan, metodologi, sistematika penulisan dan relevansi.

2. BAB 2 berisikan kajian pustaka dan dasar teori yang membahas mengenai teori-teori penunjang yang berkaitan dengan sistem penyimpanan energi baterai saja dan sistem penyimpanan energi hibrida baterai-superkapasitor.
3. BAB 3 berisikan simulasi dan perhitungan kapasitas sistem penyimpanan energi pada kendaraan listrik
4. BAB 4 berisikan hasil simulasi dan analisis data, yang membahas tentang Analisa data hasil simulasi dan proses perhitungan perbandingan kelayakan ekonomi.
5. BAB 5 berisikan kesimpulan dan saran.

1.7 Relevansi

Tugas akhir ini diharapkan mampu memberikan manfaat tentang pengaruh superkapasitor terhadap kendaraan listrik, terlebih pada parameter-parameter yang ada dalam kendaraan listrik baik dari segi teknis (daya, efisiensi, dll.) maupun dari segi ekonomi (kelayakan ekonomis).

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB II

KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

Dalam bab ini akan dijelaskan teori-teori dan penelitian terkait yang berhubungan dengan topik sistem baterai dan sistem hibrida baterai-superkapasitor ada mobil listrik. Bab ini terdiri dari beberapa sub-bab yang berkaitan untuk menjadi teori penunjang dalam tugas akhir ini, diantaranya kajian pustaka dan penelitian terkait, sistem penyimpanan energi baterai saja, sistem penyimpanan energi hibrida baterai-superkapasitor, *regenerative braking*, dan teori pengantar untuk analisis perbandingan kelayakan ekonomi. Kajian penelitian terkait akan disajikan secara singkat di sub-bab 2.1, sedangkan dasar teori yang berkaitan dengan tugas akhir ini akan diberikan di sub-bab 2.2 sampai 2.4.

2.1 Penelitian Terkait

Dalam sub-bab ini akan dibahas mengenai kajian pustaka yang memuat tentang hasil penelitian yang pernah dilakukan sebelumnya. Hasil penelitian sebelumnya berhubungan dengan penggunaan superkapasitor dalam aplikasi PHEV (*Plug-in Hybrid Electric Vehicles*), yaitu kendaraan listrik yang menggunakan sistem penyimpanan energi hibrida baterai-superkapasitor yang dayanya dapat diisi kembali (*rechargeable*). Kajian pustaka dan penelitian terkait memuat hasil penelitian yang berfokus kepada beberapa aspek, seperti proses *sizing* sistem penyimpanan energi hibrida baterai-superkapasitor, keunggulan superkapasitor, proses *regenerative braking*, serta analisis perhitungan komponen-komponen kelayakan ekonomi pada sebuah sistem penyimpanan energi pada mobil listrik.

Sejalan dengan maraknya isu terhadap pemanasan global dan isu lingkungan di masa sekarang ini, penggunaan kendaraan listrik mulai meingkat pesat. Dalam praktiknya, peralatan penyimpanan energi yang paling sering digunakan dalam kendaraan listrik adalah baterai. Baterai merupakan pilihan utama sebagai peralatan penyimpanan energi dikarenakan sifatnya yang mampu menyimpan energi yang besar dalam ukuran dan berat yang relatif kecil [2]. Sesuai dengan perkembangan teknologi dan industri, maka kebutuhan daya dan energi bagi kendaraan listrik juga meningkat.

Salah satu kekurangan dari baterai adalah umur peralatan yang relatif tidak terlalu lama. Hal-hal seperti pemilihan material elektroaktif,

konduktivitas dan stabilitas kimia inti baterai, reaksi redoks yang terjadi di elektroda dan elektrolit, *overcharging*, dan faktor lingkungan menjadi salah satu mengapa baterai mengalami penurunan performa yang lebih cepat [3].

Dalam penggunaan mobil listrik di kehidupan sehari-hari, mobil mengalami akselerasi dan deselerasi yang tidak seragam dan cenderung tiba-tiba. Saat proses akselerasi, mobil listrik membutuhkan daya yang besar dalam tempo waktu yang singkat. Baterai dapat memenuhi kebutuhan energi mobil saat proses *discharge* dilakukan secara monoton. Namun, jika berkaitan dengan kebutuhan daya secara instan (tiba-tiba) seperti dalam proses akselerasi, baterai tidak mampu memenuhi kebutuhan daya ini. Hal ini dikarenakan reaksi elektrokimia baterai yang terjadi tidak mampu mengkompensasi daya yang tiba-tiba ini. Fluktuasi arus dalam jumlah besar ini dapat memiliki efek yang buruk terhadap elektrolit baterai. Sehingga, saat proses akselerasi dan deselerasi dilakukan secara berulang-ulang, maka akan mengurangi umur dari baterai [3].

Untuk mengatasi masalah pada baterai, maka teknologi sistem penyimpanan energi hibrida baterai-superkapasitor dapat menjadi salah satu alternatif utama. Superkapasitor digunakan sebagai peralatan yang dapat mengkompensasi baterai dalam menyediakan daya secara instan (tiba-tiba) bagi mobil listrik. Hal ini berkaitan dengan sifat Superkapasitor yang memiliki densitas daya yang jauh lebih besar jika dibandingkan dengan baterai [4].

Penelitian [2] menemukan bahwa penggunaan superkapasitor pada mobil listrik terbukti memberikan performa dan efisiensi yang lebih baik dibandingkan mobil yang hanya menggunakan sistem baterai saja. Penelitian ini juga membuktikan bahwa sistem penyimpanan energi hibrida baterai-superkapasitor dapat menurunkan komponen harga biaya per satuan energi (\$/Wh).

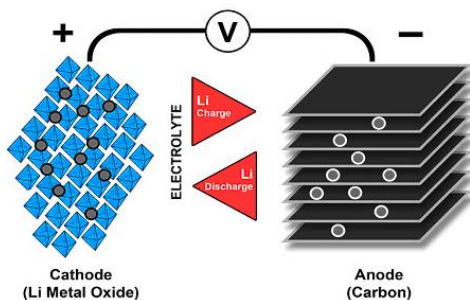
Sistem penyimpanan energi hibrida baterai-superkapasitor memiliki kelayakan ekonomi yang lebih baik dibandingkan dengan sistem baterai saja. Hal ini dikarenakan superkapasitor akan mengkompensasi arus puncak yang tinggi dari baterai, sehingga baterai akan menyalurkan arus puncak yang lebih rendah. Situasi ini membuat superkapasitor dapat menyuapli kebutuhan beban listrik dari kendaraan listrik. Tanpa superkapasitor, baterai akan menyalurkan arus yang lebih besar, sehingga akan menambah jumlah dan biaya baterai yang dibutuhkan. Oleh karena itu, konfigurasi hibrida baterai dan

superkapasitor dapat menjadi alternatif yang cukup baik, sehingga jumlah dan kapasitas baterai yang dibutuhkan oleh kendaraan listrik dapat menjadi lebih murah, lebih kecil, dan lebih efisien [5].

2.2 Baterai

Baterai merupakan salah satu media penyimpanan energi yang paling tua dan paling banyak digunakan sampai sekarang. Baterai cukup efektif untuk kebutuhan daya kecil maupun besar dalam banyak aplikasi. Baterai menyimpan energi secara proses elektrokimiawi, dengan mengubah energi kimia yang terkandung dalam material aktif baterai secara langsung melalui reaksi redoks [6].

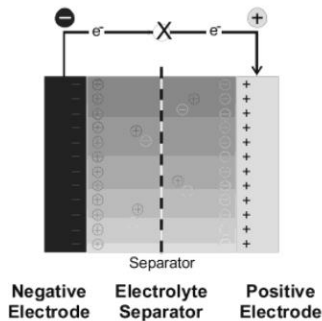
Dr. Jon Goodenough dari Universitas Texas, memperkenalkan pertama kali baterai Lithium-Ion pada tahun 1990. Baterai Lithium-Ion menjadi baterai yang paling banyak digunakan pada peralatan elektronik, sebagai akibat dari kerapatan energinya yang lebih besar dibandingkan baterai jenis lain. Proses *charging* pada baterai lithium-ion diawali dengan berpindahnya ion litium dari katoda ke anoda melalui medium elektrolit. Perpindahan ion ini akan menghasilkan energi listrik yang tersimpan di dalam baterai. Proses perpindahan Ion yang telah dijelaskan sebelumnya dapat dilihat pada Gambar 2.1 berikut.



Gambar 2.1 Aliran ion litium dalam suatu cell baterai [7]

2.3 Superkapasitor

Superkapasitor atau ultrakapasitor merupakan salah satu media penyimpanan energi yang sedang berkembang sekarang ini. Superkapasitor menyimpan energi dalam bentuk muatan listrik diantara permukaan elektroda dan elektrolit. Superkapasitor biasanya menggunakan karbon dengan luas permukaan yang besar sebagai elektroda [8]. Gambar 1 menunjukkan struktur internal dalam superkapasitor yang terdiri atas elektroda positif dan negative, dan dipisahkan oleh lapisan elektrolit dibagian tengah superkapasitor [9].



Gambar 2.2 Struktur internal dari superkapasitor [5]

Pada superkapasitor, luas penampang dari masing-masing elektroda menjadi lebih besar sehingga jarak antar elektroda menjadi lebih pendek. Hal ini menghasilkan nilai kapasitansi superkapasitor yang lebih besar dan dapat ditinjau melalui persamaan berikut.

$$C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{d} \quad (2.1)$$

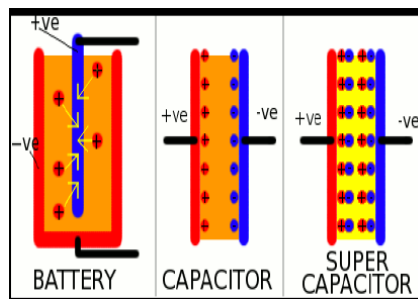
Keterangan:

- C : Besar Kapasitansi
- ϵ_r : Konstanta relatif dari bahan dielektrik antar lempeng
- ϵ_0 : Permittivitas ruang hampa
- A : Luas penampang elektroda
- d : Jarak antar muatan negatif dan positif

Nilai kapasitansi superkapasitor yang besar membuat superkapasitor dapat memiliki siklus *charge/discharge* yang sangat besar [8].

Superkapasitor memiliki beberapa kelebihan lain yaitu waktu pengisian yang lebih singkat, lebih andal dalam suhu yang fluktuatif, tidak membutuhkan banyak perawatan, memiliki kerapatan daya dan energi yang lebih besar dan menerapkan prinsip *green energy* [10].

Kapasitor konvensional, superkapasitor, dan baterai memiliki perbedaan utama pada struktur komponen penyusunnya. Gambar 2.2 menunjukkan bahwa pada kapasitor konvensional, muatan positif dibentuk di salah satu lempeng elektroda dan muatan negatif pada lempeng yang lain dengan komponen dielektrik yang berada diantara keduanya. Hal ini membuat muatan pada kapasitor konvensional tetap terpisah sehingga masing-masing muatan cenderung diam [10].



Gambar 2.3 Perbandingan struktur baterai, kapasitor, dan superkapasitor [6]

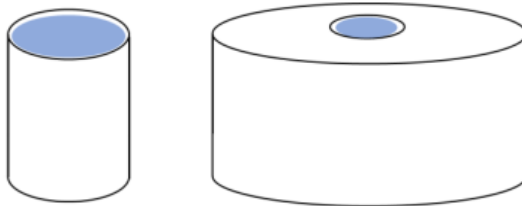
Pada superkapasitor, lempeng yang bermuatan mempolarisasi elektrolit pemisah dan mengakibatkan terbentuknya pasangan muatan yang baru pada masing-masing lempeng. Hal ini terjadi sebagai akibat dari ion positif dan ion negatif yang bergerak. Hal ini menjadi salah satu alasan mengapa superkapasitor juga disebut *electrochemical double layer capacitor* yang memungkinkan menyimpan lebih banyak muatan. Berbeda halnya dengan baterai, muatan positif dan negatif dalam superkapasitor diproduksi sepenuhnya oleh listrik statis. Tidak ada reaksi kimia yang terlibat. Baterai menyimpan listrik menggunakan reaksi kimia yang terjadi antara elektrolit [10].

2.4 Perbandingan Karakteristik Baterai dan Superkapasitor

Perbedaan yang paling mendasar antara baterai dan superkapasitor ditinjau dari segi material, struktur, dan mekanisme penyimpanan energinya. Seperti yang sudah disebutkan sebelumnya, baterai menyimpan energi secara elektrokimiawi, serta melibatkan proses reaksi kimia. Pada saat proses *charging-discharging* dilakukan, terjadi perubahan molekul-molekul baterai. Pada superkapasitor, mekanisme penyimpanan energi terjadi secara “fisis”, yakni dengan pemisahan muatan seperti yang telah dijelaskan pada sub-bab 2.3. Hal ini menyebabkan superkapasitor dapat memiliki proses *charging-discharging* yang jauh lebih cepat dibandingkan baterai, serta dengan daya yang jauh lebih besar pula.

Dalam proses penyimpanan energi pada baterai dan superkapasitor, istilah yang sering digunakan adalah densitas daya (kerapatan daya) yang didefinisikan sebagai daya per satuan volume (Watt per liter), dan daya spesifik yang didefinisikan sebagai daya per satuan berat (Watt per Kg). Istilah kerapatan energi (Watt-hour per liter) dan energi spesifik (Watt-hour per Kg) juga umum digunakan dalam parameter Baterai dan Superkapasitor [1].

Dalam membandingkan kinerja baterai dan superkapasitor, dapat digunakan analogi wadah air seperti yang ditampilkan pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Analogi wadah air, superkapasitor (kiri), dan baterai (kanan) [1]

Kapasitas/volume wadah air yang ada direpresentasikan sebagai kerapatan energi, serta lubang untuk keluar masuk air direpresentasikan sebagai kerapatan daya. Superkapasitor memiliki lubang keluar masuk air yang lebih besar dibandingkan baterai, sehingga dalam waktu singkat

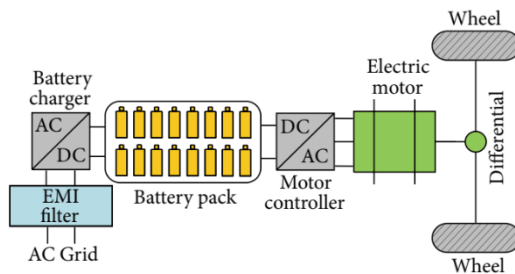
superkapasitor dapat mengeluarkan atau menerima daya (air) dalam jumlah yang lebih besar dibandingkan baterai [1].

Sebagai akibat dari keunggulan ini, superkapasitor sangat sesuai untuk diaplikasikan dalam peralatan yang memerlukan daya besar dalam waktu yang singkat, seperti proses *starting* kendaraan, maupun proses pengereman regeneratif, yang terkadang kebutuhan daya yang tinggi dalam waktu yang singkat ini tidak mampu disediakan oleh baterai. Superkapasitor biasanya tidak menjadi sumber energi tunggal dalam sebuah peralatan, melainkan dkonfigurasi sebagai sistem hibrida dengan peralatan lain, seperti baterai, maupun mesin bakar.

2.5 Sistem Penyimpanan Energi Baterai-saja pada Mobil Listrik

Pola pengoperasian mobil listrik yang fluktuatif membutuhkan sistem penyimpanan energi yang mampu mengimbangi hal tersebut. Baterai telah menjadi salah satu pilihan utama untuk penyimpanan energi pada mobil listrik. Hal ini dikarenakan baterai dapat didapat dengan harga yang relatif terjangkau, cukup mudah untuk dibawa kemana-mana (*portable*) dan cukup handal [11].

Secara konfigurasi sistem, sistem penyimpanan energi baterai saja (*Battery-only Energy Storage System - BESS*) pada mobil listrik cukup sederhana. Gambar 2.3 menunjukkan rangkaian tipikal konfigurasi sistem penyimpanan energi baterai saja pada sebuah mobil listrik.



Gambar 2.4 Rangkaian tipikal konfigurasi sistem penyimpanan energi baterai saja pada mobil listrik [5]

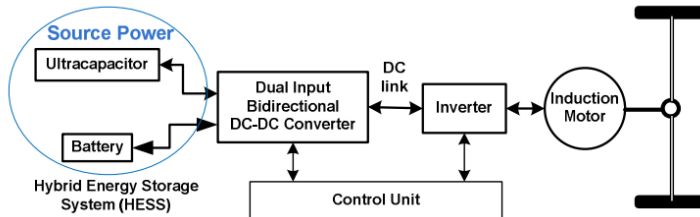
Konfigurasi yang terlihat pada Gambar 2.3 merupakan rangkaian tipikal dalam mobil listrik jenis *Plug-in electric vehicles* (PEVs). PEVs merupakan jenis mobil listrik yang memerlukan mekanisme pengisian daya dari sumber listrik eksternal untuk mengisi daya baterai. Pada saat pengisian daya dilakukan, tegangan AC dari sumber eksternal akan dikonversikan ke tegangan DC sehingga daya dapat disimpan di baterai. Modul konverter di sisi DC bertindak sebagai rangkaian *boost*, yang akan menaikkan tegangan DC untuk meminimalisir rugi-rugi. Kemudian energi akan disimpan di baterai sampai kapasitas tertentu. Saat mobil dikemudikan, daya untuk motor disalurkan dari baterai melalui inverter DC-AC untuk disalurkan dari baterai melalui inverter DC/AC [12].

Banyak tipe baterai yang digunakan dalam aplikasi mobil listrik, namun salah satu tipe yang paling sering ditemukan dalam aplikasi mobil listrik adalah tipe *lithium-ion* (Li-ion) [3]. Dalam aplikasinya, parameter karakteristik yang harus dipertimbangkan adalah umur, intensitas daya dan energi, harga, dan faktor keselamatan [13]. Umur baterai yang masih tergolong pendek untuk pemakaian dengan intensitas tinggi mobil listrik membuat pengguna harus mengeluarkan biaya yang cukup besar untuk pergantian baterai dalam rentang 6-8 tahun [14]. Untuk memastikan baterai dapat bekerja pada kondisi optimal, performa baterai harus dilakukan pengawasan dan perlindungan yang cukup baik. Hal ini membuat biaya operasional dan perawatan baterai dalam sistem PEVs menjadi lebih tinggi, dan tentunya akan berefek kepada analisis kelayakan ekonomi dalam jangka panjang [13].

2.6 Sistem Penyimpanan Energi Hibrida Baterai-Superkapasitor pada Mobil Listrik

Dalam pengaplikasian kendaraan listrik, superkapasitor dapat dijadikan salah satu alternatif utama dalam mengkompensasikan kebutuhan daya yang tinggi dalam waktu yang relative singkat. Sehingga, penelitian lebih lanjut dilakukan untuk mengembangkan sistem hibrid baterai superkapasitor atau yang lebih dikenal dengan *Hybrid energy system storage* (HESS). Pengaplikasian HESS dalam kendaraan listrik dapat meningkatkan efisiensi sistem penyimpanan energi kendaraan tersebut, dikarenakan HESS akan menyimpan energi dari pengereman saat proses deselerasi kendaraan listrik.

Adapun salah satu konfigurasi sistem penyimpanan energi hibrida baterai-superkapasitor ditunjukkan oleh Gambar 2.4.



Gambar 2.5 Topologi Sistem Penyimpanan Energi Hibrida Baterai-Superkapasitor pada Mobil Listrik

Pada topologi diatas, baterai dan superkapasitor dipasang secara paralel dan terhubung dengan konverter DC-DC *Dual Input Bidirectional*. Selanjutnya konverter terhubung dengan inverter dan motor. Sistem dikontrol melalui sebuah kontrol unit untuk proses sistem manajemen energi [15].

Salah satu alasan utama tentang mengapa sistem hibrida baterai superkapasitor memiliki efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan sistem biasa adalah dari segi prinsip kerjanya. Secara garis besar, baterai memiliki densitas energi yang jauh lebih besar jika dibandingkan dengan superkapasitor. Namun, keunggulan superkapasitor adalah superkapasitor memiliki densitas daya yang jauh lebih besar, sehingga dalam proses akselerasi kendaraan listrik, superkapasitor akan sangat membantu untuk menghasilkan daya instan [4]. Jika ditinjau dari siklus kerjanya, superkapasitor dapat memiliki siklus kerja diatas satu juta siklus, lebih besar seratus kali jika dibandingkan dengan baterai biasa.

Adapun keuntungan dari sistem penyimpanan energi hibrida baterai-superkapasitor pada mobil listrik diantaranya:

- a. Sifat superkapasitor yang memiliki kerapatan daya yang besar dapat dimanfaatkan untuk menyimpan energi kinetik kendaraan saat proses pengereman (*Regenerative braking*).
- b. Superkapasitor dapat membantu baterai dalam menyediakan kebutuhan daya puncak. Hal ini membantu meningkatkan umur baterai dan meningkatkan kecepatan akselerasi.
- c. Dapat meningkatkan jarak tempuh kendaraan listrik sebagai akibat dari proses *regenerative braking* [16].

2.6.1 Regenerative Braking

Dalam sistem penyimpanan energi hibrida baterai-superkapasitor, energi hasil pengereman kembali dialirkan untuk disimpan dalam superkapasitor. Hal ini dapat dilakukan sebagai akibat dari keuntungan yang dimiliki oleh superkapasitor yang memiliki densitas daya yang besar [16].

Proses *regenerative braking* dapat diamati saat proses mobil dalam proses pengereman atau dalam kondisi jalanan menurun. Pada proses deselerasi ini, motor penggerak akan mengalami percepatan di sisi rotor, walaupun sumber dalam keadaan tidak terhubung. Putaran motor saat kondisi deselerasi ini menghasilkan putaran rotor melebihi putaran sinkronnya. Kondisi ini memerlukan alternatif pengereman mesin pada motor penggerak tersebut. Metode pengereman *regenerative braking* memanfaatkan proses ini sehingga motor penggerak dapat diberlakukan sebagai generator [17].

2.7 Life Cycle Cost (LCC) sebagai Analisis Kelayakan Ekonomi

Life cycle cost (LCC) dapat didefinisikan sebagai biaya total yang dikeluarkan sepanjang masa pakai suatu benda yang terdiri dari persiapan, desain, pembelian, dan biaya lainnya yang berhubungan langsung dengan penggunaan atau kepemilikan aset. LCC merupakan salah satu metode pada proses *Value engineering*, sehingga bisa didapatkan evaluasi terhadap pilihan alternatif yang tersedia, dengan tujuan untuk mendapatkan nilai optimal dari total biaya yang ada [18].

Dalam melakukan analisis LCC, terdapat beberapa hal yang perlu diperhatikan, yaitu [18]:

- Ketersediaan data komponen biaya awal, biaya perbaikan, biaya operasional, biaya pergantian, dan biaya pembuangan.
- Perkiraan masa pakai (umur) dari tiap komponen biaya.
- Perkiraan perkembangan pasar di masa depan, seperti bunga bank, inflasi, maupun resiko.

Harga LCC dapat diperoleh menggunakan persamaan (4.5) dibawah ini [18]:

$$LCC = C_{Int} + C_{O\&M} + C_R - C_S \quad (2.2)$$

Keterangan: LCC : *Life Cycle Cost*
 C_{Int} : *initial Cost*
 $C_{O\&M}$: *Operational and Maintenance Cost*
 C_R : *Replacement Cost*; biaya pergantian
 C_S : *Salvage Cost*; nilai jual kembali.

2.7.1 *Initial Cost*

Initial cost merupakan biaya yang harus dibayar saat sistem dibeli atau dipasang. Dalam hal ini, *initial cost* juga dapat didefinisikan sebagai biaya beli awal sistem penyimpanan energi pada mobil listrik [19].

2.7.2 *Operational and Maintenance Cost*

O&M *Cost* merupakan biaya operasi dan perawatan yang dibutuhkan oleh sistem selama masa pakai dan operasi [19]. Biaya operasi dapat juga dihitung sebagai biaya *charging* dari sebuah kendaraan. Serta biaya perawatan merupakan biaya yang dikeluarkan untuk perawatan sistem agar sistem tetap dapat bekerja dengan baik.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB III

SIMULASI DAN PERHITUNGAN KAPASITAS SISTEM PENYIMPANAN ENERGI PADA KENDARAAN LISTRIK

Bab ini membahas hasil simulasi dan analisis serta proses perhitungan kapasitas sistem penyimpanan energi pada mobil listrik. Dalam Tugas Akhir ini, simulasi dilakukan menggunakan program ADVISOR (*Advanced Vehicle Simulator*) dalam software MatLab/Simulink untuk mendapatkan parameter-parameter yang diperlukan kendaraan dalam sebuah siklus mengemudi (*driving cycle*), seperti konsumsi energi, arus, tegangan, dan lain-lain. Kemudian dilakukan proses perhitungan kapasitas sistem penyimpanan berdasarkan data simulasi yang telah dilakukan sebelumnya.

3.1 Model kendaraan listrik yang digunakan

Dalam Tugas Akhir ini, model kendaraan listrik yang digunakan dalam proses simulasi merupakan Mobil EZZY II produksi Pusat Unggulan Iptek Perguruan Tinggi Sistem Kontrol Otomotif (PUI PT-SKO) Institut Teknologi Sepuluh Nopember. EZZY II merupakan pengembangan dan versi penyempurnaan dari EZZY I. Adapun spesifikasi EZZY II dapat dilihat di Tabel 3.1.



Gambar 3.1 Mobil listrik EZZY ITS II [14]

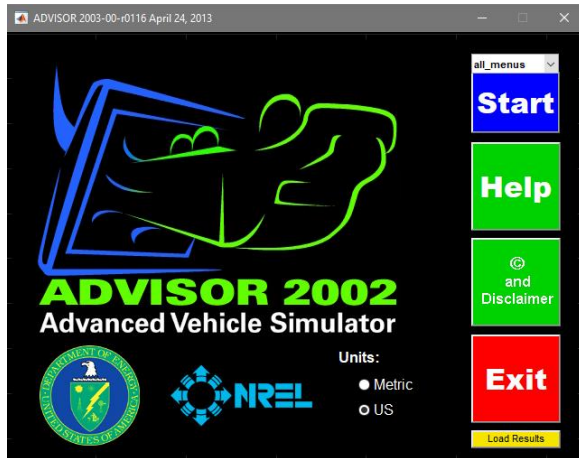
Tabel 3.1 Spesifikasi mobil listrik EZZY ITS II [20]

Tipe	<i>Sporty Hatchback City Car</i>
Kapasitas	4 (Empat) orang
Tahun Pembuatan	2013
Jenis Rangka	Monokok
Suspensi	F/R McPerson Strut
Brake	F/R Disc Brake
Dimensi Roda	F (205/45 R17); R(205/45 R17)
Dimensi Kendaraan	3.750 x 1.760 x 1.350 mm
Jarak Antar Roda	2.300 mm
Berat	1.149 Kg
<i>Ground Clearance</i>	270 mm

3.2 Simulasi Kendaraan Listrik menggunakan Program ADVISOR

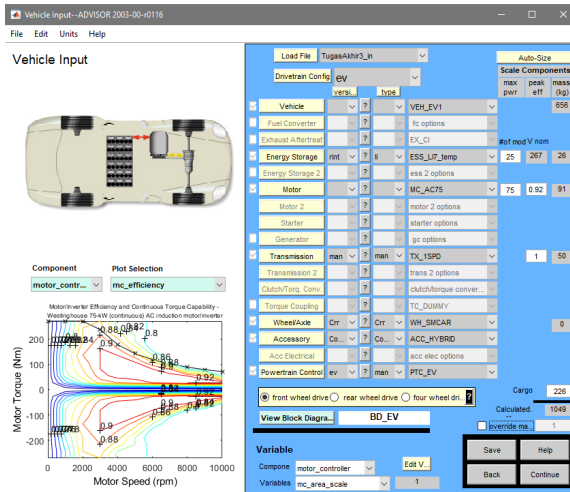
Untuk bisa mengetahui kebutuhan energi dan daya yang diperlukan mobil listrik EZZY ITS II, spesifikasi dari mobil ini dijadikan sebagai parameter dalam melakukan simulasi. Tujuan dari simulasi ini adalah untuk mendapatkan besaran daya, energi, arus, dan hal-hal lain yang dibutuhkan oleh mobil listrik dalam suatu siklus berkendara. Adapun spesifikasi mobil listrik EZZY ITS II sesuai dengan yang ada pada Tabel 3.1.

Simulasi dilakukan menggunakan software MatLab/Simulink R2019b, dalam bentuk naskah kode program, yang diberi nama ADVISOR. ADVISOR dikembangkan oleh Laboratorium Energi Terbarukan Nasional (NREL-*National Renewable Energy Laboratory*) milik kementerian Energi Amerika Serikat. ADVISOR bekerja dengan algoritma yang sudah didesain untuk dapat mensimulasikan performa dari suatu kendaraan listrik.

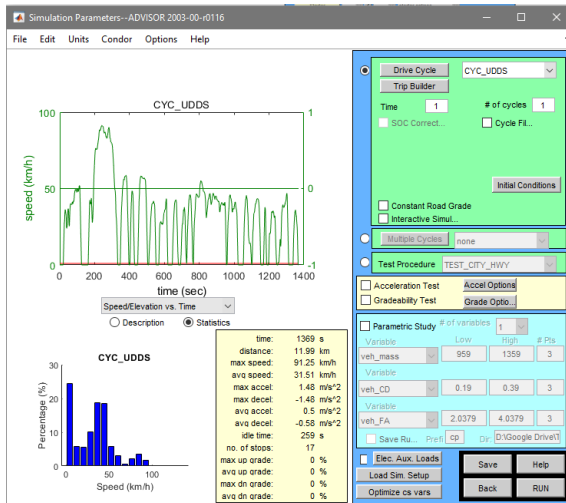


Gambar 3.2 Tampilan awal program ADVISOR di MatLab/Simulink R2019

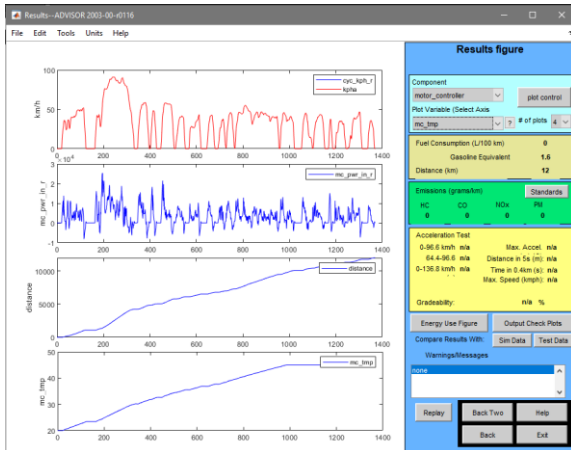
Dalam program ADVISOR, terdapat 2 (dua) halaman masukan (*input*), yaitu halaman masukan spesifikasi/model kendaraan (Gambar 3.3) dan halaman masukan parameter siklus berkendara (Gambar 3.4). Program ADVISOR akan mengeluarkan halaman *output* hasil simulasi dalam bentuk grafik dengan berbagai macam parameter yang dapat ditinjau seperti yang ditampilkan pada Gambar 3.5.



Gambar 3.3 Halaman masukan spesifikasi/model kendaraan pada ADVISOR



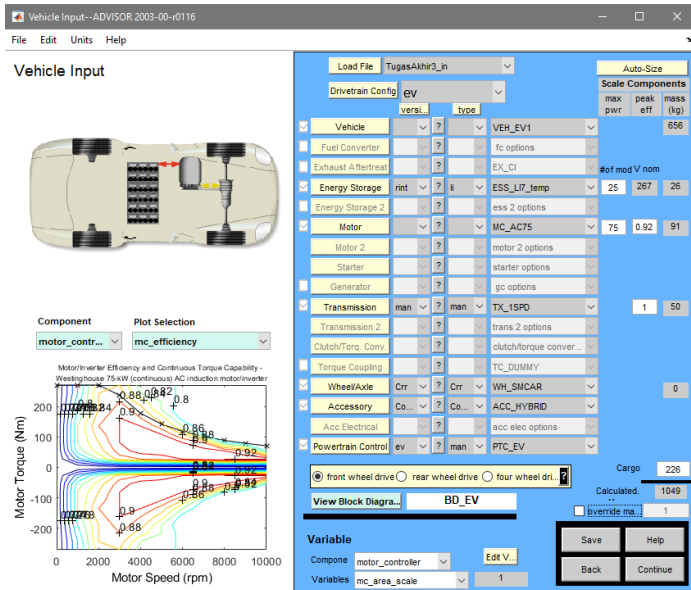
Gambar 3.4 Halaman masukan parameter siklus berkendara simulasi pada ADVISOR



Gambar 3.5 Halaman *output* hasil simulasi menggunakan ADVISOR

3.2.1 Parameter Kendaraan Listrik

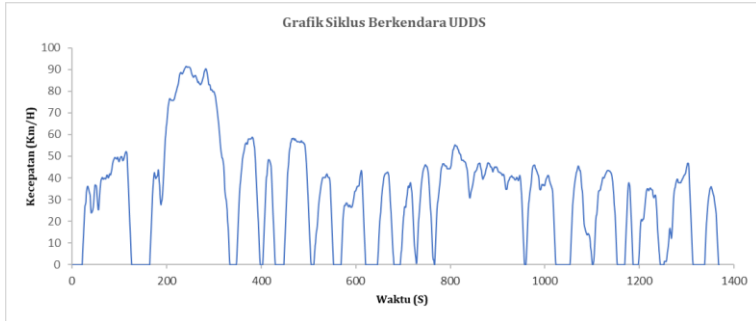
Adapun dalam melakukan simulasi, kendaraan listrik dimodelkan berdasarkan spesifikasi kendaraan listrik EZZY ITS II seperti yang sudah ditampilkan pada Tabel 3.1. Untuk parameter-parameter lainnya yang tidak ada, digunakan asumsi yang sesuai dengan pengaturan *default* pada program ADVISOR. Adapun input model kendaraan dalam melakukan simulasi dapat dilihat pada Gambar 3.6 di bawah ini.



Gambar 3.6 Input model kendaraan listrik dalam simulasi menggunakan program ADVISOR

3.2.2 Siklus Berkendara (*Driving Cycle*)

Proses simulasi menggunakan program ADVISOR mempertimbangkan siklus berkendara yang dialami oleh kendaraan listrik. Adapun dalam Tugas Akhir ini, siklus berkendara yang digunakan adalah siklus berkendara UDDS (*Urban Dynamometer Driving Schedule*). Siklus berkendara UDDS merupakan siklus berkendara yang dibuat oleh Badan Lingkungan Amerika Serikat, untuk keperluan simulasi pengujian kendaraan, dengan jenis FTP (*Federal Test Procedure*) – 72. Adapun grafik dan data dari siklus berkendara UDDS dapat dilihat pada Gambar 3.7 dan Tabel 3.2 berturut-turut.



Gambar 3.7 Grafik siklus berkendara UDSS

Tabel 3.2 Data siklus berkendara UDSS

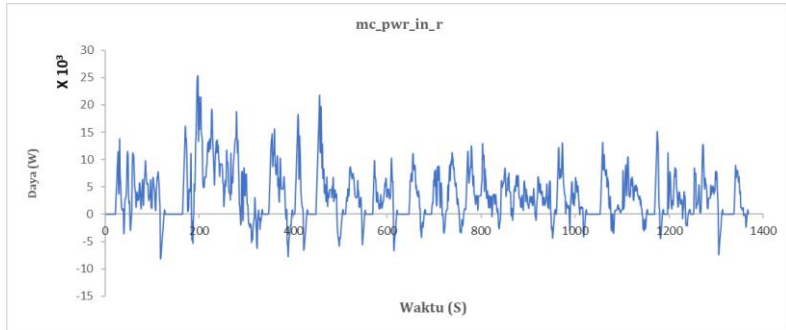
Waktu	1369 det
Jarak Tempuh	11,99 km
Kecepatan Maksimum	91,25 km/j
Kecepatan Rata-rata	31,51 km/j
Akselerasi Maksimum	1,48 m/det ²
Deselerasi Maksimum	-1,48 m/det ²
Akselerasi Rata-rata	0,5 m/det ²
Deselerasi Rata-rata	-0,58 m/det ²
Total waktu berhenti (Idle)	259 det
Jumlah Perhentian	17

3.2.3 Hasil Simulasi

Dalam proses simulasi, parameter-parameter untuk kebutuhan data simulasi disesuaikan agar sedekat mungkin dengan parameter mobil listrik EZZY ITS II di dunia nyata. Proses simulasi ini menghasilkan data konsumsi energi dan daya yang dibutuhkan oleh mobil listrik, serta menghasilkan arus yang mengalir pada sistem penyimpanan energi. Hasil simulasi ini kemudian digunakan sebagai data acuan dalam proses perhitungan kapasitas sistem penyimpanan energi. Sebagai bagian dari proses perhitungan kapasitas sistem penyimpanan energi, hasil simulasi yang diamati adalah daya yang dibutuhkan oleh motor, histori arus yang mengalir pada sistem penyimpanan energi, serta total energi yang

dibutuhkan dalam satu kali siklus berkendara. Hasil simulasi juga akan digunakan sebagai acuan dalam penentuan metode *power sharing* dalam sistem penyimpanan energi hibrida baterai-superkapasitor.

Grafik hasil simulasi daya yang dibutuhkan oleh motor (**mc_pwr_in**) dapat dilihat pada Gambar 3.8.



Gambar 3.8 Grafik daya yang dibutuhkan oleh motor

Berdasarkan Gambar 3.8, terlihat bahwa daya maksimum yang dibutuhkan oleh motor adalah sebesar 25398 W. Nilai daya maksimum ini selanjutnya akan digunakan sebagai acuan dalam penentuan kapasitas baterai dan superkapasitor, serta dalam penentuan metode *power sharing*.

Dari Gambar 3.8 motor pada mobil listrik hasil simulasi membutuhkan energi sebesar 1.259 Wh untuk bisa menempuh satu kali siklus berkendara UDDS. Besar simulasi hasil energi ini akan digunakan sebagai referensi dalam menentukan kapasitas sistem penyimpanan energi yang dibutuhkan oleh mobil listrik.

3.3 Perhitungan Kapasitas Sistem Penyimpanan Energi berdasarkan Simulasi

Dari hasil simulasi yang didapat pada sub-sub bab 3.3.3, pada Gambar 3.6 terlihat bahwa daya maksimum dibutuhkan oleh motor penggerak mobil dalam satu kali siklus berkendara adalah sebesar 25.398 W, dengan total energi yang dibutuhkan adalah sebesar 1.259 Wh seperti yang tertera pada Gambar 3.8.

Dalam melakukan proses *sizing*, agar mendekati seperti pola operasi kendaraan listrik pada kehidupan sehari-hari, maka digunakan

asumsi bahwa dalam satu hari dilakukan 8 (delapan) kali siklus berkendara, dengan total jarak tempuh sepanjang 96 km. Adapun proses *sizing* pada tugas akhir ini mengambil referensi dari penelitian [15].

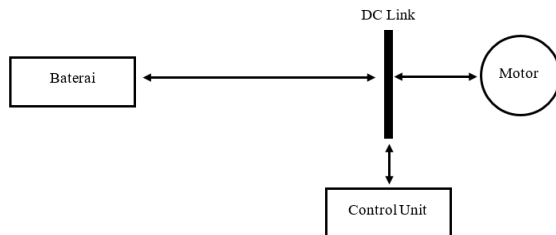
Dalam proses perhitungan kapasitas sistem penyimpanan energi pada kendaraan listrik, jumlah peralatan penyimpan energi yang ada harus mampu memenuhi prinsip *energy balance* dan *power balance*. Prinsip ini pada dasarnya memastikan bahwa peralatan penyimpanan energi yang terpasang dapat memenuhi kebutuhan energi dari kendaraan listrik, serta dapat memenuhi kebutuhan daya pada saat *charging* dan *discharging*. Perhitungan kapasitas sistem pada bagian selanjutnya mempertimbangkan prinsip *energy balance* dan *power balance* sebagai aspek yang cukup penting dalam perhitungan kapasitas sistem penyimpanan energi.

3.3.1 Perhitungan Kapasitas Sistem Penyimpanan Energi Baterai-saja pada Mobil Listrik

3.3.1.1 Topologi Sistem Penyimpanan Energi Baterai-saja pada Mobil Listrik

Dalam melakukan proses perhitungan kapasitas sistem penyimpanan energi pada kendaraan listrik, terlebih dahulu harus mengetahui topologi sistem penyimpanan energi yang dibutuhkan. Hal ini dimaksudkan agar proses *sizing* dapat sesuai dengan spesifikasi topologi yang ada.

Topologi sistem penyimpanan energi baterai-saja yang digunakan pada Tugas Akhir ini dapat dilihat pada Gambar 3.9.



Gambar 3.9 Topologi sistem penyimpanan energi baterai-saja pada mobil listrik

Pada topologi yang ditunjukkan pada Gambar 3.8, baterai terhubung ke motor melalui DC link. Pada kondisi asli, terminal baterai

juga dihubungkan secara parallel ke converter DC-DC untuk bisa menyuplai beban aksesoris pada kendaraan listrik, namun dalam Tugas Akhir ini, konfigurasi ini diabaikan. Adapun daya yang mengalir dikontrol oleh sebuah unit kontrol sistem penyimpanan energi pada mobil listrik.

3.3.1.2 Penentuan Kapasitas Baterai

Dalam topologi sistem yang ditampilkan pada Gambar 3.8, motor bekerja pada tegangan 380 V. Kondisi ini merujuk kepada kondisi nyata yang ada pada kendaraan listrik Ezzy ITS II. Motor yang digunakan merupakan hasil rakitan manual dari tim PUI-SKO ITS. Jumlah baterai yang dipasang secara seri harus sesuai dengan tegangan motor. Dalam tugas akhir ini, model baterai yang dipilih adalah baterai jenis *high energy* Saft VL 34570 xlr [21] dengan tegangan nominal 3,65 V. Adapun ringkasan spesifikasi dari satu sel baterai Saft VL 34570 xlr dapat dilihat pada Tabel 3.3 di bawah ini.

Tabel 3.3 Spesifikasi baterai *high energy* Saft VL 34570 xlr [21]

Kapasitas	5,4 Ah
Tegangan Nominal	3,65 V
Energi Nominal	19,7 Wh
Arus <i>Discharge</i> Maksimum	11 A (Continuous) 21 A (Pulse)
Tegangan <i>Charging</i>	4,2 V ± 0,05 V
Arus <i>Charging</i> Maksimum (Continuous)	5,4 A
Berat	~ 130 g
Diameter x Tinggi	(34,20 x 59,43) mm ²

Agar dapat menyamai tegangan DC link dan tegangan motor, maka jumlah baterai yang dipasang secara seri adalah:

$$N_{bs} = \frac{V_{Motor}}{V_{bunit}} \quad (3.1)$$

$$N_{bs} = \frac{380 V}{3.65 V}$$

$$N_{bs} = \sim 105$$

Jumlah baterai yang harus dipasang secara seri (N_{bs}) agar dapat memiliki tegangan yang sama dengan motor adalah sebanyak 105 cell baterai yang menghasilkan tegangan sebesar 383,25 V.

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, bahwa proses *sizing* harus memenuhi prinsip *energy balance* dan *power balance*. Adapun analisis *energy balance* dan *power balance* dapat dilihat di bagian berikutnya.

Energy Balance Baterai Sistem Baterai-saja

Dalam praktiknya, media penyimpanan energi seperti baterai dan superkapasitor memiliki suatu karakteristik yang disebut sebagai *Depth of discharge* (DoD) atau kelaman *discharge*. Nilai DoD merepresentasikan seberapa besar kapasitas baterai yang bisa dipakai [22]. Nilai DoD 80% merepresentasikan bahwa baterai tersebut hanya bisa digunakan hingga kapasitasnya tinggal 20%, hingga kemudian harus diisi kembali.

Dalam Tugas Akhir ini, nilai DoD untuk baterai diasumsikan sebesar 80%. Sehingga nilai kebutuhan energi mobil listrik (E_{Total}) harus dibagi dengan nilai DoD agar mendapatkan nilai acuan *sizing* yang sebenarnya. Adapun perhitungan nilai kebutuhan energi total dengan mempertimbangkan DoD dapat dilakukan melalui persamaan (3.1) di bawah ini:

$$E_{Total} = \frac{E_0}{DoD} \quad (3.1)$$

Keterangan: E_{Total} : Energi total yang dibutuhkan
 E_0 : Energi sebelumnya
 DoD : *Depth of Discharge*

Sehingga, besar energi total yang dibutuhkan oleh mobil listrik adalah:

$$E_{Total} = \frac{1.259 Wh}{80\%}$$

$$E_{Total} = 1.573 Wh$$

Sesuai dengan asumsi yang diberikan sebelumnya, bahwa dalam satu hari dilakukan 8 (delapan) kali siklus berkendara dengan total jarak ± 96 km, maka nilai E_{Total} mobil listrik untuk satu hari adalah sebesar $\sim 12,585$ kWh.

Berdasarkan spesifikasi baterai pada Tabel 3.3, satu sel baterai Saft VL 34570 xlr memiliki kapasitas penyimpanan energi sebesar 19,7 Wh. Berdasarkan hasil perhitungan sebelumnya, untuk bisa menyediakan tegangan sebesar 380 V, maka dibutuhkan 105 sel baterai dalam konfigurasi seri (satu string). Sehingga total energi untuk satu string baterai adalah:

$$E_{bs} = N_{bs} \times E_{bc} \quad (3.2)$$

Keterangan: E_{bs} : Total energi satu string
 N_{bs} : Jumlah baterai dalam satu string
 E_{bc} : Besar energi per sel baterai

Sehingga, dengan menggunakan persamaan (3.2), total energi yang dapat dihasilkan oleh satu string adalah:

$$E_{bs} = 105 \times 19,7 \text{ Wh}$$

$$E_{bs} = 2.068,5 \text{ Wh}$$

Kebutuhan energi total yang dibutuhkan oleh mobil listrik adalah sebesar 12.585 Wh. Sehingga jumlah string yang harus dimiliki oleh sistem untuk bisa mengakomodir kebutuhan energi ini adalah:

$$N_{bp} = \frac{12.585 \text{ Wh}}{2.068,5 \text{ Wh}}$$

$$N_{bp} = 6,084$$

Terlihat dari hasil perhitungan diatas maka dibutuhkan 6 (enam) string (parallel) dengan tambahan 9 (Sembilan) baterai untuk bisa memenuhi kebutuhan energi mobil listrik ini.

Power Balance Baterai Sistem Baterai-saja

Sebagai bagian dari validasi untuk memastikan apakah sistem mampu menyediakan daya yang dibutuhkan, maka perlu dilakukan analisa *power balance* terhadap sistem yang diajukan.

Dalam melakukan perhitungan dan analisa *power balance*, besaran yang harus diperhatikan adalah kebutuhan daya saat proses *discharging* dan kemampuan *charging* yang dibutuhkan. Berdasarkan hasil simulasi, kebutuhan daya *discharging* dan *charging* berturut-turut adalah 25.398 W dan 8.179 W.

Berdasarkan *datasheet* [21], baterai VL 34570 xlr memiliki arus *discharge pulse* maksimum ($I_{disch_max_pulse}$) sebesar 21 A. Besaran ini memiliki nilai yang sama untuk satu string. Sesuai dengan hasil konfigurasi diparalel 6 (enam), maka arus *discharge pulse* maksimum menjadi 126 A. Jadi, dengan menggunakan asumsi tegangan konstan sebesar 383,25 V, maka besar daya *discharge* maksimum yang mampu dihasilkan adalah:

$$P_{disch_max_pulse} = V_b \times I_{disch_max_pulse} \quad (3.3)$$

$$P_{disch_max_pulse} = 383,25 V \times 126 A$$

$$P_{disch_max_pulse} = 48.289,5 W$$

Mengingat kebutuhan daya *discharge* maksimum adalah sebesar 25.298 W, maka kebutuhan daya *discharge* terpenuhi.

Kemampuan daya *charging* maksimum yang dibutuhkan adalah sebesar 8.179 W berdasarkan hasil simulasi pada sub-sub-bab 3.3.3. berdasarkan *datasheet* [21], baterai Saft VL 34570 xlr memiliki kemampuan arus *charging continous* maksimum ($I_{char_max_cont}$) sebesar 5,4 A dengan tegangan *charging* (V_{Char}) 4,2 V. Sehingga kemampuan daya *charging*-nya adalah:

$$P_{char_max_cont} = V_b \times I_{char_max_cont} \quad (3.4)$$

$$P_{char_max_cont} = 383,25 V \times 32,4 A$$

$$P_{char_max_cont} = 12.417,3 W$$

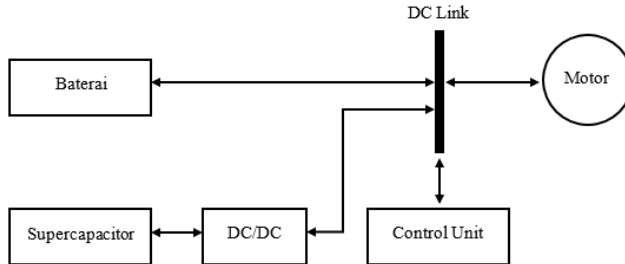
Berdasarkan hasil perhitungan dan analisa *power balance*, maka dapat disimpulkan konfigurasi 105 sel baterai seri diparalel 6 (enam) dapat memenuhi kebutuhan daya yang dibutuhkan oleh mobil listrik dengan total jumlah baterai adalah 639 baterai yang mampu menyimpan energi sebesar 12.5888,3 Wh.

3.3.2 Perhitungan Kapasitas Sistem Penyimpanan Energi Hibrida Baterai-Superkapasitor pada Mobil Listrik

3.3.2.1 Topologi Sistem Penyimpanan Energi Hibrida Baterai-Superkapasitor pada Mobil Listrik

Topologi sistem penyimpanan energi hibrida baterai-superkapasitor yang digunakan dalam Tugas Akhir ini terdiri dari baterai, superkapasitor, konverter DC/DC bidireksional, motor, dan unit kontrol.

Topologi yang dipilih pada Tugas Akhir ini merupakan pengembangan dari topologi tipikal yang ada pada mobil listrik Ezzy ITS II. Adapun topologi sistem penyimpanan energi hibrida baterai-superkapasitor yang digunakan pada Tugas Akhir ini dapat dilihat pada Gambar 3.8.



Gambar 3.8 Topologi sistem penyimpanan energi hibrida baterai-superkapasitor pada mobil listrik

3.3.2.2 Metode Pembagian Daya (*Power Sharing Method*)

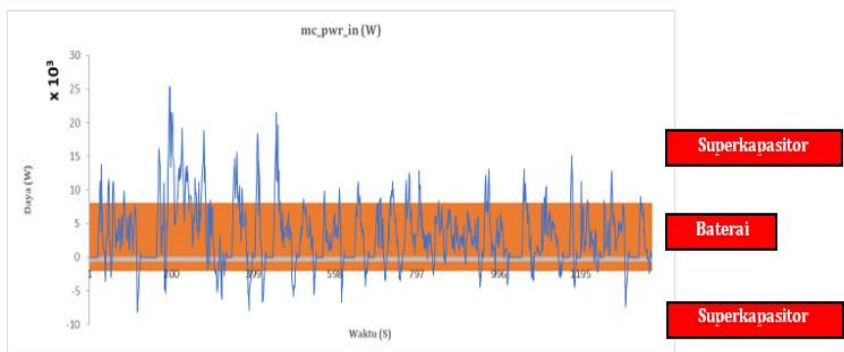
Kinerja baterai sangat dipengaruhi oleh proses *charge/discharge* maksimum yang dialami, arus puncak baterai, dan temperatur operasi [15]. Oleh karena itu, superkapasitor dalam konfigurasi hibrida baterai-superkapasitor juga berperan untuk meng-kompensasi arus yang tinggi pada baterai ini.

Untuk bisa mengatasi pembagian daya antara baterai dan superkapasitor, maka dibutuhkan metode pembagian daya antar keduanya. Metode pembagian daya ini juga diperlukan karena mempertimbangkan aspek pengereman regeneratif pada mobil listrik, sehingga superkapasitor dapat mengambil energi dari hasil pengereman regeneratif.

Adapun metode pembagian daya yang digunakan adalah sebagai berikut [15]:

- Jika P_{dmd} (*Power Demand*) $< P_{min_low}$: Superkapasitor menerima seluruh daya pada proses pengereman regeneratif.
- Jika $P_{dmd} < P_{min_high}$ (*Power Minimum*): Superkapasitor akan menyalurkan daya ke motor (terjadi proses *discharging* oleh superkapasitor ke motor).
- Jika $P_{min_low} < P_{dmd} < P_{min_high}$: Baterai akan menyuplai daya ke motor (proses *discharging* oleh baterai).

Dalam tugas akhir ini, nilai batas bawah P_{min_low} dan batas atas P_{min_high} yang digunakan adalah $P_{min_low} = -2.000$ W, dan $P_{min_high} = 8.000$ W. Ini berarti bahwa baterai hanya akan menyuplai daya hingga dalam rentang kebutuhan daya -2000 W hingga 10.000 W, kebutuhan daya diluar nilai tersebut akan disuplai oleh superkapasitor. Nilai negatif disini merujuk kepada proses *charging* sebagai akibat adanya proses *regenerative braking*. Adapun ilustrasi metode pembagian daya dapat dilihat pada Gambar 3.9 dibawah ini.



Gambar 3.9 Metode pembagian daya antara baterai dan superkapasitor

Metode pembagian daya ini akan memberikan validasi yang lebih mendalam tentang kelayakan ekonomi dari sistem hibrida baterai-superkapasitor.

3.3.2.3 Penentuan Kapasitas Baterai

Seperti yang telah ditampilkan pada Gambar 3.8 dan Gambar 3.9, terlihat bahwa kedua topologi sistem memiliki persamaan pada besar tegangan yang harus disediakan oleh baterai. Oleh karena itu, sesuai dengan perhitungan pada sub sub bab 3.4.1.2, jumlah baterai yang dipasang secara seri memiliki jumlah yang sama, yaitu sebesar 105 cell.

Selanjutnya, *sizing* jumlah baterai pada konfigurasi hibrida baterai-superkapasitor juga harus memenuhi prinsip *energy balance* dan *power balance*.

Energy Balance Baterai Sistem Hibrida

Sesuai dengan metode pembagian daya yang telah dijelaskan pada sub sub bab 3.4.2.2, maka baterai diatur untuk menyalurkan daya dalam rentang -2.000 W hingga 8.000 W. Jadi, baterai hanya perlu menyediakan energi sebesar sebesar 1.112 Wh.

Sesuai dengan pertimbangan DoD 80% seperti yang sudah dijelaskan pada sub-sub-bab 3.4.1.2, maka, menggunakan persamaan (3.1) total energi yang dibutuhkan baterai pada konfigurasi sistem hibrida baterai-superkapasitor adalah:

$$E_{Total} = \frac{1.112 \text{ Wh}}{80\%}$$

$$E_{Total} = 1.390 \text{ Wh}$$

Sesuai dengan asumsi yang diberikan sebelumnya, bahwa dalam satu hari dilakukan 8 (delapan) kali siklus berkendara dengan total jarak ± 96 km, maka nilai E_{Total} mobil listrik untuk satu hari adalah sebesar ~ 11.118 Wh.

Mengingat topologi yang digunakan memiliki permintaan tegangan yang sama, yaitu 380 V, maka jumlah sel baterai dalam satu string memiliki jumlah yang sama dengan konfigurasi baterai saja, yakni sebesar 105 sel. Sehingga, besar energi dalam satu string juga memiliki nilai yang sama, sebesar 2.068,5 Wh.

Kebutuhan energi baterai yang dibutuhkan oleh mobil listrik pada konfigurasi hibrida baterai-superkapasitor adalah sebesar 11.118 Wh. Sehingga jumlah string yang harus dimiliki oleh sistem untuk bisa mengakomodir kebutuhan energi ini adalah:

$$N_{bp} = \frac{11.118 \text{ Wh}}{2.068,5 \text{ Wh}}$$

$$N_{bp} = 5,37$$

Terlihat dari hasil perhitungan diatas maka dibutuhkan 5 (lima) string (paralel) dengan tambahan 40 sel baterai untuk bisa memenuhi kebutuhan energi mobil listrik ini.

Power Balance Baterai Sistem Baterai-saja

Kebutuhan daya puncak *discharging* dan *charging* baterai pada sistem hibrida baterai-superkapasitor berturut-turut adalah sebesar 8.000 W dan -2.000 W. Nilai ini diambil sesuai dengan metode pembagian daya yang telah dijelaskan sebelumnya.

Sebagai bagian dari validasi untuk memastikan apakah sistem mampu menyediakan daya yang dibutuhkan, maka perlu dilakukan analisa *power balance* terhadap sistem yang diajukan.

Berdasarkan *datasheet* [21], baterai VL 34570 xlr memiliki arus *discharge pulse* maksimum ($I_{disch_max_pulse}$) sebesar 21 A. Besaran ini memiliki nilai yang sama untuk satu string. Sesuai dengan hasil sebelumnya, satu string baterai diparalel menjadi 5 (lima), maka arus *discharge pulse* maksimum menjadi 105 A. Jadi, dengan menggunakan asumsi tegangan konstan sebesar 383,25 V dan menggunakan persamaan (3.3) maka besar daya *discharge* maksimum yang mampu dihasilkan adalah:

$$P_{disch_max_pulse} = 383,25 \text{ V} \times 105 \text{ A}$$

$$P_{disch_max_pulse} = 40.241,25 \text{ W}$$

Mengingat kebutuhan daya *discharge* maksimum adalah sebesar 8.000 W, maka kebutuhan daya *discharge* telah terpenuhi.

Kemampuan daya *charging* maksimum yang dibutuhkan adalah sebesar 2.000 W berdasarkan hasil simulasi dan metode pembagian daya pada sub-sub-bab 3.4.2.2. Berdasarkan *datasheet* [21], baterai Saft VL

34570 xlr memiliki kemampuan arus *charging continous* maksimum ($I_{char_max_cont}$) sebesar 5,4 A dengan tegangan *charging* (V_{Char}) 4,2 V. Sehingga kemampuan daya *charging*-nya dalam konfigurasi diparalel 5 (lima) sesuai dengan persamaan (3.4) adalah:

$$P_{char_max_cont} = 383,25 V \times 27A$$

$$P_{char_max_cont} = 10.347,75 W$$

Berdasarkan hasil perhitungan dan analisa *power balance*, maka dapat disimpulkan konfigurasi 105 sel baterai seri diparalel 5 (enam) dapat memenuhi kebutuhan daya yang dibutuhkan oleh mobil listrik dengan total jumlah baterai sebanyak 565 baterai yang mampu menyimpan energi sebesar 11.130,5 Wh.

3.3.2.4 Penentuan Kapasitas Superkapasitor

Sesuai dengan metode pembagian daya yang telah dijelaskan pada sub-sub-bab 3.4.2.2, superkapasitor bertugas menyuplai daya diatas 8.000 W, dan menerima daya hasil *regenerative braking* yang lebih besar dari 2.000 W.

Dalam penentuan kapasitas superkapasitor, penulis memilih superkapasitor dengan merk dan model Maxwell BMOD0165 P048 C01 dengan tegangan kerja maksimum berada pada nilai 51 V [23]. Pemilihan superkapasitor sudah sesuai dengan topologi sistem yang diajukan dan sudah berdasarkan tegangan kerja yang dimiliki oleh converter DC-DC. Konverter DC-DC yang digunakan sebagai acuan dalam Tugas Akhir ini adalah Brusa BDC546 DC-DC *Converter* [24]. Brusa BDC546 memiliki efisiensi sebesar 98,9% [24], sehingga kebutuhan energi pada superkapasitor harus mempertimbangkan faktor efisiensi ini.

Berdasarkan metode pembagian daya pada sub-sub-bab 3.4.2.2, maka superkapasitor harus menyediakan energi sebesar 527.978 Ws. Dengan pertimbangan efisiensi konverter DC-DC 98,9%, maka energi yang harus disediakan oleh superkapasitor adalah 533.850,4 Ws

Superkapasitor Maxwell BMOD0165 P048 C01 memiliki kapasitas penyimpanan energi sebesar 53 Wh dengan kapasitansi sebesar 165 F – 198 F. Jumlah superkapasitor yang dipasang harus mampu memenuhi kebutuhan energi yang dibutuhkan oleh mobil listrik. Oleh karena itu, syarat yang harus dipenuhi oleh superkapasitor adalah [15]:

$$E_{sc} = 0.5 * Cap * (V_{max, sc}^2 - V_{min, sc}^2) > E_{total, sc} \quad (3.2)$$

Keterangan: E_{sc} : Energi yang harus disediakan superkapasitor
 Cap : Kapasitansi superkapasitor
 $V_{max, sc}$: Tegangan maksimum superkapasitor
 $V_{min, sc}$: Tegangan minimum superkapasitor
 $E_{total, sc}$: Energi total yang dibutuhkan mobil listrik dari superkapasitor

Substitusi nilai V_{max} , dan V_{min} superkapasitor yang didapat dari *datasheet* [23] ke persamaan (3.2), maka:

$$E_{sc} = 0.5 * Cap * (V_{max, sc}^2 - V_{min, sc}^2) > 533.850,4 \text{ } Ws$$

$$0.5 * Cap * (51^2 - 26^2) > 533.850,4 \text{ } Ws$$

$$Cap > 554,6 \text{ } F$$

Superkapasitor Maxwell BMOD0165 P048 C01 memiliki kapasitansi maksimum sebesar 198 F. Sehingga untuk bisa memenuhi syarat diatas, dibutuhkan 3 (tiga) modul Superkapasitor Maxwell BMOD0165 P048 C01 dalam konfigurasi paralel, dengan total kapasitansi maksimum sebesar 594 F.

3.4 Rekapitulasi Hasil Perhitungan Kapasitas Sistem Penyimpanan Energi pada Mobil Listrik

Adapun hasil dari proses perhitungan kapasitas sistem penyimpanan energi untuk sistem baterai-saja dan sistem hibrida baterai-superkapasitor dapat dilihat pada Tabel 3.4 dan Tabel 3.5 berturut-turut dibawah ini.

Tabel 3.4 Rekapitulasi Hasil Proses *Sizing* Sistem Penyimpanan Energi Baterai-Saja pada Mobil Listrik.

Spesifikasi	Baterai
Model/Merk	Saft VL34570 xlr Rechargeable Li-ion Cell
Jumlah	639 (105 seri diparalel 6)
Tegangan	383,25 V (3.65 V/Cell)
Kapasitas (Ah)	33 Ah
Energi Tersimpan	12,588 kWh
Bobot	83 Kg
Harga	Rp76.680.000, - (Rp120.000, - /Cell)

Berdasarkan Tabel 3.4 terlihat bahwa jumlah sel baterai yang dibutuhkan pada konfigurasi sistem penyimpanan energi baterai saja adalah sebanyak 639 sel baterai dengan konfigurasi 105 diparalel 6 (enam). Jumlah ini mempengaruhi kapasitas penyimpanan energi dan bobot secara keseluruhan. Adapun harga satu sel baterai Saft VL34579 xlr adalah Rp120.000 [25] dengan total bobot sistem baterai-saja adalah 83 Kg.

Perbedaan bobot antara kedua sistem akan mempengaruhi konsumsi energi mobil listrik. Hal ini dikarenakan semakin besar bobot kendaraan maka akan dibutuhkan semakin banyak energi pula untuk bisa menggerakkan mobil listrik. Tugas Akhir ini tidak membahas efek perubahan bobot kendaraan dalam perhitungan konsumsi energi dan analisis kelayakan ekonomi.

Tabel 3.5 Rekapitulasi Hasil Proses *Sizing* Sistem Penyimpanan Energi Hibrida Baterai-Superkapasitor pada Mobil Listrik.

Spesifikasi	Baterai	Superkapasitor	Konverter
Model/Merk	Saft VL34570 xlr Rechargeable Li-ion Cell	Maxwell BMOD0165 P048 C01	Brusa BDC546 DC-DC Converter
Jumlah	565 (105 seri diparalel 5)	3 (paralel)	1
Tegangan	383,25 V (3.65 V/Cell)	48 V	[50-600, 150-750] V
Kapasitas (Ah)	24 Ah	-	-
Energi Tersimpan	11,3 kWh	53 Wh	-
Bobot	60,45 Kg	42,6 Kg	25,2 Kg
Harga	Rp55.800.000 (Rp120.000 /Cell)	Rp41.826.000 (Rp13.942.000 /Modul)	Rp10.000.000

Berdasarkan Tabel 3.5 terlihat bahwa jumlah baterai yang dibutuhkan mengalami penurunan. Hal ini sebagai akibat dari konfigurasi sistem hibrida baterai-superkapasitor, sebagai akibat dari superkapasitor yang mengkompensasi sebagian daya baterai. Pada konfigurasi hibrida baterai-superkapasitor, jumlah modul superkapasitor yang dibutuhkan adalah 3 (tiga) modul yang di paralel dengan total bobot sebesar 42,6 Kg. Seperti topologi sistem penyimpanan energi hibrida baterai-superkapasitor yang telah dijelaskan pada sub-sub-sub-bab 3.4.2.1, sistem hibrida membutuhkan konverter DC-DC. Hal ini akan berpengaruh kepada analisis kelayakan ekonomi sistem dan berat sistem secara keseluruhan.

Adapun harga satu modul superkapasitor adalah \$995.00 = Rp13.942.000 (konversi \$1 = Rp14.011,80 tanggal 7 Juni 2020) [26]. Penulis mengalami kesulitan untuk mendapatkan harga konverter DC-DC Brusa BDC546 di pasaran, oleh karena itu diambil harga produk dengan spesifikasi yang kurang lebih sama, yaitu sebesar Rp10.000.000 [27].

3.5 Perhitungan Analisis Kelayakan Ekonomi

3.5.1 *Operational and Maintenance Cost*

O&M *Cost* merupakan biaya operasi dan perawatan yang dibutuhkan oleh sistem selama masa pakai dan operasi [19]. Biaya operasi dapat juga dihitung sebagai biaya *charging* dari sebuah kendaraan. Serta biaya perawatan merupakan biaya yang dikeluarkan untuk perawatan sistem agar sistem tetap dapat bekerja dengan baik. Merujuk kepada laporan [29], komponen biaya O&M untuk sistem penyimpanan energi terdiri dari *fixed cost* dan *variable cost*.

Fixed cost merupakan biaya tetap yang harus dibayarkan per-tahunnya, sedangkan *variable cost* merupakan biaya yang dapat berubah-ubah sesuai dengan jumlah energi yang digunakan. Biaya *fixed cost* diambil dari kapasitas motor pada mobil Ezzy ITS II yang digunakan, yaitu 30 kW, dan *variable cost* diambil dari kapasitas sistem penyimpanan energi yang ada. Biaya O&M merupakan hasil tambah antara *fixed cost* dan *variable cost* seperti diilustrasikan pada persamaan (3.3) dibawah ini.

$$C_{O\&M} = C_{fixed} + C_{variable} \quad (3.3)$$

Keterangan: $C_{O\&M}$: *Operational and Maintenance Cost*
 C_{fixed} : *Fixed cost*
 $C_{variable}$: *Variable cost*

Berdasarkan laporan *Pacific Northwest National Laboratory* dari Kementerian Energi Amerika Serikat [29], biaya O&M untuk baterai terdiri atas *fixed cost* sebesar \$10 /kW-tahun = Rp140.118/kW-tahun *variable cost* sebesar \$0,0003 /kWh = Rp42 /kWh. (Konversi \$1 = Rp14.011,80 tanggal 7 Juni 2020).

Untuk superkapasitor, biaya O&M terdiri atas *fixed cost* sebesar \$1 /kW-tahun = Rp14.011/kW-tahun *variable cost* sebesar \$0,0003 /kWh = Rp42 /kWh. (Konversi \$1 = Rp14.011,80 tanggal 7 Juni 2020).

3.5.2 *Replacement Cost*

Replacement cost (C_R) merupakan biaya penggantian dan perubahan fungsi suatu benda. Dalam Tugas Akhir ini, C_R merupakan biaya penggantian baterai yang dibutuhkan. Menurut penelitian dari BloombergNEF [31], harga baterai Li-ion mengalami depresiasi rata-rata

sebesar 20% dari tahun 2010 hingga tahun 2018. Sehingga setiap tahunnya, harga baterai menjadi lebih murah dibandingkan tahun sebelumnya.

Adapun nilai *Replacement cost* baterai untuk tahun ke-1 dicari menggunakan persamaan (3.4) berikut ini:

$$C_R = [(1 - dr) \times C_{Batt (n-1)}] \times (1 + i) \quad (3.4)$$

Keterangan: dr : Tingkat Depresiasi
 i : Inflasi

Dalam menghitung nilai *replacement cost*, juga dipertimbangkan faktor tingkat inflasi. Merujuk kepada data di situs web Bank Indonesia [30], tingkat inflasi Indonesia berada diantara 3-5% per tahun. Sehingga dalam Tugas Akhir ini tingkat inflasi yang digunakan adalah sebesar 4%.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini membahas hasil simulasi dan analisis kelayakan ekonomi dari sistem penyimpanan energi baterai-saja dan sistem penyimpanan energi hibrida baterai-superkapasitor pada mobil listrik. Perbandingan dilakukan dengan membandingkan kedua jenis sistem penyimpanan energi tersebut dengan mempertimbangkan aspek kapasitas sistem penyimpanan, karakteristik arus, daya, dan *lifetime*, yang kemudian diinterpretasikan dalam bentuk analisis kelayakan ekonomi. Sebagai catatan, dalam Tugas Akhir ini, perhitungan analisis kelayakan ekonomi dilakukan hanya untuk sistem penyimpanan energi saja. Sehingga, parameter-parameter lainnya seperti biaya beli kendaraan, biaya converter, roda, dan lain-lain tidak menjadi pertimbangan dalam tugas akhir ini.

Energi dan daya yang dibutuhkan oleh mobil listrik disimulasikan menggunakan parameter-parameter yang sesuai dengan spesifikasi mobil listrik Ezzy ITS II.

4.1 Perbandingan Kinerja antara Sistem Penyimpanan Energi Baterai-saja dan Sistem Penyimpanan Energi Hibrida Baterai-Superkapasitor

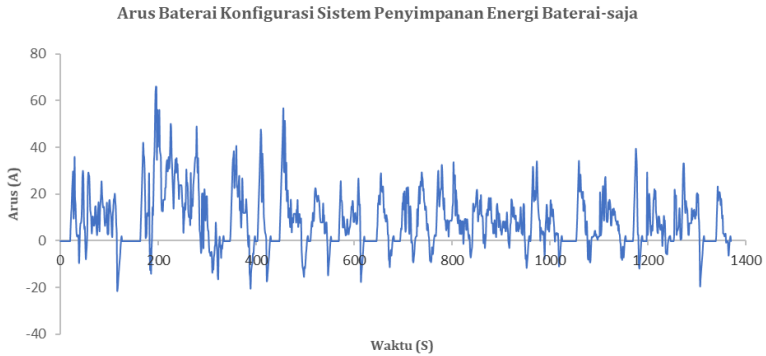
Dalam sub-bab ini akan dibandingkan karakteristik arus yang mengalir di baterai antara konfigurasi sistem penyimpanan energi baterai-saja dan sistem penyimpanan energi hibrida baterai-superkapasitor serta membandingkan konfigurasi fisik dari kedua sistem. Perbandingan ini dilakukan untuk dapat melihat efek adanya superkapasitor dalam sistem penyimpanan energi pada mobil listrik.

4.1.1 Karakteristik Arus

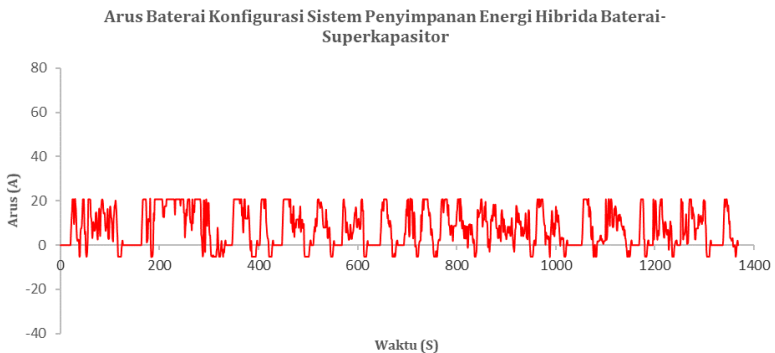
Dalam sub sub-bab ini akan dibandingkan karakteristik arus dua sistem penyimpanan energi, yaitu sistem penyimpanan energi baterai-saja dan sistem penyimpanan energi hibrida baterai-superkapasitor. Simulasi dilakukan berdasarkan parameter yang telah ditentukan sebelumnya pada sub-bab 3.3.

Salah satu tujuan utama dari penggunaan konfigurasi hibrida baterai-superkapasitor pada mobil listrik adalah untuk mengurangi besar

arus yang mengalir di baterai, dengan tujuan untuk mengurangi biaya pembelian baterai dan meningkatkan efisiensi [5]. Gambar 4.1 menunjukkan histori arus baterai pada sistem penyimpanan energi baterai-saja, serta Gambar 4.2 menunjukkan histori arus baterai pada sistem penyimpanan energi hibrida baterai-superkapasitor.

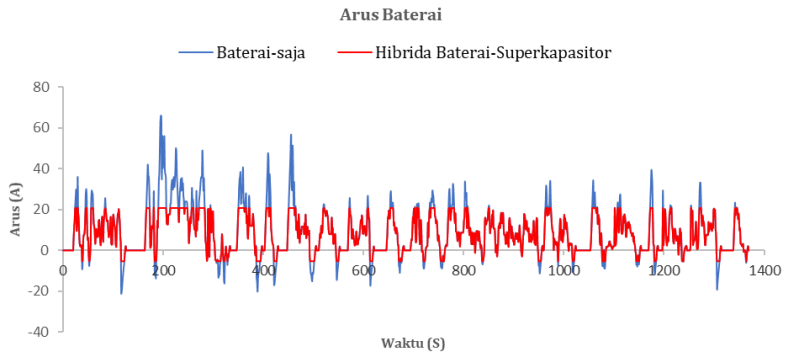


Gambar 4.1 Grafik arus baterai konfigurasi sistem penyimpanan energi baterai saja



Gambar 4.2 Grafik arus baterai konfigurasi sistem penyimpanan energi hibrida baterai-superkapasitor

Dari Gambar 4.1 dan Gambar 4.2 terlihat bahwa arus baterai pada konfigurasi sistem hibrida batara-superkapasitor memiliki nilai puncak yang lebih rendah dibandingkan dengan sistem penyimpanan energi baterai saja. Besar arus puncak baterai pada sistem baterai-saja berada pada nilai 66 A, sedangkan pada konfigurasi sistem hibrida baterai-superkapasitor, besar arus puncak baterai berada pada nilai 21 A. Adapun perbandingan arus dalam kedua konfigurasi dapat dilihat pada Gambar 4.3.



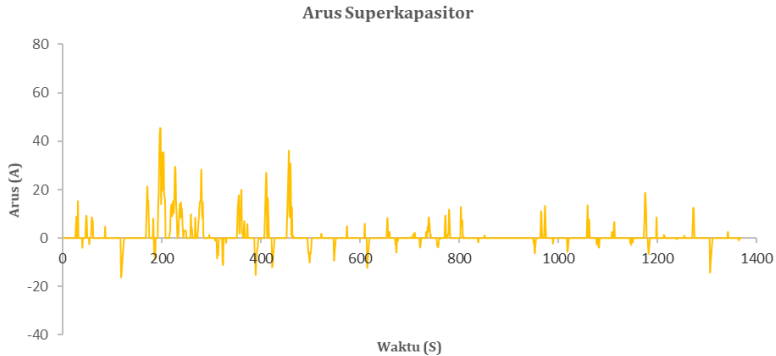
Gambar 4.3 Grafik perbandingan arus baterai antara sistem penyimpanan enegi baterai-saja dan sistem penyimpanan energi hibrida baterai-superkapasitor

Ketika superkapasitor ditambahkan ke sistem penyimpanan energi, terlihat jelas dari Gambar 4.3 bahwa arus puncak baterai mengalami penurunan yang cukup signifikan, yaitu dari 66 A menjadi 21 A. Terjadi penurunan arus puncak *discharging* dan *charging* berturut-turut pada baterai sebesar 68,2% dan 77% dibandingkan pada saat konfigurasi sistem penyimpanan baterai-saja. Dengan turunnya arus puncak pada baterai serta histori nilai arus yang lebih rendah dibandingkan pada konfigurasi sistem baterai-saja, baterai memiliki potensi untuk memiliki efisiensi yang lebih tinggi serta umur yang lebih lama, sehingga hal ini akan menurunkan biaya dari sistem penyimpanan energi [5].

Sistem penyimpanan energi hibrida baterai-superkapasitor membagi porsi kerja antara baterai dan superkapasitor. Superkapasitor

mengalami proses *discharging* dan *charging* saat kebutuhan daya tinggi, sedangkan baterai akan mengalami penurunan daya puncak.

Adapun histori nilai arus yang mengalir di superkapasitor dapat dilihat pada Gambar 4.4.



Gambar 4.4 Grafik arus superkapasitor konfigurasi sistem penyimpanan hibrida baterai-superkapasitor

Dari Gambar 4.4 terlihat bahwa superkapasitor memegang peranan penting sebagai media penyimpanan energi. Mengingat superkapasitor tidak menyimpan energi dalam jumlah yang besar, maka superkapasitor hanya menyuplai sedikit arus kecuali saat kondisi mobil listrik membutuhkan daya yang tinggi. Dalam kondisi hibrida ini, arus yang melewati baterai akan berada di nilai yang mendekati konstan sementara superkapasitor yang akan memenuhi kebutuhan beban sistem pada mobil listrik [5].

Dalam konfigurasi sistem penyimpanan energi baterai saja, baterai harus menyuplai arus yang cukup besar ini, sehingga akan mempengaruhi ukuran dan biaya baterai yang digunakan. Oleh karena itu, konfigurasi hibrida baterai dan superkapasitor dapat menjadi alternatif yang cukup baik, sehingga jumlah dan kapasitas baterai yang dibutuhkan oleh kendaraan listrik dapat menjadi lebih murah, lebih kecil, dan lebih efisien.

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, perbedaan arus baterai pada sistem baterai-saja dan sistem hibrida baterai-superkapasitor membuat arus puncak *discharging* dan *charging* baterai pada sistem

hibrida baterai-superkapasitor lebih rendah 68,2% dan 77% dibandingkan arus baterai konfigurasi sistem baterai-saja.

Berdasarkan penelitian [5], masa pakai baterai pada konfigurasi baterai saja diprediksi hanya mencapai 3,3 tahun. Dalam penelitian [28] membuktikan bahwa dengan terjadinya prosentase penurunan arus puncak *discharging* dan *charging* baterai sebesar 67% dan 74% terbukti efektif memperpanjang masa pakai baterai 76% dibandingkan sistem baterai-saja. Peningkatan masa pakai baterai ini juga didukung oleh penelitian [5]. Sehingga, masa pakai baterai yang semula diprediksi hanya mencapai 3,3 tahun, dapat menjadi 5 (lima) tahun dalam konfigurasi sistem penyimpanan energi hibrida baterai-superkapasitor.

Peningkatan masa pakai baterai terjadi karena proses penyimpanan energi pada baterai dilakukan melalui reaksi redoks, sehingga baterai mengalami perubahan fisis saat kondisi *charge-discharge*. Akibat perubahan fisis ini, terjadi degradasi material yang cukup cepat, apalagi jika di-*discharge* dengan daya yang tinggi (*deep discharge*) [1]. Oleh karena itu, penambahan superkapasitor disini dimaksudkan untuk mengurangi kondisi *deep discharge* mobil listrik yang memerlukan arus besar.

Peningkatan masa pakai Hal ini menunjukkan bahwa dalam siklus 10 tahun, baterai pada sistem baterai-saja harus mengalami 3 (tiga) kali pergantian baterai. Sedangkan pada sistem hibrida baterai-superkapasitor, baterai hanya perlu diganti sebanyak 2 (dua) kali saja. Adapun masa pakai superkapasitor berdasarkan *datasheet* [23] diprediksi bertahan hingga 10 tahun.

Jumlah baterai yang lebih sedikit dan masa pakai (umur) yang lebih panjang membuat biaya akan mempengaruhi analisis kelayakan ekonomi pada sistem hibrida baterai-superkapasitor. Adapun analisis kelayakan ekonomi selengkapnya akan dibahas pada sub-bab 4.2.

4.1.2 Perbandingan Bobot dan Harga Konfigurasi Sistem Penyimpanan Energi

Dalam hasil perhitungan kapasitas sistem penyimpanan energi pada mobil listrik, kebutuhan jumlah baterai berbeda untuk setiap sistem. Pada sistem penyimpanan energi baterai-saja, jumlah baterai yang dibutuhkan adalah sebanyak 639 sel baterai. Sedangkan jumlah baterai yang dibutuhkan dalam konfigurasi sistem hibrida baterai-superkapasitor adalah 565 sel baterai ditambah dengan 3 (tiga) modul superkapasitor.

Adapun perbedaan jumlah baterai dan keberadaan superkapasitor mempengaruhi biaya yang dibutuhkan untuk merakit sistem penyimpanan energi ini, dan juga mempengaruhi bobot mobil listrik secara total. Adapun perbandingan bobot dan harga peralatan penyimpanan energi dapat dilihat pada Tabel 3.4 dan Tabel 3.5.

Pada konfigurasi sistem penyimpanan energi baterai-saja, bobot sistem adalah sebesar 83 Kg. Pada konfigurasi sistem penyimpanan energi hibrida baterai-superkapasitor, penambahan peralatan superkapasitor dan converter DC-DC membuat bobot sistem penyimpanan energi menjadi lebih besar. Total bobot baterai untuk konfigurasi sistem ini adalah 73,45 Kg dengan berat satu cell sebesar 130 g. Satu modul Maxwell BMOD0165 P048 C01 memiliki bobot sebesar 14,2 Kg, sehingga total bobot untuk tiga modul superkapasitor ini adalah sebesar 42,6 Kg. Bobot konverter DC-DC adalah sebesar 25,2 Kg. Total bobot untuk sistem penyimpanan energi hibrida baterai-superkapasitor adalah sebesar 141,25 Kg.

Adapun perbandingan biaya total peralatan untuk kedua konfigurasi sistem penyimpanan energi dapat dilihat pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Perbandingan biaya total peralatan sistem penyimpanan energi pada mobil listrik

No	Komponen	Sistem Penyimpanan Energi	
		BESS	HESS
1.	Baterai	Rp76.680.000	Rp55.800.000
2.	Superkapasitor	-	Rp41.826.000
3.	Konverter	-	Rp10.000.00,-
TOTAL		Rp76.680.000	Rp119.626.000

4.2 Analisis Kelayakan Ekonomi Sistem Baterai-saja dan Sistem Hibrida Baterai-Superkapasitor pada Mobil Listrik

Dalam sub-bab ini akan membahas analisis dan perbandingan kelayakan ekonomi antara sistem baterai-saja dan sistem penyimpanan energi hibrida baterai-saja dan sistem penyimpanan energi hibrida baterai-superkapasitor. Tujuan dari sub-bab ini adalah untuk

mendapatkan perbandingan kelayakan ekonomi antara sistem baterai-saja dan sistem hibrida baterai-superkapasitor pada mobil listrik.

Adapun proses analisis kelayakan ekonomi dalam Tugas Akhir ini menggunakan metode perbandingan *Life cycle cost* (LCC) seperti yang telah dijelaskan pada sub-bab 2.5, dengan masa waktu perhitungan adalah 10 (sepuluh) tahun.

4.2.1 Perhitungan *Initial Cost*

Initial cost merupakan biaya yang harus dibayar saat sistem dibeli atau dipasang. Dalam hal ini, *initial cost* juga dapat didefinisikan sebagai biaya beli awal sistem penyimpanan energi pada mobil listrik. Dalam Tugas Akhir ini, *initial cost* terdiri atas komponen biaya beli peralatan saja, yaitu biaya beli baterai untuk sistem penyimpanan energi baterai saja, dan biaya beli baterai, superkapasitor, dan konverter untuk sistem penyimpanan energi hibrida baterai-superkapasitor.

Adapun perhitungan *initial cost* untuk kedua sistem berturut-turut dapat dilihat pada Tabel 4.2 Spesifikasi lengkap untuk baterai dan superkapasitor yang digunakan sebagai model dapat dilihat pada Tabel 3.3 dan Tabel 3.4.

Tabel 4.2 Perhitungan *initial cost*

No	Komponen	Sistem Penyimpanan Energi	
		BESS	HESS
1.	Baterai	Rp79.200.000	Rp55.800.000
2.	Superkapasitor	-	Rp41.826.000
3.	Konverter	-	Rp1.011.000
TOTAL		Rp79.992.000	Rp119.626.000

4.2.2 Perhitungan *Operational and Maintenance (O&M) Cost*

Sistem penyimpanan energi baterai-saja memiliki kebutuhan daya maksimum sebesar 25.398 W serta menyimpan energi sebesar 12,585 kWh. Dengan menggunakan asumsi bahwa satu hari terdapat 8 (delapan) kali siklus berkendara, dalam seminggu mobil dioperasikan sebanyak 5 (lima) hari, maka total energi untuk satu tahun adalah sebesar 2.567,34 kWh.

Adapun perhitungan biaya O&M sistem baterai-saja untuk tahun ke-0 berdasarkan persamaan (3.3) adalah:

$$C_{O\&M} = (Rp14.012 \times 25,398 \text{ kW}) + (Rp42 \times 2.567,34 \text{ kWh})$$

$$C_{O\&M,BESS} = Rp463.700$$

Sistem penyimpanan energi hibrida baterai-superkapasitor memiliki kebutuhan daya maksimum 8 kW untuk baterai dan 17.398 kWh untuk superkapasitor. Sedangkan kebutuhan energi sama seperti sistem penyimpanan energi baterai-saja. Hal ini membuat terjadinya perbedaan terdapat pada komponen *fixed cost*, sehingga HESS harus mempertimbangkan *fixed cost* dari superkapasitor.

Adapun perhitungan biaya O&M sistem hibrida baterai-superkapasitor untuk tahun ke-0 berdasarkan persamaan (3.3) adalah:

$$C_{O\&M} = [(Rp14.012 \times 8 \text{ kW}) + (Rp1.4012 \times 17,398 \text{ kW})]$$

$$+ (Rp42 \times 2.567,34 \text{ kWh})$$

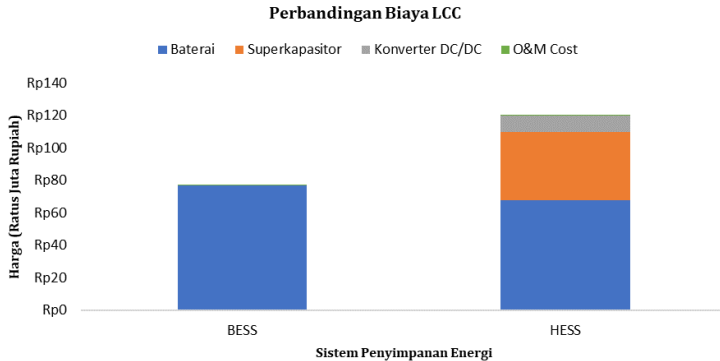
$$C_{O\&M,HESS} = Rp244.297$$

4.2.3 Perhitungan *Life Cycle Cost* (LCC)

Seperti yang telah dijelaskan pada sub-bab 2.5, LCC dapat digunakan sebagai metode untuk mendapatkan pilihan alternatif yang tersedia, sehingga nilai optimal total biaya dari konfigurasi kedua sistem dapat diperoleh sebagai bahan perbandingan kelayakan ekonomi. Adapun komponen biaya LCC adalah *initial cost* (C_{Int}), *operational and maintenance cost* (C_o , C_m), *replacement cost* (C_r), dan *salvage cost* (C_s).

Adapun nilai *salvage cost*, yang merupakan nilai jual kembali kendaraan listrik, tidak diperhitungkan karena menggunakan asumsi bahwa mobil listrik tidak dijual kembali dalam periode waktu 10 (sepuluh) tahun.

Sesuai dengan perhitungan yang telah didapat pada sub-sub-bab 4.2.2.1 dan 4.2.2.2, maka perbandingan komponen biaya LCC antar kedua sistem untuk tahun ke-0 dapat dilihat pada Gambar 4.5.



Gambar 4.5 Perbandingan komponen biaya LCC

Perhitungan nilai LCC dilakukan untuk periode 10 (sepuluh) tahun. Dalam perhitungan LCC, turut diperhitungkan tingkat inflasi yang timbul per tahunnya.

4.2.3.1 *Perhitungan Replacement Cost (C_R)*

Sesuai dengan yang telah dijelaskan pada sub-sub-bab 4.1.2 umur baterai pada sistem baterai saja diprediksi bertahan hingga 3,3 tahun, sedangkan pada sistem hibrida baterai-superkapasitor diprediksi bertahan hingga 5 tahun [5]. Hal ini menunjukkan bahwa dalam siklus 10 tahun, baterai pada sistem baterai-saja harus mengalami 3 (tiga) kali pergantian baterai. Sedangkan pada sistem hibrida baterai-superkapasitor, baterai hanya perlu diganti sebanyak 2 (dua) kali saja.

Superkapasitor Maxwell BMOD0165 P048 C01 memiliki siklus kerja yang panjang sebanyak 1.000.000.000 siklus kerja, dengan masa pakai selama 10 tahun [23]. Sehingga biaya pergantian superkapasitor baru akan diperhitungkan pada tahun ke-11 operasi.

Dengan mempertimbangkan tingkat inflasi (4%) dan depresiasi (20%), rekapitulasi *replacement cost* setiap tahun untuk sistem penyimpanan energi baterai-saja dapat dilihat pada Tabel 4.3, sedangkan

untuk sistem penyimpanan energi hibrida baterai superkapasitor dapat dilihat pada Tabel 4.4.

Tabel 4.3 Perhitungan *replacement cost* baterai sistem penyimpanan energi baterai-saja

Tahun	C_R
0	Rp76.680.000
1	Rp63.797.760
2	Rp53.079.736
3	Rp44.162.341
4	Rp36.743.067
5	Rp30.570.232
6	Rp25.434.433
7	Rp21.161.448
8	Rp17.606.325
9	Rp14.648.462

Tabel 4.4 Perhitungan *replacement cost* baterai sistem penyimpanan energi hibrida baterai-superkapasitor

Tahun	C_R
0	Rp67.800.000
1	Rp56.409.600
2	Rp46.932.787
3	Rp39.048.079
4	Rp32.488.002
5	Rp27.030.017
6	Rp22.488.974
7	Rp18.710.827
8	Rp15.567.408
9	Rp12.952.083

Sesuai dengan yang telah dijelaskan sebelumnya, baterai pada konfigurasi sistem penyimpanan energi baterai-saja memiliki masa pakai selama 3,3 tahun, sedangkan pada konfigurasi sistem penyimpanan energi hibrida baterai-superkapasitor memiliki masa pakai selama 5 tahun. Hal ini berarti biaya C_R hanya diperhitungkan pada tahun ke-2, ke-5, dan ke-

8 pada konfigurasi sistem baterai-saja. Sedangkan pada konfigurasi sistem hibrida baterai-superkapasitor biaya C_R diperhitungkan pada tahun ke-4 dan tahun ke-9.

4.2.3.2 Hasil Perhitungan *Life Cycle Cost* (LCC)

Adapun rekapitulasi perhitungan total LCC selama 10 (sepuluh) tahun untuk setiap konfigurasi sistem penyimpanan energi dapat dilihat pada Tabel 4.5 dan Tabel 4.6 berturut-turut.

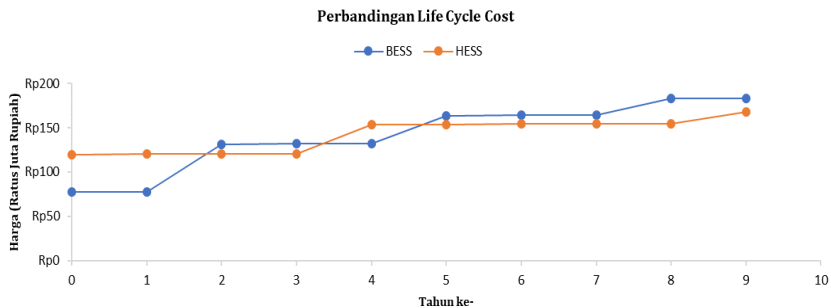
Tabel 4.5 Perhitungan Total LCC selama 10 Tahun untuk Sistem Penyimpanan Energi Baterai-saja

Tahun	C_{int}	$C_{O\&M}$	C_R	LCC
0	Rp76.680.000	Rp463.700		Rp77.143.700
1		Rp482.248		Rp77.625.948
2		Rp501.538	Rp53.079.736	Rp131.207.222
3		Rp521.599		Rp131.728.822
4		Rp542.463		Rp132.271.285
5		Rp564.162	Rp30.570.232	Rp163.405.679
6		Rp586.728		Rp163.992.408
7		Rp610.198		Rp164.602.605
8		Rp634.605	Rp17.606.325	Rp182.843.536
9		Rp659.990		Rp183.503.525

Tabel 4.6 Perhitungan Total LCC selama 10 Tahun untuk Sistem Penyimpanan Energi Hibrida Baterai-Superkapasitor

Tahun	C _{int}	C _{O&M}	C _R	LCC
0	Rp119.626.000	Rp244.297		Rp119.870.297
1		Rp254.069		Rp120.124.366
2		Rp264.232		Rp120.388.598
3		Rp274.801		Rp120.663.400
4		Rp285.793	Rp32.488.002	Rp153.437.195
5		Rp297.225		Rp153.734.420
6		Rp309.114		Rp154.043.534
7		Rp321.479		Rp154.365.012
8		Rp334.338		Rp154.699.350
9		Rp347.711	Rp12.952.083	Rp167.999.144

Grafik perbandingan LCC selama 10 tahun antara sistem penyimpanan energi baterai-saja dan sistem penyimpanan energi hibrida baterai-superkapasitor dapat dilihat pada Gambar 4.6.



Gambar 4.6 Perbandingan biaya LCC antara konfigurasi sistem penyimpanan energi baterai-saja dan sistem penyimpanan energi hibrida baterai-superkapasitor

Seperti yang dapat dilihat pada Gambar 4.6, sistem hibrida memiliki biaya awal (tahun ke-0) yang lebih besar dibandingkan dengan sistem baterai-saja. Hal ini dikarenakan penambahan modul

superkapasitor sebagai bagian dari konfigurasi hibrida, yang otomatis menambah biaya beli yang harus dikeluarkan. Di sisi lain, sistem baterai-saja memiliki biaya beli awal (tahun ke-0) yang lebih murah dibandingkan dengan sistem hibrida baterai-superkapasitor. Biaya awal ini dipengaruhi oleh kebutuhan kapasitas sistem yang berbeda-beda.

Perkiraan LCC dihitung berdasarkan penjumlahan komponen biaya selama masa pakai peralatan oleh sistem dalam rentang 10 tahun. Terlihat dari Gambar 4.6 bahwa terjadi kenaikan yang cukup besar pada tahun ke-3 konfigurasi sistem baterai-saja. Kenaikan ini dipengaruhi karena masa pakai baterai telah habis setelah 3,3 tahun, sesuai dengan yang sudah dijelaskan pada sub-sub-bab 4.1.2. Sehingga pada konfigurasi sistem baterai-saja, jumlah pergantian baterai selama 10 tahun mencapai 3 (tiga) kali, yang otomatis akan menambah biaya yang dibutuhkan oleh sistem.

Total LCC untuk sistem baterai-saja adalah sebesar Rp183.506.525, sedangkan total LCC untuk sistem hibrida baterai-superkapasitor adalah sebesar Rp167.999.144. Terdapat selisih sebesar Rp15.504.381 antar kedua sistem untuk periode sepuluh tahun. Sistem penyimpanan energi hibrida baterai-superkapasitor dapat menghemat total LCC sebesar 9% dibandingkan dengan sistem penyimpanan energi baterai saja.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB V

KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Dari hasil simulasi, perhitungan kapasitas sistem, dan analisis *life cycle cost* antara sistem penyimpanan energi baterai-saja dan sistem penyimpanan energi baterai-superkapasitor, didapatkan beberapa kesimpulan. Diantaranya:

1. Superkapasitor dapat mengkompensasi kebutuhan daya dan arus puncak dari baterai, karena dipengaruhi oleh karakteristik karakteristik kerapatan daya yang besar.
2. Sistem penyimpanan energi hibrida baterai-superkapasitor dapat menurunkan arus puncak baterai dibandingkan dengan sistem baterai-saja hingga 68,2%. Sehingga, kehadiran superkapasitor dalam sistem hibrida baterai-superkapasitor membuat masa pakai baterai menjadi lebih panjang.
3. Biaya awal yang harus dikeluarkan untuk sistem penyimpanan energi hibrida baterai-superkapasitor lebih tinggi dibandingkan sistem penyimpanan energi baterai-saja. Hal ini dikarenakan adanya penambahan biaya untuk kebutuhan pembelian superkapasitor dan konverter DC-DC.
4. Sistem penyimpanan energi hibrida baterai-superkapasitor memiliki *life cycle cost* yang lebih rendah dibandingkan dengan sistem penyimpanan energi baterai-saja.

5.2 Saran

Berdasarkan pengalaman dalam melaksanakan penelitian mengenai sistem penyimpanan energi hibrida baterai-superkapasitor dalam Tugas Akhir ini, maka penulis memberikan saran yang sekiranya dapat berguna bagi penelitian selanjutnya. Diantaranya:

1. Penelitian selanjutnya diharapkan dapat membandingkan beberapa jenis baterai dan superkapasitor tertentu sehingga dapat diamati perbandingan perubahan jenis baterai maupun superkapasitor terhadap sistem.
2. Penelitian selanjutnya diharapkan mampu mempertimbangkan mode pengontrolan baterai maupun superkapasitor dalam sistem hibrida baterai-superkapasitor.

3. Penelitian selanjutnya diharapkan mampu mempertimbangkan detail proses pengisian maupun stasiun pengisian.
4. Penelitian selanjutnya diharapkan dapat mencakup simulasi temperatur baterai maupun superkapasitor dan efeknya terhadap sistem.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] V. Lystianingrum, “Superkapasitor Sebagai Alternatif Penyimpan Energi untuk Bus Listrik di Indonesia: Potensi dan Tantangan,” hlm. 11.
- [2] A. Burke dan H. Zhao, “Applications of Supercapacitors in Electric and Hybrid Vehicles,” hlm. 15, 2015.
- [3] L. Kouchachvili, W. Yaïci, dan E. Entchev, “Hybrid battery/supercapacitor energy storage system for the electric vehicles,” *J. Power Sources*, vol. 374, hlm. 237–248, Jan 2018, doi: 10.1016/j.jpowsour.2017.11.040.
- [4] Z. Song *dkk.*, “Multi-objective optimization of a semi-active battery/supercapacitor energy storage system for electric vehicles,” *Appl. Energy*, vol. 135, hlm. 212–224, Des 2014, doi: 10.1016/j.apenergy.2014.06.087.
- [5] A. C. Baisden dan A. Emadi, “ADVISOR-Based Model of a Battery and an Ultra-Capacitor Energy Source for Hybrid Electric Vehicles,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 53, no. 1, hlm. 199–205, Jan 2004, doi: 10.1109/TVT.2003.822004.
- [6] Linden, David dan Reddy, Thomas B, *Handbook of Batteries Third Edition*, vol. 3. McGraw-Hill Handbooks, 1995.
- [7] Battery University, “Understanding Lithium-ion.” https://batteryuniversity.com/learn/archive/understanding_lithium_ion (diakses Jun 04, 2020).
- [8] J. Miller, “Introduction to electrochemical capacitor technology,” *IEEE Electr. Insul. Mag.*, vol. 26, no. 4, hlm. 40–47, Jul 2010, doi: 10.1109/MEI.2010.5511188.
- [9] M. Winter dan R. J. Brodd, “What Are Batteries, Fuel Cells, and Supercapacitors?,” *Chem. Rev.*, vol. 104, no. 10, hlm. 4245–4270, Okt 2004, doi: 10.1021/cr020730k.
- [10] K. R. Patel dan R. R. Desai, “Calculation of Internal Parameters of Super Capacitor to Replace Battery by Using Charging and Discharging Characteristics,” vol. 2, no. 1, hlm. 5, 2012.
- [11] S. M. Lukic, Jian Cao, R. C. Bansal, F. Rodriguez, dan A. Emadi, “Energy Storage Systems for Automotive Applications,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 6, hlm. 2258–2267, Jun 2008, doi: 10.1109/TIE.2008.918390.

- [12] L. Pan dan C. Zhang, "A High Power Density Integrated Charger for Electric Vehicles with Active Ripple Compensation," *Math. Probl. Eng.*, vol. 2015, hlm. 1–18, 2015, doi: 10.1155/2015/918296.
- [13] S. Zhang, R. Xiong, dan J. Cao, "Battery durability and longevity based power management for plug-in hybrid electric vehicle with hybrid energy storage system," *Appl. Energy*, vol. 179, hlm. 316–328, Okt 2016, doi: 10.1016/j.apenergy.2016.06.153.
- [14] J. Ruan, P. D. Walker, N. Zhang, dan J. Wu, "An investigation of hybrid energy storage system in multi-speed electric vehicle," *Energy*, vol. 140, hlm. 291–306, Des 2017, doi: 10.1016/j.energy.2017.08.119.
- [15] S. T. Bindu R, "Sizing of Hybrid Energy Storage System and Propulsion Unit for Electric Vehicle," *IEEE Transp. Electrification Conf.*, [Daring]. Tersedia pada: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8333846>.
- [16] F. Naseri, E. Farjah, dan T. Ghanbari, "An Efficient Regenerative Braking System Based on Battery/Supercapacitor for Electric, Hybrid and Plug-In Hybrid Electric Vehicles with BLDC Motor," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, hlm. 1–1, 2016, doi: 10.1109/TVT.2016.2611655.
- [17] A. Jaya dan E. Wahjono, "SISTEM PENERANGAN REGENERATIVE MENGGUNAKAN KAPASITOR PADA MOTOR LISTRIK BERPENGGERAK MOTOR INDUKSI TIGA FASA," hlm. 6, 2014.
- [18] A. Iskandar, R. Alifen, dan J. Budiman, "STUDI KOMPARASI LIFE CYCLE COST PADA GEDUNG APARTEMEN," *Dimensi Utama Tek. Sipil*, vol. 3, no. 1, hlm. 31–38, Apr 2016, doi: 10.9744/duts.3.1.31-38.
- [19] K. Lebeau, P. Lebeau, C. Macharis, dan J. V. Mierlo, "How expensive are electric vehicles? A total cost of ownership analysis," vol. 6, hlm. 12, 2013.
- [20] Pusat Unggulan Iptek Perguruan Tinggi Sistem & Kontrol Otomotif, "Buku Panduan Informasi Peringatan 5 Tahun R&D Kendaraan Listrik." Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Agustus 2019.
- [21] Saft, "Saft VL 34570 xlr Rechargeable Li-Ion Cell Battery Datasheet." Jul 2019, [Daring]. Tersedia pada: https://www.saftbatteries.com/download_file/6X7JMGAnv3Fm6HdmtEv%252B2gtlbZ1bRRVHkjS11M6md92GD2EF7vU%252F30ybbz3WOIG%252BxR8srpA5iCdJ%252FV3IQzTVHQyiTucngZK

- Eg9KkYCLkowAvgaG1hurMXXMyNCuY%252BLAXGLBbtr2n
Dr9656GNZUMPseSVvr4ZbjHjpMShzEL1cHWlm2agZA%253D
%253D/Data.Sheet.VL.34570.xlr.31159-2-0719.pdf.
- [22] T. Thien, T. Blank, B. Lunz, dan D. U. Sauer, "Life Cycle Cost Calculation and Comparison for Different Reference Cases and Market Segments," dalam *Electrochemical Energy Storage for Renewable Sources and Grid Balancing*, Elsevier, 2015, hlm. 437–452.
- [23] Maxwell Technologies, Inc., "Maxwell Supercapacitor BMOD0165 P048 C01 Datasheet." [Daring]. Tersedia pada: https://www.maxwell.com/images/documents/48V_ds_DuraBlue_3000685_4.pdf.
- [24] Brusa Elektronik AG, "Brusa BDC546 - Bidirectional 750 V DC/DC-Converter Datasheet." [Daring]. Tersedia pada: [https://www.brusa.biz/_files/bsc/BDC546/Customer_data//2_Manuals/BDC546_manual_EN\(UK\).pdf](https://www.brusa.biz/_files/bsc/BDC546/Customer_data//2_Manuals/BDC546_manual_EN(UK).pdf).
- [25] alibaba.com, "Alibaba.com: Saft VL34570 Lithium-Ion Battery." https://szkeshee.en.alibaba.com/product/62072119446-806406993/SAFT_VL34570_3_75V_Lithium_Ion_Battery_1S_1P_for_UPS.html (diakses Jun 07, 2020).
- [26] ebay.com, "ebay.com: Maxwell Technologies BMOD0165 P048 B06 Supercapacitors / Ultracapacitors 165F 48." <https://www.ebay.com/itm/Maxwell-Technologies-BMOD0165-P048-B06-Supercapacitors-Ultracapacitors-165F-48/124059531391?hash=item1ce286387f:g:BeUAAOSwzWFeKzIR> (diakses Jun 07, 2020).
- [27] alibaba.com, "Alibaba.com: Durable and Stable Step-up Boost DC Converter." https://www.alibaba.com/product-detail/Durable-and-stable-Step-Up-Boost_60676125682.html?spm=a2700.galleryofferlist.0.0.5cab5170f2r1NU (diakses Jun 07, 2020).
- [28] J. Shen, S. Dusmez, dan A. Khaligh, "Optimization of Sizing and Battery Cycle Life in Battery/Ultracapacitor Hybrid Energy Storage Systems for Electric Vehicle Applications," *IEEE Trans. Ind. Inform.*, vol. 10, no. 4, hlm. 2112–2121, Nov 2014, doi: 10.1109/TII.2014.2334233.
- [29] K. Mongird *dkk.*, "Energy Storage Technology and Cost Characterization Report," PNNL-28866, 1573487, Jul 2019. doi: 10.2172/1573487.

- [30] Bank Indonesia, “Laporan Inflasi (Indeks Harga Konsumen).” Bank Sentral Republik Indonesia, Diakses: Jun 04, 2020. [Daring]. Tersedia pada: <https://www.bi.go.id/id/moneter/inflasi/data/Default.aspx>.
- [31] “A Behind the Scenes Take on Lithium-ion Battery Prices,” *BloombergNEF*, Mar 05, 2019.

BIODATA PENULIS



Qaedi AUFAR Saifuddin Bantasyam, lahir di Banda Aceh, 4 Oktober 1998. Penulis adalah putra bungsu dari pasangan Saifuddin Bantasyam, SH., M.A. dan drh. Zahrah M. Thaib. Penulis menempuh pendidikan dasar dan menengah mulai dari MIN 1 Model Banda Aceh, MTsN Model Banda Aceh, dan SMAN Modal Bangsa Aceh hingga lulus pada tahun 2016. Penulis menempuh pendidikan tinggi jenjang sarjana di Departemen

Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya dengan konsentrasi di bidang Teknik Sistem Tenaga. Selama menempuh pendidikan tinggi, penulis aktif sebagai anggota ITS MUN Club dan Sekretaris Jenderal Pelajar Mahasiswa Kekeluargaan Tanah Rencong Surabaya. Penulis juga bertugas sebagai asisten Laboratorium Instrumentasi Pengukuran dan Identifikasi Sistem Tenaga B-204 dengan tugas tambahan sebagai Koordinator Praktikum Pengukuran listrik 2019-2020. Penulis dapat dihubungi melalui email qaedi.aufar@gmail.com .