



**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - EE 184801

## PERBANDINGAN KELAYAKAN EKONOMI SISTEM KAPASITOR SUPER DAN SISTEM BATERAI PADA BUS LISTRIK KOTA

Andi Irawan  
NRP 0711164000015

Dosen Pembimbing  
Vita Lystianingrum, ST., M.Sc., Ph. D.  
Dr.Eng. I Made Yulistya, ST., M.Sc.

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





TUGAS AKHIR - EE 184801

**PERBANDINGAN KELAYAKAN EKONOMI SISTEM  
KAPASITOR SUPER DAN SISTEM BATERAI PADA BUS  
LISTRIK KOTA**

Andi Irawan  
NRP 07111640000015

Dosen Pembimbing  
Vita Lystianingrum, ST., M.Sc., Ph. D.  
Dr.Eng. I Made Yulistya, ST., M.Sc.

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





FINAL PROJECT - EE 184801

**ECONOMICS VIABILITY COMPARISON OF  
SUPERCAPACITOR SYSTEM AND BATTERY SYSTEM ON  
ELECTRIC CITY BUS**

Andi Irawan  
NRP 07111640000015

Supervisors  
Vita Lystianingrum, ST., M.Sc., Ph. D.  
Dr.Eng. I Made Yulistya, ST., M.Sc.

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING  
Faculty of Intelligent Electrical and Informatics Technology  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2019



## **PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR**

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

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

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

Surabaya, Juli 2020



Andi Irawan  
0711164000015

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



**PERBANDINGAN KELAYAKAN EKONOMI SISTEM  
KAPASITOR SUPER DAN SISTEM BATERAI PADA  
BUS LISTRIK KOTA**

**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



Vita Lystianingrum, ST., M.Sc., Ph. D.  
NIP. 198208292006042001

**SURABAYA  
JULI, 2020**

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# **PERBANDINGAN KELAYAKAN EKONOMI SISTEM KAPASITOR SUPER DAN SISTEM BATERAI PADA BUS LISTRIK KOTA**

## **TUGAS AKHIR**

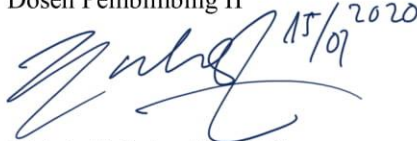
Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan  
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik

Pada

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

Menyetujui :

Dosen Pembimbing II



Dr.Eng. I Made Yulistya, ST., M.Sc.

NIP. 197007121998021001

**SURABAYA  
JULI, 2020**

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# **PERBANDINGAN KELAYAKAN EKONOMI SISTEM KAPASITOR SUPER DAN SISTEM BATERAI PADA BUS LISTRIK KOTA**

Nama mahasiswa : Andi Irawan

Dosen Pembimbing I : Vita Lystianingrum, ST., M.Sc., Ph. D.

Dosen Pembimbing II : Dr.Eng. I Made Yulistya, ST., M.Sc.

## **Abstrak:**

Perkembangan sistem penyimpanan energi secara pesat turut berkontribusi pada pengembangan aplikasi energi baru-terbarukan secara luas. Karakter kapasitor super yang unggul dalam hal kerapatan daya dan memiliki masa hidup yang lama dinilai akan menjadi teknologi tepat guna jika diterapkan pada bus listrik kota. Dengan kerapatan daya yang tinggi kapasitor super dapat melakukan pengisian ketika bus berhenti pada halte. Selain itu bus dengan kapasitor super juga tidak perlu khawatir dengan biaya pergantian karena masa hidup yang lama. Dengan keunggulan tersebut kapasitor super perlu dibandingkan dengan baterai yang sudah umum digunakan pada bus listrik kota. Dengan menggunakan program ADVISOR dimodelkan kendaraan dan siklus berkendara untuk mendapatkan pendekatan senyawa mungkin dengan aslinya. Dilakukan penentuan kapasitas berdasarkan jenis penyimpanan dan cara kerja masing-masing bus. Kemudian biaya yang dibutuhkan kedua jenis media penyimpan dihitung dan dianalisis secara ekonomi. Dengan metode *Life Cycle Cost* disimpulkan bahwa bus kapasitor super lebih murah dibandingkan bus dengan baterai. Selain itu melalui metode *Net Present Value* bus kapasitor super dinilai layak untuk diterapkan.

**Kata kunci:** Kapasitor Super, Baterai, Bus Listrik Kota, *Life Cycle Cost*, *Net Present Value*.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# **ECONOMICS VIABILITY COMPARISON OF SUPERCAPACITOR SYSTEM AND BATTERY SYSTEM ON ELECTRIC CITY BUS**

Student Name : Andi Irawan  
First Supervisor : Vita Lystianingrum, ST., M.Sc., Ph. D.  
Second Supervisor : Dr.Eng. I Made Yulistya, ST., M.Sc.

## **Abstract:**

The development of energy storage systems is rapidly contributing to the development of broadly renewable energy applications. Supercapacitor character that is superior in terms of power density and has a long lifetime is considered to be an appropriate technology if applied to city electric buses. With high power density the supercapacitor can charge when the bus stops at the bus stop. In addition, buses with supercapacitors also do not need to worry about replacement cost due to long lifetime. With these advantages supercapacitors need to be compared with batteries that are commonly used on city electric buses. By using the ADVISOR program modeled vehicles and driving cycles to get the approach as real as possible to the original. Sizing is done based on the type of storage and how each bus works. Then the costs required by the two types of energy storage are calculated and analyzed economically. With the Life Cycle Cost method, it is concluded that supercapacitor buses are cheaper than buses with batteries. Besides that, through the Net Present Value the supercapacitor bus is considered feasible to be applied.

**Key Word:** Supercapacitors, Batteries, City Electric Buses, Life Cycle Cost, Net Present Value.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



## KATA PENGANTAR

Tiada kata yang mampu menggambarkan seberapa banyak syukur yang harus penulis panjatkan kepada Allah Subhanahu Wata'ala, atas segala rahmat, karunia, dan petunjuk yang telah dilimpahkan-Nya, walaupun beragam tantangan menghadang, pada akhirnya penulis mampu menyelesaikan Tugas Akhir ini yang berjudul **“PERBANDINGAN KELAYAKAN EKONOMI SISTEM KAPASITOR SUPER DAN SISTEM BATERAI PADA BUS LISTRIK KOTA”**.

Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu persyaratan untuk menyelesaikan jenjang pendidikan S1 pada Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Atas selesainya penyusunan Tugas Akhir ini, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Allah SWT atas limpahan rahmat, karunia dan petunjuk-Nya.
2. Ibunda Surati Irawati dan Ayahanda Subandi atas segala doa dan cinta yang tak henti pada penulis dalam keadaan apapun. Semoga Allah SWT senantiasa melindungi dan memberi mereka tempat terbaik kelak di surgaNya.
3. Ibu Vita Lystianingrum, ST., M.Sc., Ph. D. dan Bapak Dr.Eng. I Made Yulistya, ST., M.Sc. selaku dosen pembimbing yang telah memberikan arahan, bimbingan dan perhatiannya selama proses penyelesaian Tugas Akhir ini.
4. Seluruh dosen dan karyawan Departemen Teknik Elektro ITS yang telah memberikan banyak ilmu dan menciptakan suasana belajar yang luar biasa.
5. Para asisten Laboratorium Instrumentasi, Pengukuran, dan Identifikasi Sistem Tenaga (LIPIST) yang menjadi teman seperjuangan dalam proses menyelesaikan Tugas Akhir, dan telah memberikan pengalaman yang berharga kepada penulis baik bidang akademik dan non akademik.
6. Tim Kapasitor super, Ilham Bagus Santoso dan Qaedi AUFAR Saifuddin Bantasyam yang telah menjadi teman diskusi selama proses penyelesaian Tugas Akhir pada topik kapasitor super.
7. Teman-teman seperjuangan e56 yang telah menemani dan menorehkan cerita selama masa kuliah sampai penyusunan Tugas Akhir ini

Penulis telah berusaha maksimal dalam penyusunan Tugas Akhir ini. Namun besar harapan penulis untuk tetap menerima saran dan kritik untuk perbaikan dan pengembangan Tugas Akhir ini. Semoga Tugas Akhir ini dapat memberikat manfaat yang luas.

Surabaya, Juni 2019

Andi Irawan  
0711164000015

## DAFTAR ISI

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR.....	v
LEMBAR PENGESAHAN .....	vii
ABSTRAK.....	xiii
KATA PENGANTAR .....	xv
DAFTAR ISI.....	xvii
DAFTAR GAMBAR .....	xix
DAFTAR TABEL.....	xx
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 .....	2
1.6 Sistematika Penulisan .....	4
1.7 Relevansi .....	4
BAB 2 KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI.....	5
2.1 Kajian Pustaka .....	5
2.2 Sistem Penyimpan Energi.....	7
2.2.1 Baterai.....	8
2.2.2 Kapasitor Super .....	9
2.3 Penentuan Kapasitas Sistem Penyimpan Energi.....	11
2.3.1 Penentuan Kapasitas pada Baterai .....	12
2.3.2 Penentuan Kapasitas pada Kapasitor Super .....	14
2.4 Topologi Sistem Bus Listrik.....	15
2.5 Analisis Kelayakan Ekonomi .....	16
2.5.1 <i>Life Cycle Cost</i> (LCC) .....	16
2.5.2 <i>Net Present Value</i> (NPV).....	18
BAB 3 PEMODELAN SISTEM DAN SIMULASI .....	19
3.1 Diagram Alur Pemodelan Sistem Bus Listrik.....	20
3.2 Penyesuaian Parameter Bus Listrik dalam Advisor .....	21
3.2.1 Spesifikasi Fisik Bus.....	24
3.2.2 Spesifikasi Motor Bus.....	25
3.2.3 Pemodelan Siklus Berkendara .....	26
3.2.4 Simulasi Advisor .....	28
3.3 Penentuan Kapasitas Sistem Penyimpan Energi.....	29
3.3.1 Penentuan Kapasitas Baterai.....	29
3.3.2 Penentuan Kapasitas Kapasitor super .....	31

BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN .....	35
4.1 <i>Life Cycle Cost</i> (LCC).....	35
4.1.1 Perhitungan Biaya Awal ( <b><i>Costint</i></b> ).....	35
4.1.2 Perhitungan Biaya Operasional dan Biaya Perawatan ( <b><i>Costm&amp;O</i></b> ) .....	36
4.1.3 Perhitungan Biaya Penggantian ( <b><i>CostR</i></b> ).....	36
4.1.4 Perhitungan dan Analisis <i>Life Cycle Cost</i> (LCC) .....	37
4.2 <i>Net Present Value</i> (NPV) .....	40
4.2.1 Perhitungan Pendapatan Bus .....	40
4.2.2 Perhitungan dan Analisi NPV .....	41
BAB 5 KESIMPULAN .....	43
5.1 Kesimpulan .....	43
5.2 Saran.....	43
DAFTAR PUSTAKA .....	45
LAMPIRAN .....	49
BIODATA PENULIS .....	53

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2. 1</b> Aliran ion litium dalam sel baterai [5] .....	8
<b>Gambar 2. 2</b> Perbedaan muatan pada kapasitor dengan kapasitor super .....	10
<b>Gambar 2. 3</b> Skema proses pengisian dan pemakaian pada kapasitor super .....	10
<b>Gambar 2. 4</b> Perbandingan sifat berbagai jenis sistem penyimpanan energi. ....	11
<b>Gambar 2. 5</b> Algoritma penentuan kapasitas pada baterai .....	12
<b>Gambar 2. 6</b> Grafik siklus kerja.....	13
<b>Gambar 2. 7</b> Topologi sistem pada bus listrik .....	15
<b>Gambar 2. 8</b> Parameter pertimbangan dalam LCC .....	17
<b>Gambar 2. 9</b> Contoh break point pada perhitungan LCC .....	17
<b>Gambar 3. 1</b> Diagram alur pemodelan sistem bus listrik.....	20
<b>Gambar 3. 2</b> Tampilan halaman awal ADVISOR .....	21
<b>Gambar 3. 3</b> Halaman pertama inputan ADVISOR .....	22
<b>Gambar 3. 4</b> Halaman kedua inputan ADVISOR.....	23
<b>Gambar 3. 5</b> Halaman hasil simulasi ADVISOR .....	24
<b>Gambar 3. 6</b> Spesifikasi PEM-Motor 1DB2022.....	25
<b>Gambar 3. 7</b> Karakteristik torsi dan kecepatan pada PEM-Motor 1DB2022.....	26
<b>Gambar 3. 8</b> Grafik siklus berkendara .....	27
<b>Gambar 3. 9</b> Kebutuhan daya bus.....	28
<b>Gambar 4. 1</b> Perbandingan biaya komponen LCC .....	39
<b>Gambar 4. 2</b> Perbandingan grafik LCC .....	40
<b>Gambar 4. 3</b> Grafik aliran kas NPV.....	42

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2. 1</b> Hasil penentuan kapasitas sistem baterai .....	5
<b>Tabel 2. 2</b> Hasil penentuan kapasitas sistem kapasitor super .....	6
<b>Tabel 2. 3</b> Hasil penentuan kapasitas sistem hibrida .....	6
<b>Tabel 2. 4</b> Perbandingan biaya bahan bakar kendaraan hibrida. ....	6
<b>Tabel 2. 5</b> Perbandingan harga kapasitor super dan baterai. ....	7
<b>Tabel 3. 1</b> Tabel dimensi fisik bus .....	24
<b>Tabel 3. 2</b> Jarak dan waktu tempuh bus antar halte. ....	27
<b>Tabel 3. 3</b> Data siklus berkendara .....	28
<b>Tabel 3. 4</b> Spesifikasi baterai BYD B-Plus 2.5. ....	29
<b>Tabel 3. 5</b> Spesifikasi baterai setelah proses penentuan kapasitas. ....	30
<b>Tabel 3. 6</b> Spesifikasi baterai setelah koreksi prinsip keseimbangan daya.....	31
<b>Tabel 3. 7</b> Spesifikasi kapasitor super maxwell. ....	31
<b>Tabel 3. 8</b> Spesifikasi kapasitor super setelah melalui proses penentuan kapasitas.....	33
<b>Tabel 4. 1</b> Rekapitulasi biaya biaya awal. ....	35
<b>Tabel 4. 2</b> Penurunan harga baterai setiap tahun. ....	37
<b>Tabel 4. 3</b> Rangkuman hasil perhitungan LCC sistem baterai .....	38
<b>Tabel 4. 4</b> Rangkuman hasil perhitungan LCC sistem kapasitor super .....	38
<b>Tabel 4. 5</b> Rangkuman hasil perhitungan aliran kas bus kapasitor super .....	41

*Halaman ini sengaja dikosongkan*





# **BAB 1**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Pemanasan global telah menjadi isu hangat sejak beberapa dekade terakhir. Secara singkat pemanasan global mengacu pada kenaikan suhu rata-rata permukaan bumi secara global. Hal ini disebabkan karena semakin tebalnya lapisan gas rumah kaca pada atmosfer yang membuat panas matahari lebih banyak terperangkap di bumi. Penyusun gas rumah kaca adalah karbon dioksida, ozon, metana, dan dinitrogen oksida. Selama 2 abad terakhir manusia menghasilkan karbon dioksida yang berlebih lewat pembakaran fosil. Selain itu kendaraan berbahan bakar fosil juga menyumbang masalah lain berupa polusi udara. Di Jakarta misalnya, menurut indeks kualitas udara pada 17 Agustus 2019 kualitasnya berada pada angka 171. Angka ini sudah termasuk dalam level merah yang menandakan udara tidak sehat. Menurut Dinas Lingkungan Hidup Jakarta, 75% penyebab polusi udara di Jakarta berasal dari gas buang transportasi.

Salah satu cara untuk mengatasi masalah ini adalah dengan menggunakan transportasi umum. Transportasi yang paling umum digunakan dalam kota adalah bus transit kota. Selain itu penggunaan kendaraan listrik juga menjadi solusi alternatif. Pemerintah Indonesia cukup serius dalam pengembangan kendaraan listrik dengan mengeluarkan Peraturan Presiden (Perpres) Nomor 55 Tahun 2019 tentang Percepatan Program Mobil Listrik. Selain ramah lingkungan kendaraan listrik, contohnya bus listrik juga paling hemat biaya. Bus listrik 4 kali lebih hemat biaya daripada bus hibrida dan 5 kali daripada satu diesel [1].

Sistem penyimpanan energi yang paling populer digunakan pada kendaraan listrik adalah baterai. Banyak jenis penyimpan energi lain seperti salah satunya adalah kapasitor super. Kapasitor super memiliki masa hidup yang lebih tinggi daripada baterai sehingga tidak perlu khawatir untuk melakukan pergantian dalam periode dekat. Selain itu kapasitor super juga memiliki kerapatan daya yang besar sehingga dapat melakukan pengisian dengan cepat. Namun kerapatan energi pada kapasitor super jauh lebih kecil jika dibandingkan baterai sehingga kendaraan dengan sistem penyimpanan energi ini tidak dapat menempuh jarak yang jauh. Di sisi lain, jarak pemberhentian antar halte pada bus

transit kota tidak terlalu jauh sehingga penyimpanan energi menggunakan kapasitor super memiliki peluang untuk diterapkan. Pada penelitian ini akan dibahas mengenai sistem penyimpan energi pada bus listrik kota. Studi mencakup sistem kapasitor super dan baterai pada bus listrik kota serta dilakukan perbandingan kelayakan ekonomi untuk mengetahui sistem dengan biaya paling ekonomis.

## **1.2 Permasalahan**

Perumusan masalah dari penelitian ini adalah :

1. Bagaimana penentuan kapasitas (*sizing*) sistem kapasitor super dan baterai pada bus listrik kota?
2. Bagaimana perbandingan kelayakan ekonomi sistem baterai dan kapasitor super pada bus listrik kota?

## **1.3 Tujuan**

Penelitian ini bertujuan untuk :

1. Menentukan kapasitas (*sizing*) sistem kapasitor super dan baterai pada bus listrik kota.
2. Membandingkan kelayakan ekonomi sistem baterai dan kapasitor super pada bus listrik kota.

## **1.4 Batasan Masalah**

Batasan masalah dalam penelitian ini adalah :

1. Pemodelan dan simulasi menggunakan program ADVISOR (Advanced Vehicle Simulatir) 2.0 pada aplikasi MATLAB 2019b.
2. Siklus berkendara (*drive cycle*) dibuat berdasarkan jarak dan kecepatan, namun tidak mempertimbangkan ketinggian.
3. Masa hidup baterai dan kapasitor super menggunakan referensi paper terkait.

## **1.5 Metodologi**

Metodologi yang digunakan dalam menyusun penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Studi Literatur  
Mengumpulkan referensi-referensi dan literatur yang berhubungan dengan sistem penyimpan energi (kapasitor super dan baterai) pada bus listrik, pemodelan sistem

kendaraan, dan analisis perbandingan kelayakan ekonomi dari dua sistem yang berbeda.

2. Pengumpulan Data

Pada tahap ini dilakukan pengumpulan data yang diperlukan untuk mendukung studi ini. Data yang diperlukan mencakup spesifikasi dimensi bus listrik, spesifikasi komponen sistem bus listrik, rute bus kota, spesifikasi kapasitor super, spesifikasi baterai. Selain itu juga dibutuhkan data ekonomi yang mencakup harga bus listrik, harga baterai, harga kapasitor super, biaya operasional bus listrik, dan biaya perawatan bus listrik.

3. Simulasi dan Pemodelan

Pada tahap ini, nilai parameter yang diperoleh pada tahap sebelumnya dimasukkan dalam simulasi menggunakan perangkat lunak Matlab R2019b melalui program ADVISOR. Melalui aplikasi yang dikembangkan oleh NREL ini parameter tersebut dimodelkan untuk menciptakan simulasi pengoperasian bus listrik yang mendekati aslinya. Hasil dari simulasi ini diharapkan dapat memberikan informasi daya yang dibutuhkan pada bus listrik dalam suatu siklus kerja, sehingga proses kalkulasi *penentuan kapasitas* sistem penyimpan energi dapat dilakukan.

4. Perhitungan dan Analisis Kelayakan Ekonomi

Pada tahap ini dilakukan perhitungan komponen nilai-nilai ekonomis dari kedua sistem. Kemudian dilakukan perhitungan ekonomi dengan metode *Life Cycle Cost* (LCC), dan *Net Present Value* (NPV). Metode LCC bertujuan untuk membandingkan biaya mana dari kedua sistem yang paling ekonomis. Sedangkan metode NPV dilakukan untuk menilai layak tidaknya investasi untuk sebuah sistem dengan memperhatikan periode pengembalian serta keuntungan sistem sampai masa habis pakai. Kemudian hasil perhitungan akan diplot pada sebuah table dan grafik untuk dianalisis.

5. Penyelesaian Laporan Penelitian

Tahap ini dilakukan sebagai tahap akhir dari serangkaian pengerjaan studi ini. Di samping itu penyelesaian laporan ini

dilakukan guna memenuhi persyaratan kelulusan mata kuliah Tugas Akhir.

## **1.6 Sistematika Penulisan**

Sistematika penulisan dalam penelitian ini terdiri dari 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 kapasitor super, baterai, bus listrik, dan metode perhitungan ekonomi.
3. BAB 3 berisikan tentang tahapan perancangan model untuk simulasi kendaraan dan perhitungan parameter komponen kendaraan.
4. BAB 4 berisikan perhitungan serta analisis ekonomi dengan metode *Life Cycle Cost* dan *Net Present Value*.
5. BAB 5 berisikan kesimpulan dan saran.

## **1.7 Relevansi**

Studi ini diharapkan mampu memberikan manfaat sebagai bahan pertimbangan ataupun referensi penelitian terkait implementasi kapasitor super pada kendaraan listrik khususnya bus listrik baik dari segi teknis maupun dari segi ekonomi

## BAB 2

### KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

Dalam bab ini akan dijelaskan mengenai penelitian-penelitian yang berhubungan tentang penerapan kapasitor super pada kendaraan listrik khususnya bus listrik serta teori dasar penunjang penelitian. Teori dasar mencakup tentang baterai, kapasitor super, perhitungan penentuan kapasitas, topologi sistem bus listrik, dan metode analisis kelayakan ekonomi. Kajian mengenai penelitian terkait akan disajikan secara ringkas pada sub-bab 2.1, sedangkan teori dasar akan dijelaskan pada sub-bab 2.2 sampai 2.6.

#### 2.1 Kajian Pustaka

Dalam sub-bab ini akan dibahas mengenai kajian pustaka yang memuat tentang hasil penelitian yang pernah dilakukan sebelumnya. Kajian pustaka dan penelitian terkait memuat hasil penelitian yang berfokus kepada beberapa aspek, seperti proses penentuan kapasitas sistem penyimpan energi pada kendaraan listrik, keunggulan kekurangan jenis penyimpan energi, serta analisis perbandingan kelayakan ekonomi pada sebuah sistem.

Amir Ostadi meneliti tentang menentukan kapasitas superkapasitor, baterai, dan hibrida baterai-kapasitor super pada bus listrik kota secara optimal [2]. Ia menggunakan algoritma PSO untuk mencari rangkaian penyimpan energi dengan beberapa kasus. Simulasi dilakukan menggunakan bus kota dengan massa 13.000 kg (tidak termasuk sistem penyimpan yang dipertimbangkan) dan siklus berkendara harian 240 km. Didapatkan hasil sebagai berikut.

**Tabel 2. 1** Hasil penentuan kapasitas sistem baterai [2]

Pergantian baterai ( <i>swap</i> )	2	4	10
$N_{bs}$ ( <i>baterai seri</i> )	78	92	110
$N_b$ ( <i>baterai paralel</i> )	953	392	137
Biaya (USD)	1.040.676	504.896	210.980

**Tabel 2. 2** Hasil penentuan kapasitas sistem kapasitor super [2]

$N_{SC}$ ( <i>Superkapasitor paralel</i> )	221
$N_{SC}$ ( <i>Superkapasitor paralel</i> )	102
Biaya (USD)	1.127.100

**Tabel 2. 3** Hasil penentuan kapasitas sistem hibrida [2]

$N_{bs}$ ( <i>baterai seri</i> )	37
$N_{bs}$ ( <i>baterai seri</i> )	1038
$N_{SC}$ ( <i>Superkapasitor paralel</i> )	222
$N_{SC}$ ( <i>Superkapasitor paralel</i> )	58
Biaya (USD)	1.196.995

Seperti yang ditunjukkan oleh hasil optimasi, biaya sistem penyimpanan bervariasi tergantung pada berbagai skenario yang dipertimbangkan mencakup jenis perangkat penyimpan, jumlah penggantian baterai, dan harga masing-masing. Terlihat bahwa urutan biaya investasi dari yang paling murah yaitu sistem baterai, sistem kapasitor super, sistem hibrida.

Andrew Burke [3] dalam papernya meneliti tentang penerapan superkapasitor pada beberapa jenis kendaraan listrik dan hibrida. Ia melakukan simulasi berbagai jenis kendaraan dan membandingkan efisiensi serta biaya bahan bakar. Simulasi dilakukan menggunakan variasi beberapa siklus berkendara. Hasil pada tabel 2.4 menunjukkan kapasitor super dinilai lebih efisien meskipun hanya dapat menyimpan sedikit energi.

**Tabel 2. 4** Perbandingan biaya bahan bakar kendaraan hibrida. [3]

Tipe Kendaraan	Daya (1)	Daya (2)	SC (3)	Baterai (4)
Kecil	97	15	47,4/49,8	45/47,7
Menengah	125	25	41,1/44,2	40,3/43,1
Besar ( <i>full size</i> )	160	50	38,1/43,5	38,5/42
SUV kecil	140	25	39,1/43	37,8/42,1
SUV menengah	150	40	36,2/39,5	34,3/38,4
Truk pengiriman	200	50	12,2/10,7	11,8/10,7

- (1) Daya mesin dalam satuan kW.
- (2) Daya motor listrik dalam satuan kW.
- (3) Konsumsi bahan bakar dalam mpg (mil per gallon) kapasitor super 1200 F manufaktur Yunasko.
- (4) Konsumsi bahan bakar dalam mpg (mil per gallon) baterai LiTiO 3,8 Ah manufaktur Altairnano.

Selain itu dalam penelitian ini juga dibahas tentang perbandingan harga baterai dan kapasitor super saat diterapkan ditahun 2014. Daro tabel 2.5 dapat disimpulkan kapasitor super tidak dapat bersaing dengan baterai dalam hal \$/Wh namun dapat bersaing dalam hal \$/kW dan \$/unit untuk memenuhi kebutuhan kendaraan tertentu. Dalam perbandingannya kedua teknologi penyimpan energi harus menyediakan daya dan siklus hidup yang sama dan energi yang cukup (Wh). Ketika energi yang dapat disimpan kapasitor super kurang dari 1/10 dari baterai dalam aplikasi hibrida, maka harga kapasitor super perlu berkurang sekitar 0.5-1 cent/Farad agar dapat bersaing dengan baterai berdaya besar di \$500-700/kWh [3].

**Tabel 2. 5** Perbandingan harga kapasitor super dan baterai [3].

Biaya baterai (\$/kWh)	Biaya baterai* (\$/kW)	Biaya SC 2.6 V (cents/F)	Biaya SC 3V (cents/F)	Biaya SC** 3 V (\$/kWh)	Biaya SC 3 V (\$/kW)
300	30	0,25	0,34	3626	7,3
400	40	0,34	0,45	4800	9,6
500	50	0,42	0,56	5973	11,9
700	70	0,59	0,78	8320	16,6
900	90	0,76	1,0	10667	21,3
1000	100	0,84	1,12	11947	23,9

\*Baterai 100 Wh/kg, 1000 W/kg; \*\*kapasitor super 5 Wh/kg, 2500 W/kg.

## 2.2 Sistem Penyimpan Energi

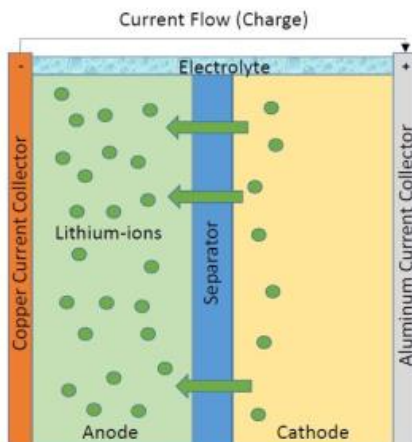
Sistem penyimpanan energi atau *energy storage system* (ESS) merupakan serangkaian metode dan teknologi yang digunakan sebagai media menyimpan energi listrik, elektrokimia, kimia, mekanik, termal (panas), dan aneka bentuk energi lainnya. Dengan adanya sistem

penyimpan energi, energi dapat disimpan sehingga energi dapat dimanfaatkan di lain waktu untuk melakukan operasi yang bermanfaat. Desain dan teknologi penyimpanan energi yang paling banyak digunakan adalah sistem penyimpanan energi listrik. Keberadaan teknologi ini dilihat sebagai salah satu solusi untuk mendukung sektor kelistrikan yang ramah lingkungan, efisien, dan efektif biaya.

### 2.2.1 Baterai

Baterai merupakan sistem penyimpan energi secara elektrokimia di mana baterai dapat mengubah energi kimia yang terkandung dalam material aktif baterai secara langsung menjadi energi listrik dengan reaksi elektrokimia reduksi-oksidasi [4]. Sel pada baterai adalah bagian elektrokimia yang menyediakan sumber energi listrik dengan konversi energi kimia secara langsung. Satu sel dalam baterai terdiri dari tiga bagian utama yaitu elektroda, separator dan elektrolit

Litium-ion menjadi baterai yang paling banyak dipilih untuk digunakan pada peralatan elektronik karena memiliki densitas energi yang lebih besar daripada baterai lain di pasaran. Baterai litium-ion bekerja seperti jenis baterai lainnya di mana proses pengisian diawali dengan berpindahnya ion-ion litium dari katoda ke anoda melalui elektrolit sebagai medium. Aliran ion pada baterai dapat dilihat pada gambar 2.1



**Gambar 2. 1** Aliran ion litium dalam sel baterai [5]



Namun baterai dari segi termal sangat rentan terhadap temperatur tinggi yang dapat memicu terjadinya *thermal runaway*, yaitu kondisi tertentu di mana temperatur baterai akan terus naik dan memicu reaksi kimia abnormal yang juga bersifat eksoterm (menghasilkan panas). Hal ini dapat memicu api dan ledakan [6]. Oleh sebab itu diperlukan sistem pendingin dalam implementasinya.

### 2.2.2 Kapasitor Super

Kapasitor super atau ultrakapasitor termasuk ke dalam salah satu kategori sistem penyimpan energi elektro-kimia yang memiliki kemampuan untuk melepaskan muatan dan mengalirkan daya dengan intensitas tinggi dalam waktu yang singkat. Sehingga, kapasitor sangat diunggulkan sebagai pengganti untuk baterai dan bahan bakar sel pada berbagai variasi aplikasi. Kapasitor super pertama kali ditemukan di SOHIO (Standart Oil Company of Ohio) oleh Robert A. Rightmire pada tahun 1962 [7].

Kapasitor super memiliki nilai kapasitansi yang lebih besar daripada kapasitor. Besar nilai kapasitansi dari kapasitor super ditunjukkan pada persamaan (2.1). Kapasitansi yang disimpan pada kapasitor super sepenuhnya karena proses penyimpan muatan elektrostatis [8].

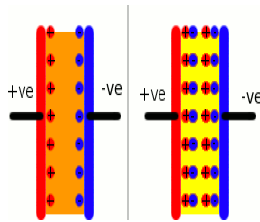
$$C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{d} \quad (2.1)$$

Keterangan :

$C$	=	Besar Kapasitansi
$\epsilon_r$	=	Konstanta relatif dari bahan dielektrik
$\epsilon_0$	=	Permitivitas dari vacuum ( <i>free space</i> )
$A$	=	Luas permukaan dari bahan dielektrik
$d$	=	Jarak antara positron dengan elektron

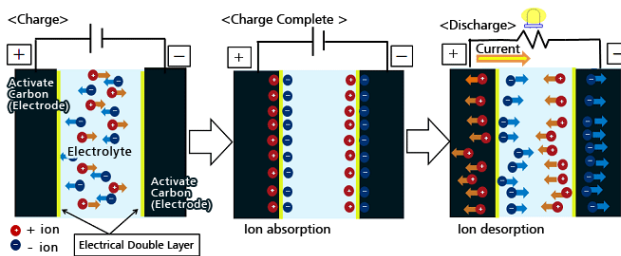
Dengan luas penampang elektroda yang tinggi, maka kapasitansi kapasitor super juga akan semakin besar. Sedangkan nilai kapasitansi berbanding terbalik dengan jarak antar elektroda, sehingga dengan semakin kecilnya jarak antar muatan semakin tinggi nilai kapasitansi. Bahan dielektrik juga mempengaruhi kualitas dari kapasitor super sebagai media transfer muatan antar elektroda. Semakin konduktif elektrolit yang digunakan, maka semakin aktif juga dalam proses transfer muatan.

Perbedaan kapasitor super (kanan) dengan kapasitor konvensional (kiri) pada gambar 2.2 terletak pada muatan positif di kapasitor konvensional 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 [9].

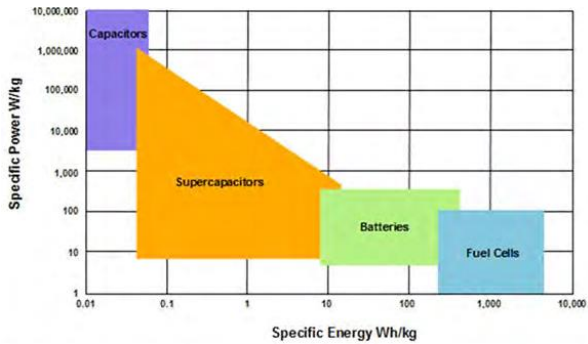


**Gambar 2. 2** Perbedaan muatan pada kapasitor dengan kapasitor super [9].

Pada kapasitor super didasari pada prinsip kerja dari lapisan listrik ganda yang terbentuk pada antar permukaan lapisan antara karbon aktif dan elektrolit sebagai dielektrik. Adanya mekanisme absorpsi dan desorpsi ion pada kedua layer elektroda karbon aktif berperan dalam pengisian dan pengosongan kapasitor super. Dengan memberikan tegangan pada elektroda yang saling berhadapan maka ion akan tertarik ke permukaan kedua elektroda dan terjadilah proses pengisian atau pengisian. Sebaliknya, ion akan bergerak menjauh saat kapasitor super digunakan [9]. Proses pengisian and pemakaian dari kapasitor super dapat dilihat pada Gambar 2.3.



**Gambar 2. 3** Skema proses pengisian dan pemakaian pada kapasitor super [9]



**Gambar 2. 4** Perbandingan sifat berbagai jenis sistem penyimpanan energi. [10]

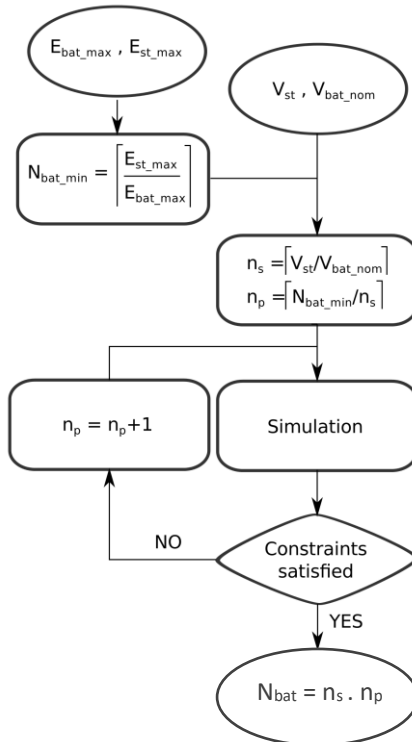
Kapasitor super telah mampu menarik banyak perhatian karena densitas dayanya yang lebih tinggi dan siklus hidupnya yang lebih panjang jika dibandingkan dengan baterai, dan densitas energinya yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan kapasitor konvensional (elektrolitik).

### 2.3 Penentuan Kapasitas Sistem Penyimpanan Energi

Penentuan kapasitas adalah proses menentukan banyaknya sel yang akan dirangkai baik secara seri ataupun paralel oleh penyimpan energi guna memenuhi kebutuhan dari sebuah sistem.

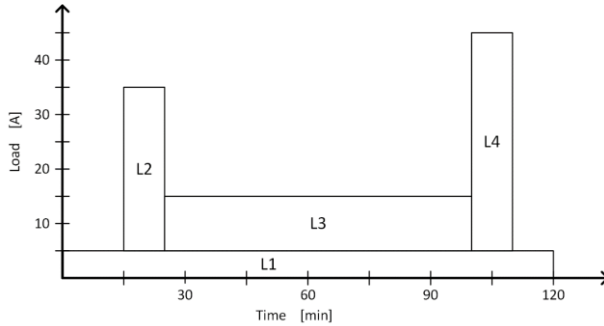
### 2.3.1 Penentuan Kapasitas pada Baterai

Algoritma penentuan kapasitas pada baterai adalah sebagai berikut



**Gambar 2. 5** Algoritma penentuan kapasitas pada baterai [11].

Langkah pertama adalah menentukan besar tegangan ( $V_{st}$ ) dan energi ( $E_{st\_max}$ ) yang dibutuhkan oleh sistem. Saat menghitung energi akan lebih mudah jika memetakan beban menggunakan grafik siklus kerja (*duty cycle*). Sumbu x mengartikan waktu dan sumbu y mengartikan besar beban. Besar energi yang dibutuhkan oleh sistem adalah luasan yang di bawah kurva.



**Gambar 2. 6** Grafik siklus kerja

Hitung jumlah baterai minimum ( $N_{bat\_min}$ ) dengan cara membagi nilai energi ( $E_{st\_max}$ ) yang telah dihitung sebelumnya dengan nilai energi maksimal ( $E_{bat\_max}$ ) pada spesifikasi baterai yang telah dipilih. Setiap baterai memiliki spesifikasi yang berbeda tergantung manufaktur dan seri dari masing-masing baterai.

$$N_{bat\_min} = \frac{E_{st\_max}}{E_{bat\_max}} \quad (2.3)$$

Langkah selanjutnya adalah menghitung banyaknya seri dan paralel baterai dengan rumus sebagai berikut.

$$N_s = \frac{V_{st}}{V_{bat\_max}} \quad (2.4)$$

Keterangan :

- $N_s$  = Banyaknya sel/modul baterai seri
- $V_{st}$  = Tegangan baterai yang diinginkan (sama dengan tegangan sistem jika tanpa menggunakan converter)
- $V_{bat\_max}$  = Tegangan kerja sel/modul baterai

$$N_p = \frac{N_{bat\_min}}{N_s} \quad (2.5)$$

Keterangan :

- $N_p$  = Banyaknya sel/modul baterai paralel
- $N_{bat\_min}$  = Jumlah baterai minimum
- $N_s$  = Banyaknya sel/modul baterai seri

Jika hasil penentuan kapasitas belum cocok maka harus dilakukan penambahan  $N_p$  dan diiterasi sampai ditemukan hasil penentuan kapasitas yang benar. salah satu yang menjadi alasan baterai belum benar adalah baterai belum dapat mensuplai daya puncak sehingga dibutuhkan penambahan kapasitas pada baterai khususnya pada parameter  $N_p$ .

### 2.3.2 Penentuan Kapasitas pada Kapasitor Super

Proses penentuan kapasitas pada kapasitor super tidak jauh berbeda dengan baterai. Perbedaannya terletak pada saat langkah mencari  $N_p$ . Baterai menggunakan satuan Ah untuk menyatakan kapasitas sedangkan superkapasitor menggunakan Farad. Sehingga pada penentuan kapasitas kapasitor super Energi yang dibutuhkan sistem ( $E_{st\_max}$ ) harus dikonversi kebentuk farad menggunakan rumus berikut.

$$E = \frac{1}{2} \times C_{system} \times (V_o^2 - V_{min}^2) \quad (2.6)$$

Keterangan :

- $C$  = Kapasitas kapasitor super (F)
- $E$  = Energi yang dapat disimpan dalam kapasitor super (joule)
- $V_o$  = Tegangan kapasitor super saat penuh
- $V_{min}$  = Tegangan kapasitor super saat kosong

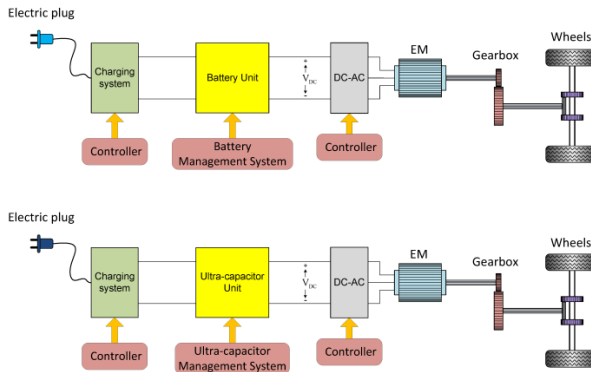
Pada paramater  $V_{min}$  dari kapasitor super dapat ditentukan dengan melihat tegangan minimum agar dapat bekerja (seringnya 50% dari  $V_o$ ) [12]. Kemudian untuk menghitung  $N_p$  pada kapasitor super menggunakan rumus sebagai berikut.

$$C_{system} = C_{cel} \frac{N_p}{N_s} \quad (2.7)$$

Terlihat dari persamaan (2.7) bahwa kapasistas sistem ( $C_{system}$ ) berbanding terbalik dengan  $N_s$ . Sehingga ketika tegangan kapasitor super dinaikan (rangkain seri ditambah) maka akan terjadi penurunan kapasitas energi yang mampu ditampung oleh superkapasitor. Hal tersebut berbeda dengan baterai yang ketika rangkaian serinya ditambah maka akan dibarengi dengan bertambahnya kapasitas energi yang dapat ditampung.

## 2.4 Topologi Sistem Bus Listrik

Secara sederhana sistem kendaraan listrik terdiri dari sistem penyimpanan energi, driver motor, dan motor penggerak. Beberapa sistem penyimpanan energi yang umum digunakan adalah kapasitor super (ultrakapasitor), baterai, dan fuelsel. Driver motor yang digunakan bergantung pada jenis motor yang dipilih. Bus listrik memiliki umur harapan sekitar 10-12 tahun [1]. Gambar 2.7 menunjukkan topologi sistem pada bus elektrik dengan penyimpanan energi tunggal.



**Gambar 2. 7** Topologi sistem pada bus listrik [2]

Motor yang umumnya digunakan pada bus listrik adalah Permanent Magnet Synchronous Motor (PSMS). Motor ini mirip dengan motor Brushless DC Motor (BLDC) yang memiliki magnet permanen pada rotor. Perbedaannya PSMS memiliki EMF back berbentuk gelombang sinusoidal sedangkan BLDC trapesium. Jenis motor ini tersedia dengan spesifikasi daya yang tinggi sehingga cocok diterapkan pada bus atau mobil. Motor sinkron memiliki efisiensi yang lebih tinggi di kecepatan yang rendah dan meningkatkan pemanfaatan baterai dan

rentang berkendara [13]. Karena input motor PSMS berupa listrik bolak-balik (AC) maka diperlukan inverter untuk merubah listrik searah (DC) dari sistem penyimpanan energi menjadi listrik bolak-balik.

Bus listrik dengan kapasitor super tidak perlu khawatir tentang pergantian modul karena memiliki Masa hidup yang lama. Meskipun lebih mahal, kapasitor super memiliki umur harapan 10 tahun, sedangkan baterai hanya 3 tahun [14]. Selain itu bus dengan kapasitor super mampu menyerap daya regenerative lebih besar ketika pengereman, khususnya ketika bus dimuati beban yang besar pada lalu lintas kota. Sedangkan bus dengan baterai akan mengalami fluktuansi daya ketika dimuati beban yang besar sehingga dapat memperpendek umur baterai. Namun karena memiliki kerapatan energi yang rendah, bus akan memerlukan stasiun pengisian yang cukup banyak untuk menempuh jarak yang jauh [2]. Bus dengan kapasitor super juga memiliki kelebihan lain diantaranya memiliki temperatur kerja yang lebih luas, *self-discharge* yang rendah, lebih aman, serta lebih kecil dalam dimensi dan berat [1].

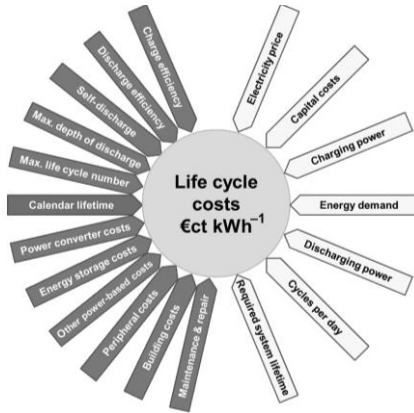
## **2.5 Analisis Kelayakan Ekonomi**

### **2.5.1 Life Cycle Cost (LCC)**

Teknologi memiliki karakteristik yang berbeda-beda baik secara efisiensi, umur, dan lain-lain. Untuk menentukan dan membandingkan teknologi yang paling ekonomis maka tidak bisa langsung ditarik kesimpulan dari harga awal saja. Bisa saja teknologi yang memakan biaya awal mahal namun memiliki efisiensi yang tinggi akan menjadi ekonomis setelah bertahun-tahun pemakaian. *Life Cycle Cost* adalah total biaya yang dikeluarkan sepanjang siklus hidup suatu sistem yang langsung berhubungan dengan biaya kepemilikan selama umur ekonomis [15]. Semua parameter yang perlu dipertimbangkan dalam menghitung LCC ada dalam gambar 2.8.

Parameter yang berwarna abu-abu berhubungan dengan karakteristik teknologi penyimpanan, sedangkan yang berwarna putih berhubungan dengan karakteristik pada aplikasinya. Keuntungan yang dihasilkan oleh sistem tidak diperhitungkan dalam LCC. LCC dalam bus listrik mencakup biaya investasi, biaya operasional, biaya perawatan, dan biaya pergantian [16]. Rumus LCC ditunjukkan pada persamaan (2.8).

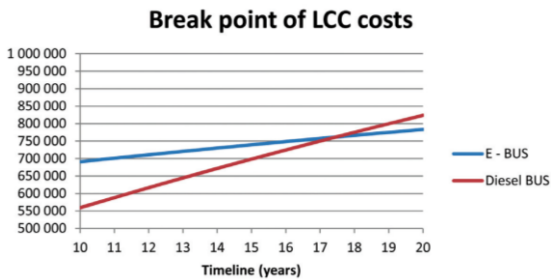




**Gambar 2. 8** Parameter pertimbangan dalam LCC [15]

$$LCC = \sum_1^n Cost_{int} + Cost_m + Cost_{op} + Cost_R \quad (2.8)$$

Perhitungan pada metode ini dilakukan dengan menjumlah kebutuhan setiap tahun sampai dengan batas umur bus. Hasil LCC disajikan dalam bentuk grafik perbandingan sehingga dapat dilihat *break point LCC* dan dapat ditarik kesimpulan teknologi mana yang paling ekonomis.



**Gambar 2. 9** Contoh break point pada perhitungan LCC [16]

### 2.5.2 *Net Present Value (NPV)*

Pada faktanya uang 10 juta di tahun sekarang tidak akan sama dengan nilai uang 10 juta di 10 tahun yang akan datang. Oleh sebab nilai uang di masa depan harus dikonversi ke dalam nilai uang masa sekarang agar analisis ekonominya relevan [17].

$$P = \frac{F}{(1 + i)^n} \quad (2.9)$$

Keterangan :

$P$	=	Nilai uang di masa sekarang
$F$	=	Nilai uang di masa depan
$i$	=	Suku bunga
$n$	=	Periode tahun

NPV menggunakan diagram aliran kas untuk menghitung selisih antara nilai sekarang dari aliran kas yang masuk dengan nilai sekarang dari aliran kas yang keluar pada periode waktu tertentu.

Langkah pertama adalah menghitung total pengeluaran per tahun dan pemasukan per tahun. Kemudian tahap kedua adalah dengan menjumlahkan masing-masing antara jumlah keduanya lalu dikonversi ke nilai uang sekarang. Lakukan berulang sampai tahun yang akan dijadikan batas akhir. Jika hasil akhir bernilai positif maka dinilai layak secara ekonomi, namun jika hasilnya negatif maka tidak layak dari segi ekonomi dan investasi dianggap gagal.

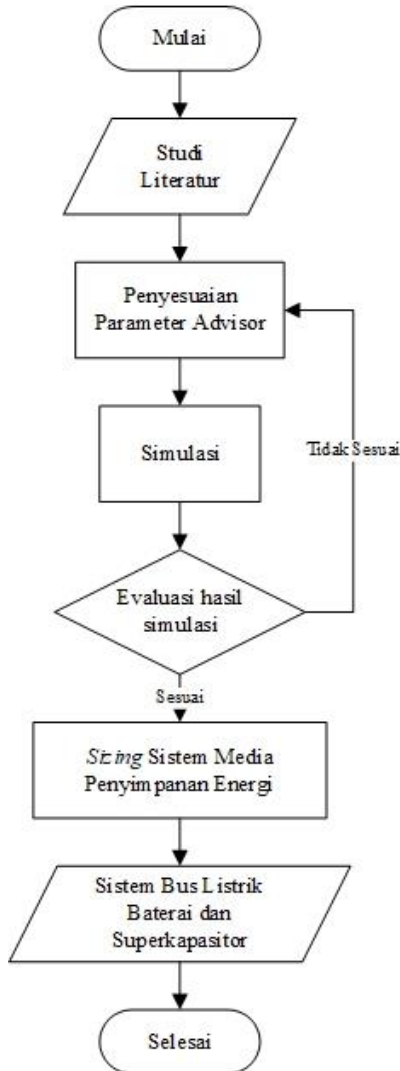
## **BAB 3**

### **PEMODELAN SISTEM DAN SIMULASI**

Dalam bab ini akan dijelaskan tentang proses pemodelan sistem bus listrik ke dalam program ADVISOR 2.0. Data bus listrik menggunakan referensi bus BYD K9 yang didapat dari proses studi literatur. Setiap parameter dari komponen bus dimasukkan dalam program advisor dengan cara mengubah file yang sudah ada. Setelah dilakukan simulasi, kemudian dilakukan perhitungan penentuan kapasitas untuk menentukan besarnya sistem penyimpan energi yang dibutuhkan.

Dalam pemaparan pada bab ini, terdapat beberapa sub-sub bab yang menjelaskan detail dari penyesuaian parameter kendaraan hingga penentuan kapasitas sistem penyimpan energi. Pada sub-bab 3.1 dijelaskan tentang diagram alur pemodelan sistem bus listrik. Penjelasan tentang penyesuaian parameter bus listrik dimuat dalam sub-bab 3.2. Selanjutnya pada sub-bab 3.3 memaparkan proses penentuan kapasitas pada kapasitor super dan baterai.

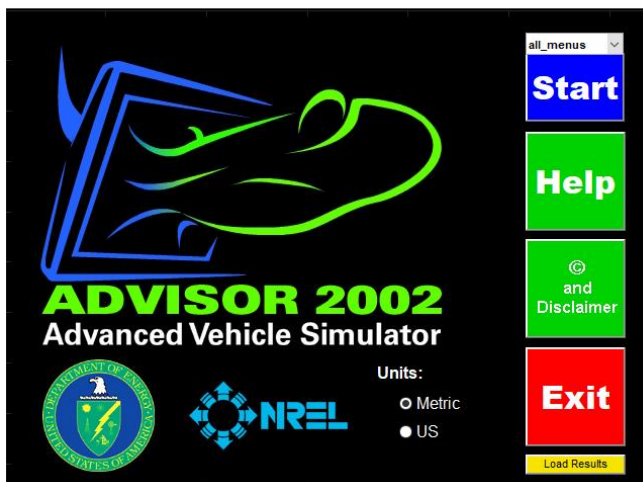
### 3.1 Diagram Alur Pemodelan Sistem Bus Listrik



**Gambar 3. 1** Diagram alur pemodelan sistem bus listrik

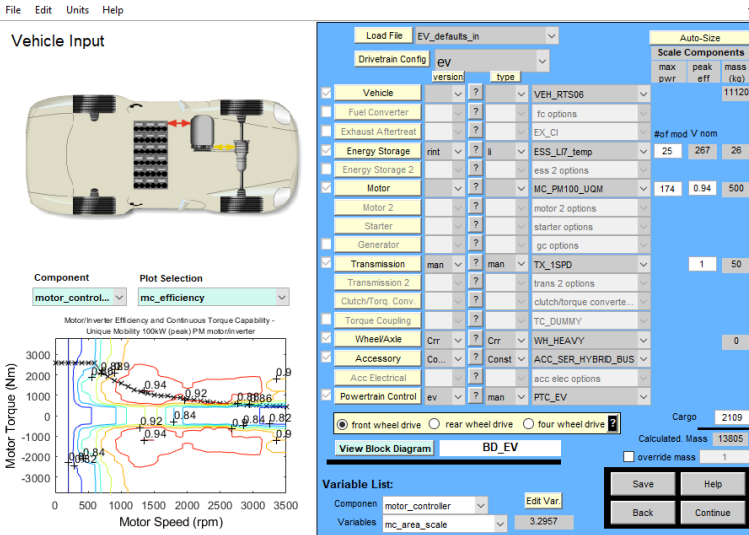
### 3.2 Penyesuaian Parameter Bus Listrik dalam Advisor

Spesifikasi dari sistem bus yang ada dimodelkan dalam program ADVISOR yang dijalankan melalui aplikasi MATLAB 2019b. Berikut pada gambar 3.2 adalah tampilan pertama ADVISOR.



**Gambar 3. 2** Tampilan halaman awal ADVISOR

Pada gambar 3.3 merupakan halaman input pertama ADVISOR bertujuan untuk memodelkan kendaraan yang akan digunakan dalam simulasi. Ada beberapa parameter yang harus dipilih, untuk mobil listrik ADVISOR hanya memerlukan *vehicle*, *energy storage*, *motor*, *transmission*, *wheel/axel*, *accessory*, dan *powertrain control*. Dalam program advisor sudah ada beberapa *templat* dari parameter-parameter tersebut. Dalam studi ini akan dilakukan penyesuaian pada parameter *vehicle* dan *motor*, sedangkan parameter sisanya mengikuti dipilih templat yang sudah ada pada ADVISOR. Penyesuaian parameter *vehicle* akan dibahas pada sub-sub bab 3.2.1, sedangkan *motor* pada sub-sub bab 3.2.2.



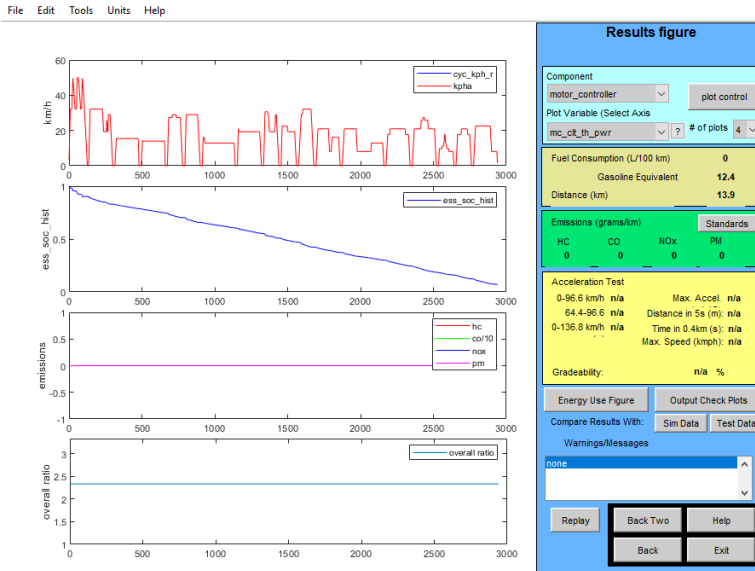
**Gambar 3.3** Halaman pertama inputan ADVISOR

Pada gambar 3.4 merupakan halaman kedua inputan pada ADVISOR yang berupa siklus berkendara. Secara umum siklus berkendara merupakan perubahan nilai kecepatan setiap satuan waktu untuk menempuh suatu jarak tertentu. Contoh pada gambar 3.4 merupakan siklus berkendara dari bus new york. Bisa dilihat bahwa bus tersebut menempuh jarak 0.99 km dengan waktu 600 detik. Untuk detail perubahan kecepatan tiap detiknya ditampilkan pada grafik berwarna hijau. Pada studi ini akan disesuaikan siklus berkendara dengan rute bus transjakarta yang akan dibahas pada sub-sub bab 3.2.3.



**Gambar 3. 4** Halaman kedua inputan ADVISOR

Setelah melakukan input pada halaman pertama dan kedua akan didapat halaman hasil simulasi seperti gambar 3.5. Dalam halaman ini bisa dilihat perbandingan grafik kecepatan kendaraan dengan siklus berkendara. Ketika dua grafik ini berhimpit maka dapat dikatakan bahwa parameter kendaraan yang dipilih pada halaman pertama dapat mengikuti siklus berkendara yang dipilih pada halaman kedua. Selain itu dapat juga diamati beberapa parameter dari *motor*, *energy storage*, *powertrain* dan sebagainya. Pada studi ini hanya berfokus pada hasil daya dan energi yang diminta pada *energy storage*. Pada halaman ketiga juga dapat diamati peringatan bahwa ada hasil yang melebihi batas seperti limit tegangan atau limit torsi. Peringatan inilah yang digunakan untuk mengevaluasi hasil simulasi. Ketika ada parameter yang melebihi batas maka harus dilakukan penyesuaian ulang pada parameter kendaraan atau siklus berkendara.



**Gambar 3. 5** Halaman hasil simulasi ADVISOR

### 3.2.1 Spesifikasi Fisik Bus

Model bus yang dipilih untuk dianalisis dalam studi ini adalah BYD bertipe K9. Manufaktur bus dari negeri tirai bambu ini memiliki spesifikasi fisik seperti pada tabel 3.1.

**Tabel 3. 1** Tabel dimensi fisik bus

Panjang	12.200	mm
Lebar	2.550	mm
Tinggi	3.370	mm
Turning circle	23,5	m
Wheelbase	5.900	mm
Boarding Height	325/340/340	mm



Bus ini memiliki kapasitas 60 penumpang ditambah 1 sopir. Penyesuaian spesifikasi dilakukan dengan mengubah parameter pada file templat yang sudah ada pada program ADVISOR.

### 3.2.2 Spesifikasi Motor Bus

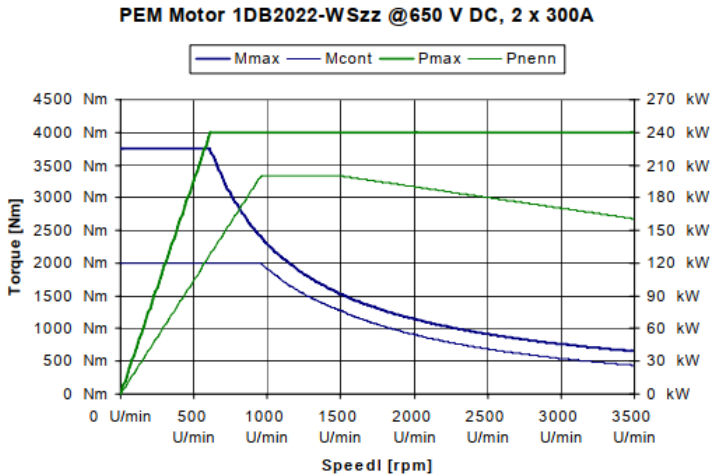
Sistem penggerak bus pada umumnya menggunakan *Permanent Magnet Synchronous Motor* (PSMS). Bus BYD K9 digerakan menggunakan PSMS berdaya 200kW, namun tidak disebutkan dengan pasti manufaktur yang digunakan. Dalam studi ini digunakan referensi motor dari bus listrik pabrikan Chariot Motor yang menggunakan manufaktur motor siemens dengan seri PEM-Motor 1DB2022.



Type	PM Synch. Motor
Cooling Media	Water-Glycol
Rated Voltage DC	650 V
Rated Power	200 KW @ 1500 rpm
Rated Torque	2000 Nm @ 320 A
Max. Torque	3800 Nm @ 600A
Rated Current	300 A
Max. Speed	3.500 rpm
Weight	480 kg
Dim. (LxWxH)	620 x 510 x 500 mm
Ambient Temperature	- 30 °C to 70 °C
Degree of Protection	IP 65 / 9k

**Gambar 3. 6** Spesifikasi PEM-Motor 1DB2022.

Tegangan, arus, berat pada advisor pada gambar 3.6 dimasukan dalam program advisor “MC\_PM\_100\_UQM”. Selain itu pada program motor tersebut dimasukan karakteristik torsi dan kecepatan seperti pada gambar 3.7. Dengan memasukan nilai tersebut akan ada batas pada torsi dan kecepatan sehingga dibatasi pula daya yang dikeluarkan oleh motor. Ketika daya yang direquest melebihi dari kemampuan motor maka perlu dilakukan evaluasi baik dari parameter pada halaman input pertama atau kedua.



**Gambar 3. 7** Karakteristik torsi dan kecepatan pada PEM-Motor 1DB2022.

### 3.2.3 Pemodelan Siklus Berkendara

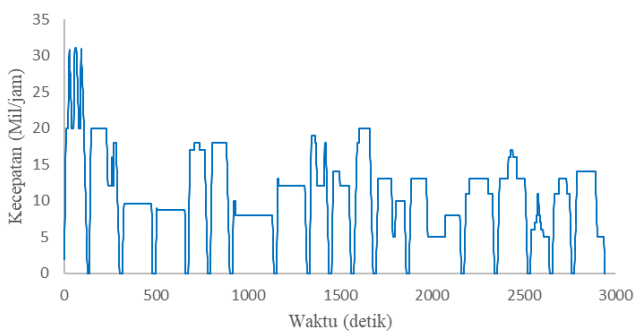
Transjakarta memiliki rute yang cukup banyak. Rute yang dipilih yaitu jurusan Blok M – Kota dengan jarak 13.9 km dan waktu tempuh 49 menit. Rute ini dianggap cukup vital karena berada di tengah-tengah kota. Waktu dan jarak per halte dirincikan dalam tabel 3.2.

Dalam teori gerak ada 3 parameter yang saling berhubungan yaitu jarak, waktu dan kecepatan. Ketika 2 dari 3 parameter tersebut sudah diketahui maka parameter yang tersisa dapat dicari. Siklus berkendara pada advisor menggunakan matriks 2 kolom (kolom pertama waktu, kolom kedua kecepatan). Pembuatan siklus berkendara pada rute transjakarta dilakukan dengan mengubah kecepatan setiap detik pada kolom matriks kecepatan yang kemudian disesuaikan dengan waktu dan jarak antar halte sesuai dengan tabel 3.2. Hasil pemodelan siklus berkendara dapat dilihat di gambar 3.8 dengan rinciannya pada tabel 3.3.

**Tabel 3. 2** Jarak dan waktu tempuh bus antar halte. [18]

Halte	Jarak (m)	Waktu (menit)
Blok M – Masji Agung	1.500	2
Masjid Agung – Bundaran Senayan	1.000	3
Bundaran Senayan – GBK	750	3
GBK – Polda Metro Jaya	700	3
Polda Metro Jaya – Bendungan Hilir	850	2
Bendungan Hilir – Karet Sudirman	1.100	2
Karet Sudirman – Dukuh Atas 1	1.100	4
Dukuh Atas 1 - Tosari	850	3
Tosari – Bundaran HI	700	2
Bundaran HI – Sarinah	700	2
Sarinah – Bank Indonesia	750	2
Bank Indonesia – Monumen Nasional	750	3
Monumen Nasional – Harmoni	1.050	5
Harmoni – Sawah Besar	850	3
Sawah Besar – Mangga Besar	950	3
Mangga Besar - Olimo	280	2
Olimo – Glodok	500	2
Glodok - Kota	800	3

Drive Cycle Transjakarta



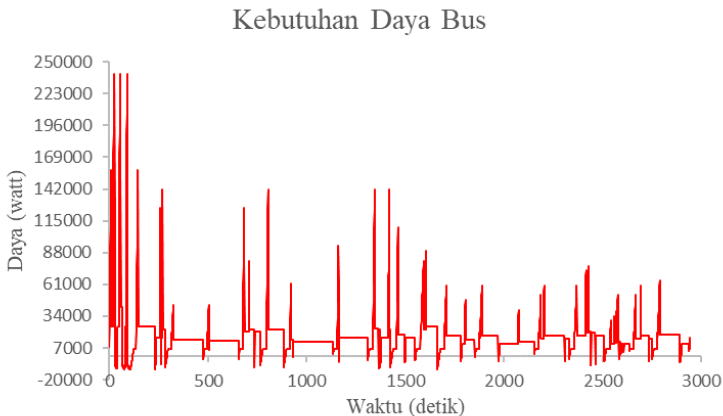
**Gambar 3. 8** Grafik siklus berkendara

**Tabel 3. 3** Data siklus berkendara

Waktu	2940 s
Jarak Tempuh	13,9 km
Kecepatan Maksimum	50 km/jam
Kecepatan Rata-rata	17,02 km/jam
Akselerasi Maksimum	0,89 m/det <sup>2</sup>
Deselerasi Maksimum	-0,89 m/det <sup>2</sup>
Akselerasi Rata-rata	0,6 m/det <sup>2</sup>
Deselerasi Rata-rata	-0,44 m/det <sup>2</sup>
Total waktu berhenti (Idle)	267 det
Jumlah Perhentian	18

### 3.2.4 Simulasi Advisor

Simulasi ini menghasilkan data seberapa besar parameter yang dibutuhkan kendaraan untuk menempuh siklus berkendara. Data ini digunakan dalam tahap penentuan kapasitas sistem penyimpanan energi.



**Gambar 3. 9** Kebutuhan daya bus

Dari gambar 3.9 terlihat bahwa untuk menempuh 1 kali rute perjalanan dibutuhkan daya sebesar 14,12 kWh dan terdapat puncak daya

sebesar 239,94 kW. Dengan data daya yang dibutuhkan di atas kebutuhan arus dapat dicari dengan membagi menggunakan tegangan motor.

### 3.3 Penentuan Kapasitas Sistem Penyimpan Energi

Dalam proses penentuan kapasitas sistem penyimpan energi kita harus menentukan jumlah modul yang dibutuhkan dalam rangkaian seri dan paralel. Sel dirangkai seri untuk memenuhi kebutuhan tegangan sedangkan sel dirangkai parallel untuk memenuhi kebutuhan arus dan energi.

#### 3.3.1 Penentuan Kapasitas Baterai

Dalam studi ini, proses penentuan kapasitas dipilih baterai dari manufaktur BYD B-Plus 2.5 yang sudah umum diterapkan di bus listrik [19]. Spesifikasi sesuai datasheet dirangkum dalam tabel 3.4.

**Tabel 3. 4** Spesifikasi baterai BYD B-Plus 2.5.

Tegangan	51,2	V
Kapasitas	50	Ah
Energi	2,45	kWh
Keluaran Daya Maksimal	2,56	kW
Berat	34	kg

Sebelumnya telah dipilih motor dengan nomor seri PEM-Motor 1DB2022 yang memiliki tegangan 650 V. Sesuai dengan topologi bus listrik pada gambar 2.1 maka jumlah tegangan baterai yang dipasang seri harus sesuai dengan tegangan motor. Sehingga, jumlah baterai yang dipasang secara seri adalah seperti persamaan 3.1.

$$Seri (N_s) = \frac{V_{rated}}{V_{modul}} = \frac{650}{51,2} = 12,69 \approx 13 \quad (3.1)$$

Jumlah baterai yang harus dipasang secara seri supaya tegangannya sama dengan motor adalah 13 modul baterai.

Dilansir dari halaman online resmi milik PT Transjakarta, Rute Blok M – Kota beroperasi dari pukul 06.00 sampai 18.00 WIB [20]. Dengan kata lain dalam 1 hari bus transjakarta menempuh 15 kali rute perjalanan. Untuk menempuh jarak 208,5 km diperlukan energi sejumlah 211,8 kWh. Setiap modul baterai BYD memiliki kWh sebesar 2,45 kWh.

Sehingga total energi yang disediakan oleh 13 modul baterai adalah sebesar 31,85 kWh. Jumlah ini masih belum mencukupi kebutuhan energi yang diminta, sehingga perlu ditambahkan jumlah modul baterai pada bagian paralel dengan perhitungan sebagai berikut

$$\begin{aligned} \text{Paralel } (N_p) &= \frac{\text{Kebutuhan energi}}{\text{Energi pada modul seri}} & (3.2) \\ &= \frac{211,8}{31,85} = 6,64 \approx 7 \end{aligned}$$

Dengan menambahkan 7 paralel maka total jumlah modul menjadi 91 buah. Nilai tegangan, kapasitas, energi, daya maksimal dan berat dari jumlah modul tersebut dirangkum dalam tabel 3.5.

**Tabel 3. 5** Spesifikasi baterai setelah proses penentuan kapasitas.

Paramater	Hasil penentuan kapasitas	Nilai minimal yang Diperlukan
Tegangan (V)	656,6	650
Kapasitas (Ah)	350	325,87
Energi (kWh)	222,95	211,83
Keluaran daya maksimal (kW)	226,24	239,94
Berat (kg)	3.094	-

Melalui tabel 3.10 dapat disimpulkan konfigurasi baterai 13 seri 7 paralel sudah dapat memenuhi prinsip keseimbangan energi namun masih belum bisa memenuhi prinsip keseimbangan daya. Untuk itu diperlukan penambahan jumlah paralel sebagai koreksi agar daya yang dibutuhkan dapat terpenuhi. Maka dilakukan perhitungan sebagai berikut

$$\text{Paralel} = \frac{P_{\text{requested}}}{\text{Seri} \times P_{\text{max modul}}} = \frac{239,94}{13 \times 2,5} = 7,38 \approx 8 \quad (3.3)$$

Setelah konfigurasi baterai mempertimbangkan prinsip keseimbangan daya konfigurasi baterai dikoreksi menjadi 13 seri 8 paralel. Spesifikasi baterai setelah koreksi dirangkum dalam tabel 3.6.

**Tabel 3. 6** Spesifikasi baterai setelah koreksi prinsip keseimbangan daya.

Paramater	Hasil penentuan kapasitas	Nilai minimal yang Diperlukan	
Tegangan (V)	656,6	650	
Kapasitas (Ah)	400	325,87	
Energi (kWh)	254,68	211,83	
Keluaran daya maksimal (kW)	266,24	239,94	
Berat (kg)	3536	-	

Dapat disimpulkan bahwa dengan nilai diatas konfigurasi baterai seri 13 paralel 9 sudah mencukupi kebutuhan kendaraan baik dari tegangan, energi, dan daya.

### 3.3.2 Penentuan Kapasitas Kapasitor super

Dalam studi ini, proses penentuan kapasitas kapasitor super menggunakan manufaktur maxwell dengan tipe seri BMOD0165P048C01 [21]. Spesifikasi modul kapasitor super dirangkum dalam tabel 3.7 sebagai berikut.

**Tabel 3. 7** Spesifikasi kapasitor super maxwell.

Tegangan	48	V
Kapasitas	165	F
Energi	0,053	kWh
Keluaran daya maksimal	91,2	kW
Berat	14,2	kg

Sesuai dengan topologi bus pada gambar 2.2, pada studi ini tidak dipilih konverter DC-DC, sehingga tegangan kapasitor super harus sesuai dengan tegangan motor. Perhitungan untuk menyesuaikan kapasitor super dengan motor adalah sebagai berikut.

$$Seri = \frac{V_{rated}}{V_{modul}} = \frac{650}{48} = 13,5 \approx 14 \quad (3.4)$$

Dengan demikian diperlukan 14 buah modul dipasang seri agar dapat memiliki tegangan yang sama dengan motor.

Karena pada topologi bus tidak menggunakan konverter DC-DC, maka batas minimal tegangan untuk kapasitor super harus ditentukan. Semakin tinggi nilai batas minimal tegangan maka semakin tinggi pula kapasitas (F) yang dibutuhkan sistem. Dalam studi ini menggunakan 50% dari tegangan maksimal yang merujuk pada paper [12].

Berbeda dengan baterai, pada kapasitor super energinya akan diisi setelah menempuh satu rute perjalanan, sehingga jumlah energi yang dibutuhkan untuk penentuan kapasitas hanya sebesar 14.12 kWh. Lama *pengisian* pada halte di asumsikan pada kapasitor super berkisar antara 0,5-1 menit menggunakan pengisi (*charger*) berjenis *fast-charging* [22]. Perhitungan untuk memenuhi energi tersebut adalah sebagai berikut.

$$E = \frac{C (V_{max}^2 - V_{min}^2)}{2} \quad (3.5)$$

$$C = 320,86 F$$

Dari perhitungan diatas diketahui bahwa sistem dari bus membutuhkan kapasitansi listrik sebesar 320,86 F. Nilai ini harus dipenuhi dengan merangkai modul kapasitor super secara paralel. Perhitungan untuk mencari jumlah modul kapasitor super yang harus di paralel adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned} \text{Paralel } (N_p) &= \frac{C_{system} \times \text{Seri}}{C_{cell}} \quad (3.6) \\ &= \frac{320,86 \times 14}{165} = 27,22 \approx 28 \end{aligned}$$

Dari perhitungan di atas konfigurasi kapasitor super untuk memenuhi kebutuhan sistem adalah 14 seri 28 paralel. Modul kapasitor super berjumlah 392 buah yang spesifikasinya dirangkum dalam tabel 3.8 sebagai berikut.



**Tabel 3. 8** Spesifikasi kapasitor super setelah melalui proses penentuan kapasitas

Paramater	Hasil penentuan kapasitas	Nilai minimal yang Diperlukan
Teganan (V)	672	650
Kapasitas (F)	330	320,86
Energi (kWh)	20,776	14,12
Keluaran Daya maksimal (kW)	35.750,4	274,02
Berat (kg)	5.566,4	-

Terlihat dari tabel 3.13 parameter tegangan, energi dan daya sudah bisa terpenuhi dengan kapasitor super dengan konfigurasi 14 seri 28 paralel.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini membahas tentang analisis kelayakan ekonomi berdasarkan pemodelan sistem dan hasil simulasi yang telah dilakukan. Analisis ekonomi menggunakan dua metode yaitu *Life Cycle Cost* (LCC) dan *Net Present Value* (NPV). Pada metode pertama yaitu LCC akan membandingkan biaya sistem baterai dan sistem kapasitor super. Kemudian sistem dengan biaya yang lebih ekonomis dialisis dengan menggunakan metode NPV. Jarak yang ditempuh oleh kedua sistem adalah sama yaitu sebesar 208,5 km. Dalam studi ini digunakan perhitungan nilai tukar rupiah berdasarkan nilai kurs beli pada tanggal 8 Juni 2020 yaitu sebesar 14.706 [23].

### 4.1 *Life Cycle Cost* (LCC)

Pada sub bab ini akan dilakukan analisis dan perhitungan kelayakan ekonomi menggunakan metode *Life Cycle Cost*. Tujuan dari metode ini adalah untuk membandingkan sistem penyimpan energi yang lebih ekonomis antara baterai dengan kapasitor super.

#### 4.1.1 Perhitungan Biaya Awal ( $Cost_{int}$ )

Biaya awal adalah harga yang harus dibayar saat investasi di tahun ke 0. Dalam studi ini, nilai biaya awal adalah biaya beli dari kapasitor super dan baterai. Dilansir dari situs jual online zerohomebills harga untuk 1 modul BYD B-Plus 2.5 adalah \$ 1294 atau Rp 19.029.564 [24]. Sedangkan dilansir dari situs jual online richardsonrfd 1 modul superkapastior BMOD0165P048C01 dihargai sebesar \$ 725 setara dengan Rp 10.661.850 [25]. Biaya baterai dan kapasitor super yang dibutuhkan untuk sistem bus dirangkum pada tabel 4.1.

**Tabel 4. 1** Rekapitulasi biaya biaya awal.

Parameter	Kapasitor super	Baterai
Jumlah modul	392	104
Manufaktur	Maxwell	BYD
Harga Modul	16.808.958	19.029.564
Total Harga	6.589.111.536	1.979.074.656

#### 4.1.2 Perhitungan Biaya Operasional dan Biaya Perawatan ( $Cost_{m\&o}$ )

Dalam paper [26] menggunakan O&M *cost* sebesar \$10/kW per tahun, dan mengalami pengurangan biaya menjadi \$8/kW per tahun pada tahun setelah 2025. Sehingga untuk biaya O&M *cost* pada bus baterai adalah sebesar Rp 35.294.400 dan Rp 28.235.520 setelah tahun 2025

Berbeda dengan jenis penyimpanan energi yang lain, kapasitor super memiliki O&M *cost* yang sangat rendah yaitu \$1/kW per tahun. Sehingga dalam studi ini biaya perawatan dan operasional untuk kapasitor super adalah sebesar Rp 3.529.440.

#### 4.1.3 Perhitungan Biaya Penggantian ( $Cost_R$ )

Biaya penggantian adalah biaya penggantian dari suatu barang saat habis masa pakainya. Biaya penggantian dalam studi ini yaitu berupa pergantian sistem penyimpanan energi. Masa hidup pada baterai diasumsikan 3 tahun sedangkan kapasitor super 10 tahun sesuai dengan paper [14]. Sehingga baterai akan mengalami 3 kali pergantian selama masa pakai bus (10 tahun). Di sisi lain harga baterai li-ion mengalami penurunan rata-rata sebesar 20% selama periode 2010 sampai 2018 [27]. Untuk itu perlu dihitung penurunan harga baterai dari tahun ke tahun menggunakan persamaan (4.1). Besar rata-rata inflasi di Indonesia sendiri adalah sebesar 5,94% dalam periode 2009 sampai 2018 [28]. Pada studi ini digunakan nilai inflasi sebesar 6%. Perhitungan penurunan harga baterai dirangkum dalam tabel 4.2.

$$C_R = [(1 - dr) \times C_{Batt(n-1)}] \times (1 + i) \quad (4.1)$$

Keterangan :

$C_R$	=	Harga baterai di tahun sekarang
$C_{Batt(n-1)}$	=	Harga baterai di tahun sebelumnya
$dr$	=	Tingkat depresiasi
$i$	=	Inflasi

**Tabel 4. 2** Penurunan harga baterai setiap tahun.

Tahun	Harga Baterai (Rp)
0	1.979.074.656
1	1.678.255.308
2	1.423.160.501
3	1.206.840.105
4	1.023.400.409
5	867.843.547
6	735.931.327
7	624.069.766
8	529.211.161
9	448.771.065
10	380.557.863

#### 4.1.4 Perhitungan dan Analisis *Life Cycle Cost* (LCC)

Perhitungan LCC pada studi ini menggunakan persamaan (4.2). Setelah mengalami perhitungan selama 10 tahun nilai LCC baterai dirangkum dalam tabel 4.3, sedangkan LCC kapasitor super pada 4.4.

$$LCC = \sum_1^{10} Cost_{int} + Cost_{m\&o} + Cost_R \quad (4.2)$$

**Tabel 4. 3** Rangkuman hasil perhitungan LCC sistem baterai

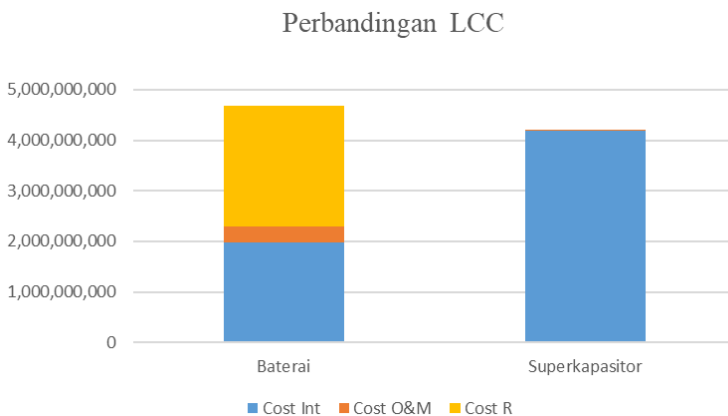
<b>Tahun</b>	<b>Cost Int</b>	<b>Cost O&amp;M (Rp)</b>	<b>Cost R (Rp)</b>	<b>LCC (Rp)</b>
0	2.226.458.988	0	0	1.979.074.656
1	0	35.294.400	0	2.014.369.056
2	0	35.294.400	0	2.049.663.456
3	0	35.294.400	1.357.695.118	3.291.797.961
4	0	35.294.400	0	3.327.092.361
5	0	28.235.520	0	3.355.327.881
6	0	28.235.520	827.922.744	4.119.494.729
7	0	28.235.520	0	4.147.730.249
8	0	28.235.520	0	4.175.965.769
9	0	28.235.520	504.867.448	4.652.972.354
10	0	28.235.520	0	4.681.207.874

**Tabel 4. 4** Rangkuman hasil perhitungan LCC sistem kapasitor super

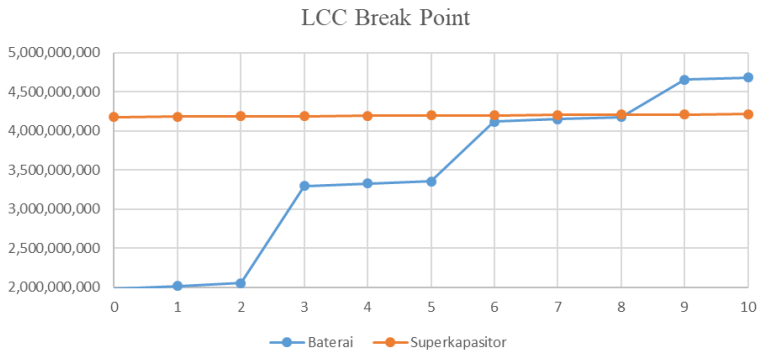
<b>Tahun</b>	<b>Cost Int</b>	<b>Cost O&amp;M (Rp)</b>	<b>Cost R (Rp)</b>	<b>LCC (Rp)</b>
0	4.179.445.200	0	0	4.179.445.200
1	0	3.529.440	0	4.182.974.640
2	0	3.529.440	0	4.186.504.080
3	0	3.529.440	0	4.190.033.520
4	0	3.529.440	0	4.193.562.960
5	0	3.529.440	0	4.197.092.400
6	0	3.529.440	0	4.200.621.840
7	0	3.529.440	0	4.204.151.280
8	0	3.529.440	0	4.207.680.720
9	0	3.529.440	0	4.211.210.160
10	0	3.529.440	0	4.214.739.600

Hasil perhitungan LCC diplot pada gambar 4.1 Terlihat bahwa LCC pada kapasitor super lebih rendah daripada baterai dalam kurun waktu 10 tahun pemakaian. Total LCC pada sistem bus baterai adalah sebesar Rp 4.681.207.874, sedangkan kapasitor super adalah Rp 4.214.739.600. Terdapat selisih sebesar Rp 446.795.418 antara kedua sistem atau dapat dikatakan sistem bus kapasitor super lebih hemat 9,96% dibandingkan sistem bus baterai.

Pada sistem baterai biaya penggantian menjadi biaya termahal, yaitu sebesar 51,08%. Biaya ini dinilai cukup besar karena terlihat dari gambar 4.2 terjadi kenaikan yang signifikan. *Break point* LCC terjadi saat baterai mengalami pergantian kedua yaitu pada tahun ke-9. Sedangkan pada sistem kapasitor super biaya investasi awal hampir 2 kali dari biaya sistem baterai, namun grafik LCC pada kapasitor super terlihat konstan karena biaya perawatan dan operasional yang murah dan tidak perlu pergantian modul selama masa pakai bus.



**Gambar 4. 1** Perbandingan biaya komponen LCC



**Gambar 4. 2** Perbandingan grafik LCC

## 4.2 *Net Present Value* (NPV)

Pada sub bab ini dilakukan perhitungan arus kas dengan mempertimbangkan *net present value* untuk mempertimbangkan apakah bus kapasitor super layak untuk diinvestasikan atau tidak. Dalam aliran kas juga dapat bisa dicari kapan periode pengembalian terjadi, yaitu jangka waktu untuk mengembalikan modal awal ditandai dengan aliran kas yang sebelumnya rugi (bernilai minus) menjadi untung (bernilai positif). Dalam metode ini biaya awal adalah harga bus kapasitor super. Karena tidak ditemukan referensi bus kapasitor super, maka harga bus kapasitor super diasumsikan dengan harga bus baterai namun penyimpanan energinya diganti kapasitor super dengan memperhitungkan biaya yang sudah dihitung pada tabel 4.1. Di pasaran harga bus listrik berkisar antara 2-3 yuan atau jika dikonversi ke rupiah menjadi 4-6 miliar . Dalam studi ini diambil nilai tengah 5 miliar, kemudian dengan mempertimbangkan biaya pergantian penyimpanan energinya harga bus menjadi Rp 6.952.986.212.

### 4.2.1 Perhitungan Pendapatan Bus

Pada 2019 bus transjakarta memiliki penumpang rata-rata 800.000 per hari. Namun tidak ditemukan data spesifik jumlah penumpang setiap halte, oleh karena itu dilakukan asumsi perhitungan untuk mengestimasi jumlah penumpang pada koridor 1. Transjakarta memiliki 261 halte, sedangkan rute koridor 1 memiliki 19 halte [20]. Bus pada koridor 1 diperkirakan berjumlah 15 yang masing-masing menempuh 15 kali rute



perjalanan dalam sehari. Perhitungan penumpang rata-rata pada koridor 1 adalah sebagai berikut.

$$\text{Penumpang koridor 1} = \frac{800.000 \times 19}{261 \times 15 \times 15} = 258,83 \approx 259 \quad (4.3)$$

Saat jam 05.00-07.00 bus transjakarta mematok tarif sebesar Rp. 2000, sedangkan saat jam 07.00-05.00 sebesar Rp.3500 [20]. Sehingga perhitungan pendapatan bus dalam sehari adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned} \text{Pendapatan} &= 235(2000 \times 1 + 3500 \times 14) \\ &= 13.209.000 \end{aligned} \quad (4.4)$$

#### 4.2.2 Perhitungan dan Analisa NPV

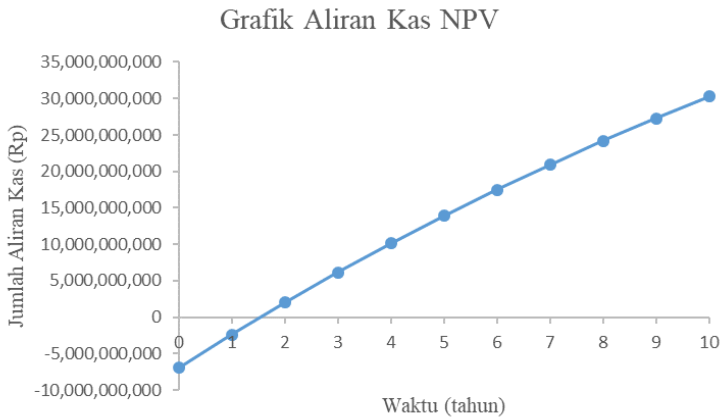
Pada sub bab ini dijabarkan perhitungan arus kas setiap tahun. *Discount rate* diasumsikan sebesar 5% mengacu pada suku bunga BI dalam 10 tahun terakhir [29]. Hasil perhitungan menggunakan persamaan (4.5) dirangkum dalam tabel 4.5.

$$\sum_{t=0}^{10} \frac{(\text{Cash in} - \text{Cash out})}{(1 + i)^t} \quad (4.5)$$

**Tabel 4. 5** Rangkuman hasil perhitungan aliran kas bus kapasitor super

Tahun	Cash in	Cash out	NPV Cash Flow	Cummulative
0	0	6.952.986.212	-6.952.986.212	-6.952.986.212
1	4.821.285.000	3.529.440	4.558.086.286	-2.394.899.926
2	4.821.285.000	3.529.440	4.341.034.558	2.005.198.729
3	4.821.285.000	3.529.440	4.134.318.626	6.166.957.123
4	4.821.285.000	3.529.440	3.937.446.311	10.130.536.545
5	4.821.285.000	3.529.440	3.755.479.685	13.905.374.090
6	4.821.285.000	3.529.440	3.576.647.319	17.500.457.466
7	4.821.285.000	3.529.440	3.406.330.780	20.924.346.396
8	4.821.285.000	3.529.440	3.244.124.552	24.185.192.995
9	4.821.285.000	3.529.440	3.089.642.431	27.290.761.185
10	4.821.285.000	3.529.440	2.942.516.601	30.248.445.176

Besar selisih pemasukan dan pengeluaran dikonversi dalam nilai uang tahun ke-0. Dengan kasus yang telah dibuat, dapat diamati pada gambar 4.4 bahwa periode pengembalian terjadi pada pertengahan tahun ke-2 dan keuntungan terus terjadi sampai berakhirnya masa pakai bus. Saat tahun ke-10 masa pakai bus sudah habis sehingga bus dinilai tidak layak untuk dipakai. Pergantian bus di tahun ke-10 bukan masalah melihat keuntungan yang ditunjukkan dalam aliran kas.



**Gambar 4.3** Grafik aliran kas NPV

## **BAB 5**

### **KESIMPULAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

Dari hasil penentuan kapasitas kapasitor super dan baterai serta analisis kelayakan ekonomi menggunakan metode *Life Cycle Cost* (LCC) dan *Net Present Value* (NPV) maka didapatkan beberapa kesimpulan, diantaranya :

1. Energi yang dibutuhkan sistem kapasitor super lebih rendah dibandingkan dengan sistem baterai karena perbedaan metode pengisian.
2. Modul pada sistem baterai diperlukan lebih banyak untuk memenuhi daya puncak yang dibutuhkan walaupun spesifikasi energinya sudah terpenuhi. Jumlah paralel modul baterai harus ditambah menjadi 8 dari sebelumnya yang hanya 7.
3. Hasil penentuan kapasitas kapasitor super menggunakan manufaktur maxwell lebih berat daripada hasil penentuan kapasitas baterai menggunakan baterai manufaktur BYD. Selisih berat keduanya yaitu sebesar 2030,4 kg.
4. Dengan umur bus 10 tahun, LCC pada kapasitor super lebih ekonomis 9,96% daripada baterai.
5. Sistem baterai memiliki kekurangan dalam segi biaya yaitu terdapat biaya pergantian, dan biaya perawatan dan operasional yang lebih mahal. Terbukti bahwa biaya pergantian pada baterai membuat perbedaan yang signifikan pada LCC. Sedangkan pada sistem kapasitor super investasi awal kapasitor super memakan biaya yang lebih mahal 52,64% dari sistem baterai.
6. Melalui metode NPV dapat disimpulkan bahwa bus kapasitor super layak diterapkan secara analisis ekonomi. Periode pengembalian terjadi pada pertengahan ke 2. Dengan keuntungan yang didapatkan pertahunnya, pergantian bus pada tahun ke 10 sangat memungkinkan untuk dilakukan.

#### **5.2 Saran**

Pada penelitian selanjutnya, diharapkan untuk dapat mempertimbangkan ketinggian pada pemodelan siklus berkendara sehingga didapatkan simulasi yang mendekati kenyataan di lapangan dan hasil dengan *error* yang lebih kecil.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Hnatov, S. Arhun, O. Ulyanets, and S. Ponikarovska, "Ultracapacitors Electrobus for Urban Transport," *2018 IEEE 38th Int. Conf. Electron. Nanotechnology, ELNANO 2018 - Proc.*, pp. 539–543, 2018.
- [2] A. Ostadi and M. Kazerani, "A Comparative Analysis of Optimal Sizing of Battery-Only, Ultracapacitor-Only, and Battery-Ultracapacitor Hybrid Energy Storage Systems for a City Bus," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 64, no. 10, pp. 4449–4460, 2015.
- [3] A. Burke and H. Zhao, "Applications of Supercapacitors in Electric and Hybrid Vehicles Applications UCD-ITS-RR-15-09," *5th Eur. Symp. Supercapacitor Hybrid Solut.*, no. April, pp. 1–20, 2015.
- [4] D. Linden and T. B. Reddy, [3rd edition] *Handbook\_Of\_Batteries.pdf*.
- [5] J. Warner, "Chapter 4 - Battery Pack Design Criteria and Selection," J. B. T.-T. H. of L.-I. B. P. D. Warner, Ed. Amsterdam: Elsevier, 2015, pp. 35–49.
- [6] V. Lystianingrum, B. Hredzak, and V. Agelidis, "Multiple model estimator based detection of abnormal cell overheating in a Li-ion battery string with minimum number of temperature sensors," *J. Power Sources*, vol. 273, Dec. 2014.
- [7] J. R. Miller, "Introduction to electrochemical capacitor technology," *IEEE Electr. Insul. Mag.*, vol. 26, no. 4, pp. 40–47, 2010.
- [8] New and D. Allen, "Double layer capacitors: automotive applications and modeling," Jan. 2004.
- [9] A. Sani, S. Siahaan, N. Mubarakah, and S. Suherman, "Supercapacitor performance evaluation in replacing battery based on charging and discharging current characteristics," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 309, p. 12078, Feb. 2018.
- [10] H. Kelly-Holmes, "Advertising as multilingual communication," *Advert. as Multiling. Commun.*, vol. 45, pp. 1–206, 2016.
- [11] M. G. Carignano, J. M. Cabello, and S. Junco, "Sizing and performance analysis of battery pack in electric vehicles," *2014 IEEE Bienn. Congr. Argentina, ARGENCON 2014*, pp. 240–244, 2014.
- [12] D. Petreus, D. Moga, R. Galatus, and R. A. Munteanu, "Modeling

- and sizing of supercapacitors,” *Adv. Electr. Comput. Eng.*, vol. 8, no. 2, pp. 15–22, 2008.
- [13] S. Ravindra Jape and A. Thosar, “Comparison of Electric Motors for Electric Vehicle Application,” *Int. J. Res. Eng. Technol.*, vol. 06, no. 09, pp. 12–17, 2017.
- [14] A. C. Baisden and 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, pp. 199–205, 2004.
- [15] T. Thien, T. Blank, B. Lunz, and D. U. Sauer, *Life Cycle Cost Calculation and Comparison for Different Reference Cases and Market Segments*. Elsevier B.V., 2015.
- [16] M. Potkány, M. Hlatká, M. Debnár, and J. Hanzl, “Comparison of the lifecycle cost structure of electric and diesel buses,” *Nase More*, vol. 65, no. 4 Special issue, pp. 270–275, 2018.
- [17] G. M. Masters, *Renewable and Efficient Electric Power Systems*. 2004.
- [18] “Trafik Jakarta - Info KRL & TransJakarta.” [Online]. Available: <https://web.trafik.com/id/jakarta/transjakarta>. [Accessed: 08-Jun-2020].
- [19] W. Flexible and T. B. Y. D. B-box, “The battery for all applications •••”
- [20] “PT Transportasi Jakarta – SMART Mobility for SMART City.” [Online]. Available: <https://www.transjakarta.co.id/>. [Accessed: 08-Jun-2020].
- [21] T. Applications, “DATASHEET NEW 48V MODULE FEATURES AND BENEFITS \* Hybrid vehicles PRODUCT SPECIFICATIONS NEW 48V MODULE PRODUCT SPECIFICATIONS ( Cont ’ d ),” pp. 1–5.
- [22] P. Bruge, U. Guida, M. G.-Z. project, undefined Brussels, and undefined 2016, “ZeEUS eBus Report An overview of electric buses in Europe.”
- [23] “Kurs Transaksi BI - Bank Sentral Republik Indonesia.” [Online]. Available: <https://www.bi.go.id/id/moneter/informasi-kurs/transaksi-bi/Default.aspx>. [Accessed: 08-Jun-2020].
- [24] “BYD B-PLUS 2.5 Battery Storage Module V2 (2.56 KWH) 100% DOD.” [Online]. Available: <https://zerohomebills.com/product/byd-b-plus-2-5-battery-storage-module-v2-2-56-kwh-100-dod/>. [Accessed: 08-Jun-

- 2020].
- [25] “BMOD0165P048C01 Maxwell Technologies.” [Online]. Available: <https://www.richardsonrfd.com/Products/Product/BMOD0165P048C01>. [Accessed: 08-Jun-2020].
- [26] K. Mongird *et al.*, “Energy storage technology and cost characterization report,” *Pacific Northwest Natl. Lab.*, no. July, pp. 1–120, 2019.
- [27] “A Behind the Scenes Take on Lithium-ion Battery Prices | BloombergNEF.” [Online]. Available: <https://about.bnef.com/blog/behind-scenes-take-lithium-ion-battery-prices/>. [Accessed: 08-Jun-2020].
- [28] “Data Inflasi - Bank Sentral Republik Indonesia.” [Online]. Available: <https://www.bi.go.id/id/moneter/inflasi/data/Default.aspx>. [Accessed: 08-Jun-2020].
- [29] “Suku Bunga SBI - Bank Sentral Republik Indonesia.” [Online]. Available: <https://www.bi.go.id/id/moneter/operasi/suku-bunga-sbi/Default.aspx>. [Accessed: 08-Jun-2020].

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



## LAMPIRAN

### Datasheet bus BYD K9

#### TECHNICAL DATA

Dimensions / Weight		LF 3 Doors	LF 2 Doors
L/W/H	mm	12.200/2.550/3.370	12.200/2.550/3.370
Wheelbase	mm	5,900	5,900
Turning circle	m	23.5	23.5
Floor height	mm	370	370
Boarding height	mm	325/340/340	325/340
Approach/Departure angle	°	7/7	7/7
Tyres		275/70 R 22.5	275/70 R 22.5
Interior headroom	mm	2,450	2,450
Clear door width	mm	1,200/1,200/1,200	1,200/1,200
G.V.W	kg	19,000	19,000

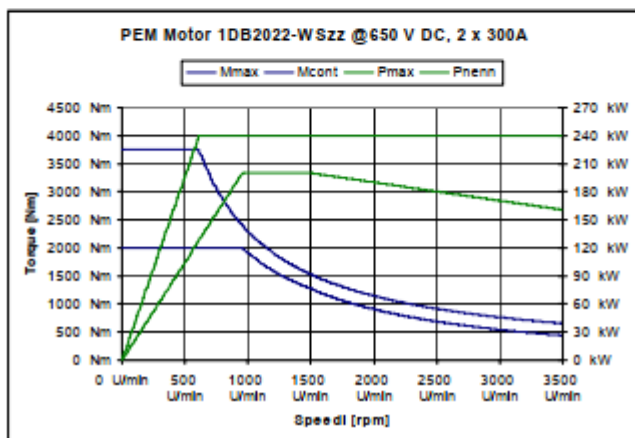
Datasheet motor PEM-Motor 1DB2022.

**SIEMENS**

PEM-Motor 1DB2022 – WS36



Type	PM Synch. Motor
Cooling Media	Water-Glycol
Rated Voltage DC	650 V
Rated Power	200 kW @ 1500 rpm
Rated Torque	2000 Nm @ 320 A
Max. Torque	3800 Nm @ 600A
Rated Current	300 A
Max. Speed	3.500 rpm
Weight	480 kg
Dim. (LxWxH)	620 x 510 x 500 mm
Ambient Temperature	- 30 °C to 70 °C
Degree of Protection	IP 65 / 9k



## Datasheet baterai manufaktur BYD

### Technical parameters



	B-Box 2.5	B-Box 5.0	B-Box 7.5	B-Box 10.0	B-Plus 2.5
Battery type	Lithium iron phosphate (LiFePO <sub>4</sub> )				
Battery configuration	1 x B-Plus 2.5 (50 Ah; 51.2 V)	2 x B-Plus 2.5 (50 Ah; 51.2 V)	3 x B-Plus 2.5 (50 Ah; 51.2 V)	4 x B-Plus 2.5 (50 Ah; 51.2 V)	Battery module 50 Ah; 51.2 V
Usable capacity <sup>1</sup>	2.56 kWh	5.12 kWh	7.68 kWh	10.24 kWh	2.56 kWh
Max output power	2.56 kW	5.12 kW	7.68 kW	10.24 kW	2.56 kW
Peak output power, 30 sec	5.12 kW	10.24 kW	15.36 kW	20.48 kW	5.12 kW
Nominal voltage	51.2 V <sub>oc</sub>				
Voltage range	43.2 - 56.4 V				
Ambient temperature <sup>2</sup>	-10 °C to +50 °C				
Interfaces	RS485/CAN				
Round trip energy efficiency	≥ 95.3 %				
Warranty	10 years				
Certifications and standards	TÜV / CE / UN38.3 / Sicherheitsleitfaden Li-Ionen-Hausspeicher (Safety Guideline)				
IP protection class	IP 20				
Dimensions (W/D/H)	600 x 510 x 883 mm				483 x 490 x 130 mm
Weight	79 kg	113 kg	146 kg	180 kg	34 kg
Compatible inverters	SMA / Goodwe / Solax / Victron, more brands to be announced				
Scalable	Extend anytime / up to 8 systems parallel / 81.92 kWh				

[1] Test Conditions: 0.25C discharge @+25°C

# Datasheet modul kapasitor super maxwell BMOD0165P048C01

## FEATURES AND BENEFITS\*

- > Up to 1,000,000 duty cycles or 10 year DC life
- > 48V DC working voltage
- > Active cell balancing
- > Temperature output
- > Overvoltage outputs available
- > High power density
- > Extreme Vibration Environment Compatible

## TYPICAL APPLICATIONS

- > Hybrid vehicles
- > Rail
- > Heavy industrial equipment
- > UPS systems



## PRODUCT SPECIFICATIONS

ELECTRICAL		BMOD0165 P048 C01
Rated Capacitance <sup>1</sup>		165 F
Minimum Capacitance, initial <sup>1</sup>		165 F
Maximum Capacitance, initial <sup>1</sup>		198 F
Maximum ESR <sub>dc</sub> initial <sup>1</sup>		6.0 mΩ
Test Current for Capacitance and ESR <sub>dc</sub> <sup>1</sup>		100 A
Rated Voltage		48 V
Stored Energy <sup>4</sup>		53 Wh
Absolute Maximum Voltage <sup>2</sup>		51 V
Absolute Maximum Current		1,900 A
Maximum Series Voltage		750 V
Capacitance of Individual Cells <sup>4</sup>		3,000 F
Stored Energy, Individual Cell <sup>4</sup>		3.0 Wh
Number of Cells		18
TEMPERATURE		
Operating Temperature (Cell Case Temperature)		
Minimum		-40°C
Maximum		65°C
Storage Temperature (Stored Uncharged)		
Minimum		-40°C
Maximum		70°C
PHYSICAL		BMOD0165 P048 C01
Mass, typical		14.2 kg
Power Terminals		M8/M10
Recommended Torque - Terminal		20 Nm (M8)/30 Nm (M10)
Vibration Specification		ISO 16750-3, Table 12
Shock Specification		IEC 60068-2-27, -29
Environmental Protection		IP65
Cooling		Natural Convection
MONITORING / CELL VOLTAGE MANAGEMENT		
Internal Temperature Sensor <sup>3</sup>		NTC Thermistor (10 kΩ)
Temperature Interface		Analog
Cell Voltage Monitoring <sup>3</sup>		Overvoltage Alarm (open collector)
Connector (Mating)		Deutsch DTM04-4P; Amphenol ATM04-4P
Cell Management System		CMS 2.0
SAFETY		
Short Circuit Current, typical (Current possible with short circuit from rated voltage. Do not use as an operating current.)		8,100 A
Certifications		RoHS, UL810a (50 volts)
High-Pot Test <sup>9</sup>		2,750 VDC

## BIODATA PENULIS



**Andi Irawan**, lahir di Ngawi, 16 November 1997. Penulis adalah putra dari pasangan Subandi dan Surati Irawati. Penulis memulai jenjang pendidikan SDN Dempel 1 Ngawi, SMPN 2 Ngawi, dan SMAN 2 Ngawi hingga lulus tahun 2016. Pada tahun yang sama penulis melanjutkan pendidikan ke jenjang perguruan tinggi dan diterima di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya di Departemen Teknik Elektro. Semasa kuliah, penulis aktif sebagai asisten Laboratorium Instrumentasi Pengukuran dan Identifikasi Sistem Tenaga (LIPIST), kepala biro IEEE Himpunan Mahasiswa Teknik Elektro (HIMATEKTRO), dan kepala divisi elektrik Hydrone ITS. Penulis dapat dihubungi melalui email : [andiawan2116@gmail.com](mailto:andiawan2116@gmail.com)