TUGAS AKHIR – EE 184801

STUDI IMPLEMENTASI KAPASITOR SUPER (*SUPERCAPACITOR*) SEBAGAI PENYIMPANAN ENERGI PADA KENDARAAN BUS LISTRIK TRANSIT

Ilham Bagus Santoso
NRP 07111640000115

Dosen Pembimbing
Vita Lystianingrum, ST., M.Sc., Ph. D.
Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., MEng.

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

TUGAS AKHIR – EE 184801

STUDI IMPLEMENTASI KAPASITOR SUPER (*SUPERCAPACITOR*) SEBAGAI PENYIMPANAN ENERGI PADA KENDARAAN BUS LISTRIK TRANSIT

Ilham Bagus Santoso
NRP 07111640000115

Dosen Pembimbing
Vita Lystianingrum, ST., M.Sc., Ph. D.
Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., MEng.

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

FINAL PROJECT – EE 184801

IMPLEMENTATION STUDY OF SUPERCAPACITORS AS ENERGY STORAGE IN ELECTRIC TRANSIT BUS

Ilham Bagus Santoso
NRP 07111640000115

Supervisors
Vita Lystianingrum, ST., M.Sc., Ph. D.
Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., MEng.

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

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi keseluruhan Tugas akhir saya dengan judul "**STUDI IMPLEMENTASI KAPASITOR SUPER (*SUPERCAPACITOR*) SEBAGAI PENYIMPANAN ENERGI PADA KENDARAAN BUS LISTRIK TRANSIT**" 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, Juli 2020

Ilham Bagus Santoso
07111640000115

Halaman ini sengaja dikosongkan

STUDI IMPLEMENTASI KAPASITOR SUPER (*SUPERCAPACITOR*) SEBAGAI PENYIMPANAN ENERGI PADA KENDARAAN BUS LISTRIK TRANSIT

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

14-Jul-2020

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

SURABAYA
JULI, 2020

Halaman ini sengaja dikosongkan

STUDI IMPLEMENTASI KAPASITOR SUPER (*SUPERCAPACITOR*) SEBAGAI PENYIMPANAN ENERGI PADA KENDARAAN BUS LISTRIK TRANSIT

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. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.
NIP. 197309271998031004

SURABAYA
JULI, 2020

Halaman ini sengaja dikosongkan

STUDI IMPLEMENTASI KAPASITOR SUPER (*SUPERCAPACITOR*) SEBAGAI PENYIMPANAN ENERGI PADA KENDARAAN BUS LISTRIK TRANSIT

Nama mahasiswa : Ilham Bagus Santoso
Dosen Pembimbing I : Vita Lystianingrum, ST., M.Sc., Ph. D.
Dosen Pembimbing II : Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., MEng.

Abstrak:

Kendaraan listrik adalah salah satu kemajuan penting yang telah ditemukan untuk memenuhi keinginan manusia akan terciptanya transportasi yang lebih ramah lingkungan dibanding kendaraan berbahan bakar fosil. Salah satu moda transportasi berbasis listrik yang kini banyak dikembangkan adalah bus listrik, karena sering dipakai dan dapat mengangkut manusia dalam jumlah banyak. Sumber tenaga yang dipakai dalam bus listrik disimpan dalam sebuah sistem penyimpanan energi yang biasanya berupa baterai. Sistem penyimpanan berupa baterai dapat melayani kebutuhan energi untuk menggerakkan bus listrik dalam waktu tempuh yang cukup lama. Akan tetapi, muncul permasalahan pada baterai seperti bobotnya yang lumayan berat dan siklus pemakaian yang cenderung rendah. Solusi yang dirasa mampu untuk mengatasi hal tersebut adalah penggantian sistem penyimpanan energi dengan kapasitor super. Kapasitor super memilik massa jenis daya yang besar, efisiensi tinggi, siklus pemakaian yang tinggi, dan juga dapat diisi dengan cepat. Tugas akhir ini berisi tentang studi perbandingan teknis antara kapasitor super dan baterai sebagai media penyimpanan energi pada bus listrik, dengan tujuan utama untuk membandingkan pemodelan termal dan potensi konsumsi energi.

Kata kunci: Kapasitor super, Baterai, Bus Listrik, Kebutuhan Energi,

Halaman ini sengaja dikosongkan

IMPLEMENTATION STUDY OF SUPERCAPACITORS AS ENERGY STORAGE IN ELECTRIC TRANSIT BUS

Student Name : Ilham Bagus Santoso
Supervisor I : Vita Lystianingrum, ST., M.Sc., Ph. D.
Supervisor II : Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., MEng.

***Abstract**:*

Electric vehicles are one of the important advances that have been found to fulfil the human desire for more environmentally friendly transportation than fossil-fuelled vehicles. One of the electricity-based modes of transportation that is now being developed is electric buses, because they are often used and can transport large numbers of people. The power source used in an electric bus is stored in an energy storage system which is usually a battery. A battery storage system can serve the energy needs to drive an electric bus in a long time. However, problems arise in the battery such as the weight is quite heavy and the usage cycle tends to be low. The solution that is felt to be able to overcome this is the replacement of energy storage systems with supercapacitors. Supercapacitors have large power density, high efficiency, high duty cycle, and can also be filled quickly. This final project contains a technical comparison study between supercapacitors and batteries as energy storage media on electric buses, with the main objective to compare thermal modelling and energy consumption.

Key Word: *Supercapacitors, Batteries, Electric Bus, Energy Consumption*

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 "**STUDI IMPLEMENTASI KAPASITOR SUPER (*SUPERCAPACITOR*) SEBAGAI PENYIMPANAN ENERGI PADA KENDARAAN BUS LISTRIK TRANSIT**".

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. Ibunda Nur Kholifah, Ayahanda Suriyanto, dan kakak Irin Cahyawati atas segala doa dan cinta yang tak henti pada penulis dalam keadaan apa pun. Semoga Allah SWT senantiasa melindungi dan memberi mereka kemudahan dalam segala urusan.
2. Ibu Vita Lystianingrum, ST., M.Sc., Ph. D. dan Bapak Prof. Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., MEng. selaku dosen pembimbing yang telah memberikan arahan, bimbingan dan perhatiannya selama proses penyelesaian Tugas Akhir ini.
3. Para asisten Laboratorium Instrumentasi, Pengukuran, dan Identifikasi Sistem Tenaga (LIPIST) yang menjadi teman seperjuangan dalam menambah ilmu
4. Qaedi Aufar Saifuddin B dan Andi Irawan yang telah menjadi rekan seperjuangan Tugas Akhir dalam topik kapasitor super dan diskusi di sela bimbingan.
5. M. Ridwan Hady Arifin yang telah menjadi teman diskusi mengenai pemrograman.
6. Teman-teman Fungsionaris HIMATEKTRO ITS SERASI 2018/2019 dan Himatektro ITS DINAKARA 2019/2020 yang telah mengajarkan makna kerja keras dan perjuangan.
7. Teman-teman SCI SMAN 1 Genteng yang selalu memberikan semangat dalam belajar

8. Teman-teman seperjuangan e56 yang telah menemani dan menorehkan cerita selama masa kuliah sampai penyusunan Tugas Akhir ini
9. 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. Namun tetap besar harapan penulis untuk menerima saran dan kritik untuk perbaikan dan pengembangan tugas akhir ini. Semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat yang luas.

Surabaya, Juli 2020

Ilham Bagus Santoso
07111640000115

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL
PERNYATAAN KEASLIAN
LEMBAR PENGESAHAN
ABSTRAK i
ABSTRACT iii
KATA PENGANTAR v
DAFTAR ISI vii
DAFTAR GAMBAR ix
DAFTAR TABEL xi
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 4
BAB 2 KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI 5
2.1 Kajian Pustaka 5
2.2 Sistem Bus Listrik 7
2.3 Penyimpan Energi 8
2.3.1 Baterai 8
2.3.2 Kapasitor Super 9
2.4 Penentuan Ukuran Penyimpan Energi 11
BAB 3 METODE PENELITIAN 13
3.1 Diagram Alur Simulasi Bus Listrik 13
3.2 Konfigurasi Sistem Rangkaian Tenaga Bus Listrik 14
3.2.1 Perangkat simulasi 16
3.3 *Driving Cycle* 17
3.4 Spesifikasi Bus 19

3.4.1 Motor dan *Controller* 20
3.4.2 Baterai dan Kapasitor super 22
3.5 Stasiun Pengisian 23

BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN 25
4.1 Kebutuhan Listrik 25

4.2 Penentuan Ukuran Media Penyimpanan Energi 26

4.2.1 Penentuan Ukuran Baterai 27
4.2.2 Penentuan Ukuran Kapasitor super 28
4.2.3 Pertimbangan Daya 29
4.3 Perbandingan Kebutuhan Daya Setelah Penentuan Ukuran 31

4.4 Perbandingan Skema Pengisian Daya 31

4.4.1 *On-route Opportunity Charging* 32
4.4.2 *Overnight Charging* 33
4.5 Perbandingan Temperatur 33

BAB 5 KESIMPULAN 37
5.1 Kesimpulan 37

5.2 Saran 37

DAFTAR PUSTAKA 39
LAMPIRAN 41
INDEKS 49
BIODATA PENULIS 51

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Konsumsi Daya yang Tercatat 6
Gambar 2. 2 Daya Listrik dan Mekanik yang Dibutuhkan 6
Gambar 2. 3 Kenaikan Suhu Saat Pengosongan 7
Gambar 2. 4 Topologi Sistem Bus Listrik 8
Gambar 2. 5 Pemodelan Sederhana Kapasitor..... 9
Gambar 2. 6 Mekanisme pengisian dan pengosongan kapasitor super 10
Gambar 2. 7 Algoritma Penentuan Ukuran Media Penyimpan Energi 11
Gambar 3. 1 Diagram Alur Tahapan Keseluruhan Simulasi Bus Listrik 14
Gambar 3. 2 Konfigurasi Sistem Bus Listrik..... 15
Gambar 3. 3 Gambar aliran daya pada bus listrik saat berjalan biasa dan pengereman regeneratif..... 15
Gambar 3. 4 Tampilan *software* ADVISOR..... 17
Gambar 3. 5 Driving cycle untuk koridor I Blok M-Kota..... 18
Gambar 3.6 Diimensi bus listrik 19
Gambar 3. 7 Diagram Blok Motor dan Kontroller..... 21
Gambar 3. 8 Kurva Karakteristik Torsi dan Kecepaatan Motor 21
Gambar 3. 9 Diagram Blok Penyimpan Energi 23
Gambar 3. 10 Soket Konektor Stasiun Pengisian 24
Gambar 4. 1 Daya Yang Dibutuhkan 26
Gambar 4. 2 Arus Yang Dibutuhkan..... 26
Gambar 4. 3 Baterai tidak mampu mencapai daya maksimum yang dibutuhkan..... 30
Gambar 4. 4 Perbedaan Kebutuhan Daya Baterai dan Kapasitor super Setelah Penentuan Ukuran..... 31
G**ambar 4. 5** Pertambahan Temperatur..... 34
Gambar 4. 6 Perbedaan Temperatur di Tiap Sel..... 35

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Hasil Penentuan Ukuran Baterai..... 6
Tabel 2. 2 Hasil Penentuan Ukuran Kapasitor Super..... 6
Tabel 2. 3 Hasil Penentuan Ukuran Hibrida Baterai-Kapasitor Super.... 6
Tabel 2. 4 Perbandingan baterai dan kapasitor super..... 10
Tabel 3. 1 Jarak dan Waktu Rute Bus Transjakarta Koridor I..... 18
Tabel 3. 2 Spesifikasi Bus Listrik 19
Tabel 3. 3 Parameter PMSM..... 21
Tabel 3. 4 Spesifikasi Baterai 22
Tabel 3. 5 Spesifikasi Kapasitor Super 22
Tabel 3. 6 Spesifikasi Pengisi Daya 24
Tabel 4. 1 Hasil Penentuan Ukuran Baterai..... 27
Tabel 4. 2 Hasil Penentuan Ukuran Kapasitor Super..... 29
Tabel 4. 3 Hasil Penentuan Ukuran Baterai Setelah Mempertimbangkan Daya Puncak 30
Tabel 4. 4 Perbandingan Lama Waktu Pengisian antara Baterai dan Kapasitor Super 32

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 1
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Transportasi merupakan kebutuhan yang tak terpisahkan dari kegiatan manusia sehari-hari. Dewasa ini, semakin berkembangnya teknologi transportasi, manusia semakin sadar bahwa sumber energi yang umum digunakan sebagai bahan bakarnya menimbulkan banyak pencemaran. Bahkan di ibukota Indonesia, Jakarta, 70% polusi udara disumbang dari kendaraan bermotor. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, salah satu inovasi yang banyak dikembangkan adalah kendaraan listrik. Kendaraan listrik dikembangkan dalam banyak moda transportasi, salah satunya berupa bus listrik.

Bus listrik dikembangkan menjadi kendaraan umum yang nyaman sehingga diharapkan penggunaan bus dan kendaraan pribadi dengan bahan bakar fosil berkurang secara signifikan terutama di daerah perkotaan. Berbeda dengan bus konvensional yang menghasilkan banyak polusi udara dari sisa pembakaran bahan bakarnya, bus listrik tidak menghasilkan emisi dari pemanfaatan energi listrik. Bus listrik mendapat suplai listrik dari media penyimpanan energi yang tertanam di dalamnya. Saat ini, sarana penyimpanan yang sedang banyak dikembangkan adalah penyimpan energi seperti baterai, sel bahan bakar, dan kapasitor super

Salah satu sarana penyimpanan energi yang banyak dipakai di bus listrik adalah baterai. Baterai memiliki banyak kelebihan sebagai penyimpan energi seperti densitas energi yang tinggi dan tegangan yang stabil ketika digunakan. Hal tersebut membuat baterai banyak diaplikasikan dalam kehidupan sehari-hari. Namun, baterai memiliki banyak kekurangan, seperti densitas daya yang rendah, siklus pemakaian yang rendah, dan waktu pengisian yang relatif lama. [1] Waktu pengisian tersebut membuat bus listrik dengan baterai tidak bisa beroperasi 24 jam. Selain itu, baterai bekerja pada rentang temperatur yang sempit sehingga memiliki risiko termal yang besar.

Alternatif sarana penyimpanan yang dapat digunakan dalam menggantikan peran baterai pada bus listrik adalah kapasitor super. Beberapa karakteristik kapasitor super dinilai bisa mengatasi kekurangan yang ada pada baterai. Kapasitor super memiliki karakteristik yaitu lama waktu yang digunakan untuk pengisian sangat cepat. Selain itu,

kapasitor super tepat untuk pemakaian berulang-ulang karena memiliki siklus hidup yang tinggi. Jika dibandingkan dengan baterai, kapasitor super dapat digunakan dengan rentang usia hingga 3-5 tahun lebih lama. Densitas daya yang tinggi dari kapasitor super cocok untuk memenuhi kebutuhan bus listrik saat memulai, akselerasi dan pengereman. Kapasitor super juga dapat bekerja pada rentang temperatur yang lebih lebar, sehingga risiko termal dapat dengan mudah diatasi.

1.2 Permasalahan

Perumusan masalah dari tugas akhir ini adalah :

1. Bagaimana konsumsi energi pada bus listrik bersistem baterai dan dengan sistem kapasitor super?
2. Bagaimana analisis perbandingan aspek termal pada bus listrik bersistem baterai dan dengan sistem kapasitor super saat dibebani siklus pengemudian?

1.3 Tujuan

Tugas akhir ini bertujuan untuk :

1. Mengetahui hasil analisis konsumsi energi dan penentuan ukuran baterai dan kapasitor super yang tepat
2. Mengetahui hasil analisis perbandingan aspek termal pada bus listrik bersistem baterai dan dengan sistem kapasitor super saat dibebani siklus pengemudian

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam tugas akhir ini adalah:

1. Permodelan dan simulasi menggunakan program *Advanced Vehicle Simulator* (ADVISOR) yang berbasis MATLAB/Simulink R2020a.
2. Baterai yang digunakan adalah jenis LiFePO4 (litium fero fosfat)
3. Tidak mempertimbangkan biaya yang dikeluarkan untuk komponen dan infrastruktur pelengkapnya
4. Perhitungan pertambahan suhu penyimpan energi tidak memperhatikan susunan tipe sel.

1.5 Metodologi

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

1. Studi Literatur

   Menghimpun referensi-referensi yang berhubungan dengan sistem penyimpanan energi baterai, kapasitor super, dan sistem konversi energi pada bus listrik dari sumber seperti buku, *paper*, serta jurnal..

2. Pengumpulan data

   Pada tahap ini dilakukan pengambilan data-data yang diperlukan untuk mendukung tugas akhir, di antaranya adalah pengambilan data rute dan spesifikasi bus listrik bersistem baterai. Selain itu, data-data tambahan berupa data spesifikasi baterai, sistem konversi energi pada bus, dan sistem pengisian daya juga diambil untuk memodelkan di langkah selanjutnya. Data bus listrik bersistem kapasitor super yang memiliki kemampuan relatif sama dengan bus listrik baterai juga diambil sebagai perbandingan di langkah selanjutnya.

3. Pemodelan dan Simulasi

   Agar dapat dibandingkan dengan jelas. data-data yang telah ada dimodelkan dan diolah. Hasil pemodelan yang akan disimulasikan seperti kondisi pemodelan termal, konsumsi energi, dan lain-lain. Perangkat lunak yang digunakan dalam pengolahan data pada langkah ini adalah Matlab.

4. Analisis Data dan Hasil Simulasi

   Setelah tahap pemodelan dan simulasi selesai, data hasil simulasi dianalisis dengan mempertimbangkan kemungkinan hasil sesuai studi literatur. Perbandingan dari bus listrik bersistem baterai dan bersistem kapasitor super akan disajikan dalam bentuk grafik sehingga hasil analisis dapat lebih mudah dimengerti.

5. Penyelesaian Laporan Tugas Akhir

   Pada tahap ini dilakukan penyusunan dan pembukuan sebagai tahap akhir dari serangkaian pengerjaan tugas akhir. Dihasilkan sebuah buku laporan yang juga berguna untuk memenuhi persyaratan kelulusan mata kuliah tugas akhir.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dalam tugas akhir 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 berkaitan dengan sistem bus listrik
3. BAB 3 berisikan perancangan metode simulasi rangkaian tenaga bus listrik
4. BAB 4 berisikan simulasi dan analisis data, yang membahas tentang analisa data hasil simulasi dan perbandingannya.
5. BAB 5 berisikan kesimpulan dan saran.

1.7 Relevansi

Tugas Akhir ini diharapkan mampu memberikan manfaat terhadap sistem bus listrik , terlebih yang menggunakan penyimpan energi baterai dan kapasitor super. Diharapkan Tugas Akhir ini mampu memberikan pertimbangan dalam memilih antara dua jenis penyimpan energi, yaitu kapasitor super dan baterai dalam implementasi sistem bus listrik.

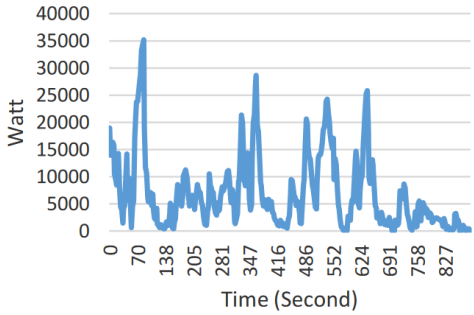
BAB 2
KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

Dalam bab ini akan dijelaskan teori-teori dan penelitian terkait yang berhubungan dengan topik tentang perbandingan secara teknis bus listrik dengan baterai dan kapasitor super. Bab ini terdiri dari beberapa sub-bab yang berkaitan untuk menjadi teori penunjang, di antaranya kajian pustaka dan penelitian terkait bus listrik, kapasitor super, baterai, dan penentuan ukuran penyimpan energi. 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.

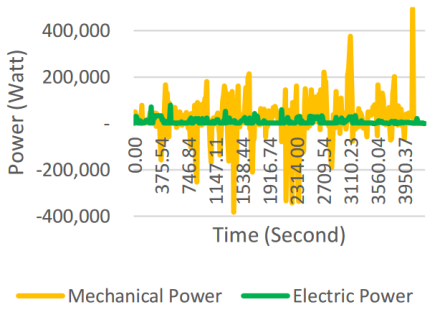
2.1 Kajian Pustaka

Dalam sub-bab ini akan dibahas mengenai kajian pustaka yang memuat tentang hasil penelitian yang pernah dilakukan sebelumnya. Hasil penelitian sebelumnya berhubungan dengan sistem rangkaian tenaga bus listrik. Kajian Pustaka berfokus pada beberapa aspek, yaitu konsumsi daya dan energi, jenis-jenis penyimpan energi pada bus listrik, dan penentuan ukuran penyimpan energinya.

G Heryana, dkk. dalam penelitiannya [2] menganalisis mengenai konsumsi daya pada bus listrik berukuran besar. Ia mendesain prototipe bus listrik kemudian menguji kemampuannya dalam mengatasi permintaan beban, rute dan karakter pengemudian bus, sehingga dapat ditentukan sistem propulsi, tipe baterai, dan mode pengisian yang tempat.. Didapatkan hasil berupa konsumsi daya dari BLDC *logger* yang dapat dilihat pada Gambar 2.1 berikut. Perbandingan antara daya mekanik dan listrik dijelaskan pada Gambar 2.2.



Gambar 2. 1 Konsumsi Daya yang Tercatat [2]



Gambar 2. 2 Daya Listrik dan Mekanik yang Dibutuhkan [2]

Amir Ostadi dan Mehrdad Kazerani dalam jurnalnya [3] meneliti tentang perbandingan penentuan ukuran yang optimal antara bus kota berpenyimpan energi berupa baterai, kapasitor super, dan hibrida keduanya. Dalam penelitiannya ia menggunakan *drive cycle* UDDS (*Urban Dynamometer Driving Schedule*). Penyimpan energi yang dipilih dalam penelitian ini adalah baterai Panasonic 18650 dan Maxwell BoostCAP3000. Didapatkan hasil penentuan ukuran seperti dalam Tabel 2.3, 2.4, dan 2.5 berikut**.**

Tabel 2. 1 Hasil penentuan ukuran baterai [3]

Number of replacements	2	4	10
N_{bs}	78	92	110
N_{bp}	953	392	137
Cost (US$)	1,040,676	504,896	210,980
Ratings of EM and inverter (kW)	331.9	299.7	282.0

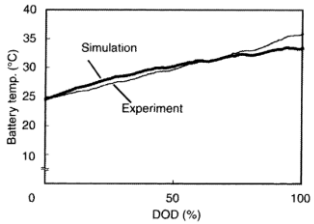
Tabel 2. 2 Hasil penentuan ukuran kapasitor super [3]

N_{us}	N_{up}	Cost (US$)	Ratings of EM and inverter (kW)
221	102	1,127,100	494.3

Tabel 2. 3 Hasil penentuan ukuran hibrida baterai-kapasitor super [3]

N_{bs}	N_{bp}	N_{us}	N_{up}	DC-DC rating (kW)	Cost (US$)
37	1038	222	58	62.0	1,196,995

Noboru Sato, dalam jurnalnya [4] meneliti mengenai perilaku termal baterai litium-ion untuk kendaraan listrik. Dalam penelitiannya, ia mengamati beberapa aspek seperti reaksi nilai panas (*Q*), resistansi, dan kenaikan suhu. Ia juga membandingkan hasil simulasi dengan pengukuran secara aktual. Didapatkan kenaikan temperatur saat pengosongan seperti yang terlihat pada Gambar 2.3 berikut ini.

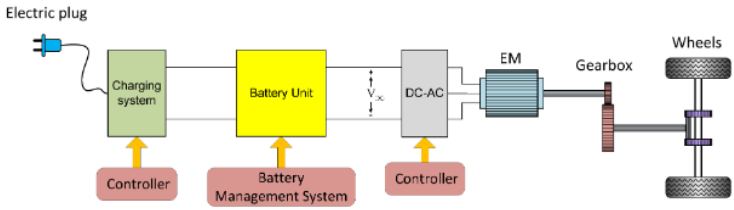


Gambar 2. 3 Kenaikan Suhu Saat Pengosongan [4]

2.2 Sistem Bus Listrik

Bus listrik adalah bus yang sumber energinya dipasok oleh sumber listrik. Sumber listrik yang digunakan dapat disimpan dalam media penyimpan energi secara *on-board* atau disuplai secara terus menerus melalui sumber eksternal. Bus listrik mulai banyak dikembangkan setelah perhatian terhadap emisi kendaraan yang dibuang ke lingkungan semakin bertambah.

Secara umum, komponen penting penyusun bus listrik adalah penyimpan energi, *controller*, dan motor. Penyimpan energi yang biasa digunakan adalah baterai atau kapasitor super. Jenis *controller* bergantung pada motor yang digunakan, biasanya DC/DC atau DC/AC. Motor yang digunakan dapat berupa *brushless* DC (BLDC) atau *permanent magnet synchronous motor* (PMSM). Bentuk topologi sistem bus listrik dapat dilihat pada Gambar 2.4 berikut ini. [3]



Gambar 2. 4 Topologi Sistem Bus Listrik [3]

2.3 Penyimpan Energi

Sistem penyimpanan energi merupakan komponen penting yang digunakan pada bus listrik. Penyimpan energi berguna untuk memasok energi kepada motor penggerak kendaraan. Ada beberapa sistem penyimpan energi yang biasa digunakan di kendaraan listrik, contohnya baterai, kapasitor super, *fuel cell*, dan lain sebagainya. Penyimpan energi listrik merupakan alternatif yang mulai dilihat dan diperhitungkan karena ramah lingkungan dan efektif

2.3.1 Baterai

Baterai menyimpan energi dalam bentuk energi kimia, yang kemudian diubah menjadi energi listrik melalui reaksi kimia. Baterai adalah salah satu media penyimpan tertua yang paling banyak digunakan hingga saat ini. Baterai masih merupakan media penyimpanan yang sering dipakai karena sangat efektif, baik untuk aplikasi daya yang rendah maupun tinggi.

Sel baterai terdiri dari beberapa komponen utama, yaitu elektroda berupa anode dan katode, *separator*/pemisah, terminal, elektrolit, dan penutup. Sel baterai yang disusun menjadi satu dengan beberapa rangkaian seri dan paralel disebut dengan modul. Baterai konvensional, seperti lead-acid (Pb-acid) dan nikel-kadmium (NiCd), memiliki elektrolit berupa cairan. Baterai-baterai dengan teknologi lebih maju yang dikembangkan untuk kendaraan listrik memiliki elektrolit berupa gel, pasta, atau resin. [5]

Untuk dapat dipakai menjadi penyimpan energi pada kendaraan listrik, baterai harus memiliki karakteristik tertentu agar dapat diaplikasikan. Karakteristik yang diperlukan adalah: [5]

1) Densitas energi yang tinggi yang dapat diisi dan kemudian digunakan untuk jarak yang Panjang
2) Densitas energi yang tinggi untuk membuat baterai bisa memiliki daya yang stabil untuk akselerasi dan memenuhi kapabilitas daya yang dibutuhkan
3) Siklus hidup yang Panjang dengan sedikit perawatan dan mekanisme keamanan yang tinggi
4) Dapat diterima sebagai baterai yang dapat didaur ulang agar tidak membahayakan lingkungan

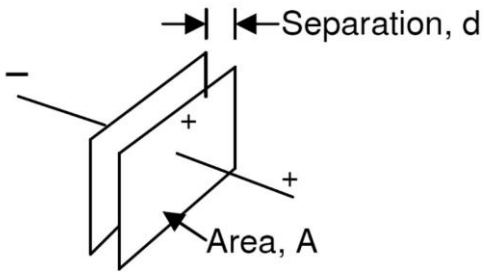
2.3.2 Kapasitor Super

Kapasitor super pertama kali dikembangkan oleh Robert A. Rightmire, seorang kimiawan dari Standard Oil Company of Ohio (SOHIO). Kapasitor super menyimpan muatan listrik dalam lapisan ganda listrik pada antarmuka elektroda-elektrolit, biasanya dengan karbon sebagai elektroda. Akibat luas permukaan yang tinggi dan ketipisan lapisan, kapasitor super memiliki kapasitans yang tinggi.

Kapasitor super menyimpan muatan listrik dengan memindahkannya dari satu pelat ke pelat yang lain sehingga menciptakan medan listrik di antara pelat-pelat tersebut. Kapasitans dari pelat paralel kapasitor dinyatakan dalam rumus:

$$C = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 A}{d}$$

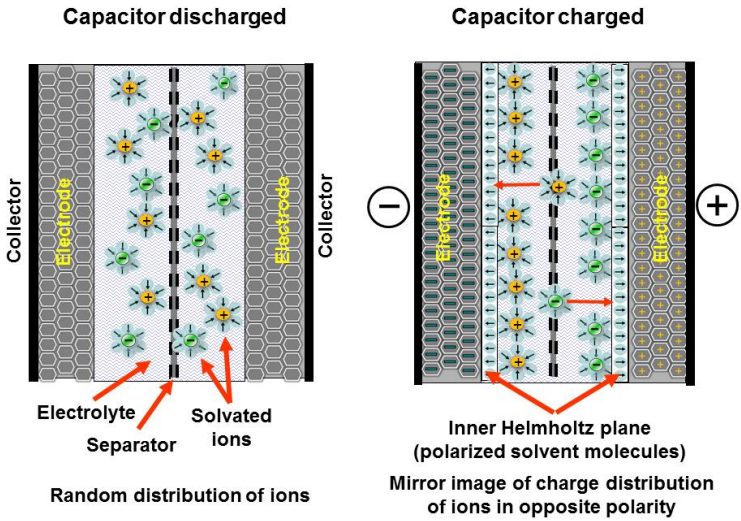
Dengan C adalah kapasitans, $\varepsilon_r$adalah konstanta dielektrik relative dari material di antara pelat, ε_0 adalah permitivitas ruang hampa, A adalah luas penampang elektroda, dan d adalah jarak di antara muatan positif dan negatif. Gambaran mengenai pelat kapasitor dapat diamati pada Gambar 2.5 berikut



Gambar 2. 5 Pemodelan Sederhana Kapasitor[6]

Perbedaan mendasar yang menyebabkan kapasitor super memiliki kapasitans yang jauh lebih tinggi dari kapasitor konvensional adalah pada mekanisme muatannya. Pada kapasitor super, konstruksi utamanya terdiri dari sepasang elektroda berpori. Elektrolit, dan *separator* di tengah. Saat terjadi proses pengisian, terjadi pemisahan muatan. Muatan-muatan itu hanya dipisahkan oleh antarmuka tipis yang disebut *Inner Helmholtz plane* seperti yang tampak pada Gambar 2.6

berikut. Selain itu, elektroda memiliki pori-pori yang sangat kecil, sehingga nilai kapasitans yang dihasilkan juga menjadi sangat besar.



Gambar 2. 6 Mekanisme pengisian dan pengosongan kapasitor super[7]

Dalam tugas akhir ini, akan dibandingkan tentang perilaku kapasitor super dan baterai dalam penggunaan pada bus listrik. Hal yang mendasarinya adalah masing-masing penyimpan energi tersebut memiliki keunggulan karakteristik masing-masing. Misalnya, pada baterai energi disimpan secara kimiawi sedangkan pada kapasitor super disimpan secara fisis dengan pemisahan muatan, yang mengakibatkan pengisian dan pengosongan. Perbandingan selengkapnya antara kapasitor super dan baterai dapat dilihat pada Tabel 2.4 berikut.

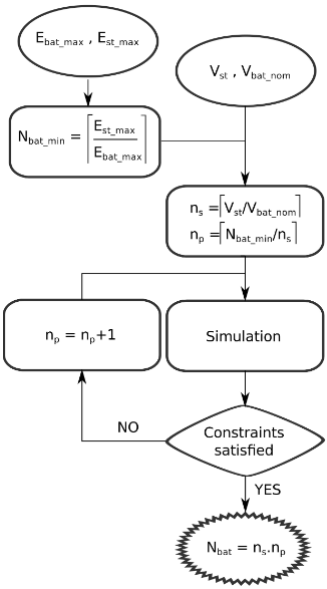
Tabel 2. 4 Perbandingan baterai dan kapasitor super [8]

	Baterai Li-ion	**Kapasitor super**
Waktu Pengosongan	menit-jam	milisekon-60 menit
Temperatur Operasi (ºC)	Pengisian: 0-45, Pengosongan: -20-60	-20 - 45

	Baterai Li-ion	Kapasitor super
Life Cycle	1000-10.000+	100.000+
Waktu Hidup (Tahun)	20+	5-15+
Densitas daya (W/kg)	500-2000	150-315
Densitas Energi (Wh/kg)	2.5-15	75-200

2.4 Penentuan Ukuran Penyimpan Energi

Penentuan ukuran adalah proses menentukan kapasitas penyimpan energi yang dibutuhkan oleh bus listrik. Penentuan ukuran juga dilakukan untuk menentukan konfigurasi seri dan paralel. Dengan penentuan ukuran yang tepat, kapasitas penyimpan energi menjadi cocok digunakan dan dapat ditentukan harganya secara efisien. Secara umum proses untuk penentuan ukuran digambarkan seperti pada Gambar 2.7 berikut.



Gambar 2. 7 Algoritma Penentuan ukuran Media Penyimpan Energi [9]

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 3
METODE PENELITIAN

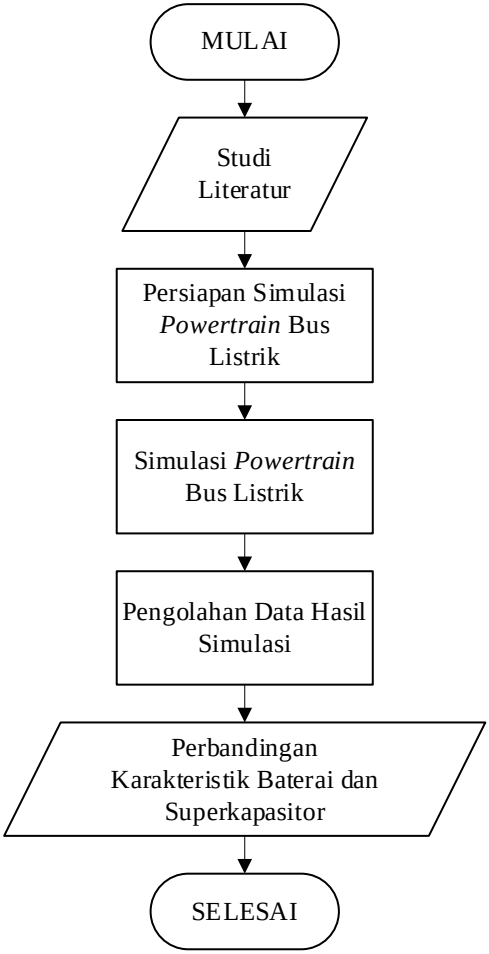
Dalam bab ini akan dijelaskan mengenai pemodelan sistem rangkaian tenaga bus listrik yang dihubungkan dengan penyimpanan energi yang akan digunakan dalam simulasi. Setelah itu, hasil simulasi akan dibandingkan untuk mengetahui masing-masing karakteristik baterai dan kapasitor super.

Dalam tugas akhir ini, dilakukan simulasi dengan menggunakan *software* MATLAB/Simulink untuk mendemonstrasikan kinerja baterai dan kapasitor super ketika menyuplai energi untuk bus listrik. blok-blok diagram dalam pemodelan ini dijalankan dengan menggunakan *software* Advanced Vehicle Simulator (ADVISOR) yang dikembangkan oleh National Renewable Energy Laboratory (NREL)/

Dalam serangkaian pemaparan pada bab ini, terdapat beberapa sub-bab yang menjelaskan detail dari proses simulasi bus listrik/. Diagram alur keseluruhan proses simulasi bus listrik akan dijelaskan pada sub-bab 3.1. Pada sub-bab 3.2 konfigurasi sistem rangkaian tenaga bus listrik akan dipaparkan mengenai komponen-komponen penting yang akan dirancang. Perangkat simulasi berupa *software* ADVISOR juga dijelaskan pada sub-bab ini. Driving cycle yang digunakan pada setiap simulasi berkendara akan dipaparkan pada sub-bab 3.3. Selanjutnya pada sub-bab 3.4 akan dipaparkan tentang spesifikasi bus beserta komponennya. Pemodelan motor dan penyimpan energi dalam *software* juga dijelaskan dalam sub bab ini. Terakhir, pada sub-bab 3.5 akan dipaparkan spesifikasi stasiun pengisian yang akan dipertimbangkan untuk mengisi media penyimpan energi.

3.1 Diagram Alur Simulasi Bus Listrik

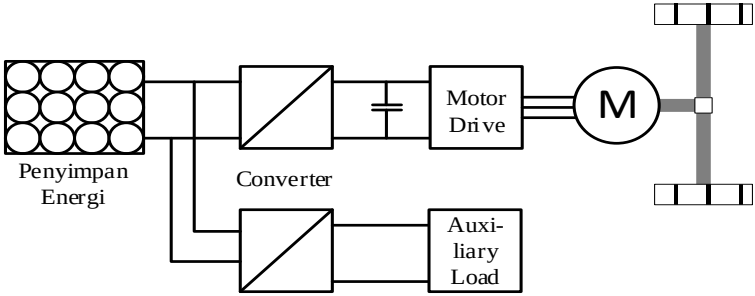
Pemodelan sistem bus listrik didapatkan dengan beberapa tahap, yang dimulai dengan studi literatur untuk mengumpulkan data-data setiap komponen yang akan digunakan dalam simulasi. Data-data dikumpulkan dari sumber-sumber akademis seperti jurnal dan *paper* serta sumber situs web bus-bus yang diperlukan. Hasil akhir dari simulasi diolah dan dibandingkan untuk mencapai perbandingan karakteristik yang tepat. Berikut adalah diagram alir dari tahapan dalam proses simulasi bus listrik:



Gambar 3. 1 Diagram Alur Tahapan Keseluruhan Simulasi Bus Listrik

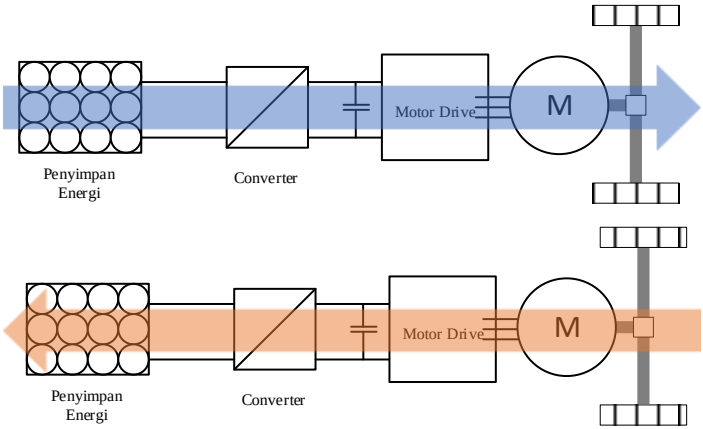
3.2 Konfigurasi Sistem Rangkaian Tenaga Bus Listrik

Keseluruhan sistem bus listrik dalam tugas akhir ini terdiri dari beberapa blok, di antaranya adalah motor traksi, *controller*, beban aksesoris, dan sistem penyimpanan energi. Keseluruhan sistem rangkaian tenaga bus listrik dengan penyimpanan berupa baterai atau kapasitor super dapat digambarkan pada Gambar 3.2 berikut.



Gambar 3. 2 Konfigurasi Sistem Bus Listrik

Berdasarkan gambar di atas, dapat diketahui bahwa sistem penyimpanan energi pada bus listrik digunakan untuk dua hal, yaitu sebagai sumber energi untuk motor traksi penggerak transmisi roda dan untuk beban-beban tambahan (*auxiliary*). Beban-Beban tambahan digunakan satu arah untuk pendingin AC, penggerak *wiper*, lampu, dan lain-lain. Sedangkan daya yang mengalir untuk motor dapat berjalan dua arah, yaitu aliran daya positif untuk menggerakkan roda seperti biasa dan aliran daya positif saat *regenerative braking*. Aliran daya saat berjalan biasa dan *regenerative braking* dapat dilihat pada Gambar 3.3.

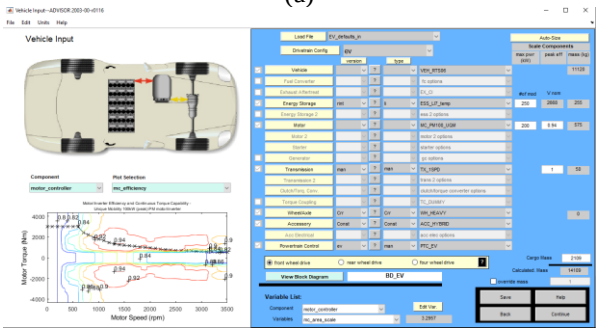


Gambar 3. 3 Gambar aliran daya pada bus listrik saat berjalan biasa (biru) dan *regenerative braking* (merah

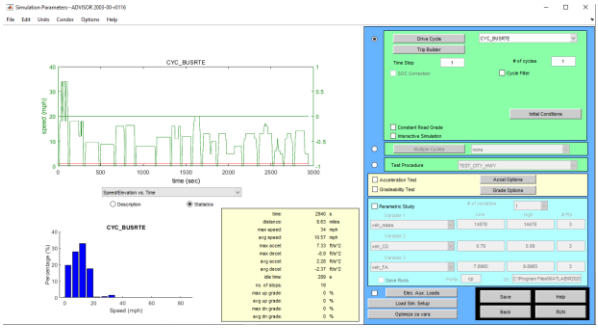
3.2.1 Perangkat simulasi

Simulasi penggunaan baterai dan kapasitor super dilakukan dengan memanfaatkan software Advanced Vehicle Simulator (ADVISOR) yang dikembangkan oleh National Renewable Energy Laboratory (NREL). ADVISOR mampu mengombinasikan simulasi dengan pendekatan secara *forward-facing* dan *backward-facing*, lalu kemudian mengevaluasi model untuk mencapai tujuan. NREL mengembangkan platform simulasi ini pada MATLAB/Simulink dengan akurat, cepat, fleksibel, mudah digunakan, dan mudah disebarluaskan. ADVISOR juga memiliki hasil prediksi yang baik dan hasilnya dapat diekstrak untuk diolah lagi. Selain itu, model-model pada ADVISOR seperti kendaraan, roda, motor, *controller*, penyimpan energi, dan lainnya dapat dengan mudah diubah dan dikembangkan sesuai yang diinginkan. Tampilan software ADVISOR dapat dilihat pada Gambar 3.4

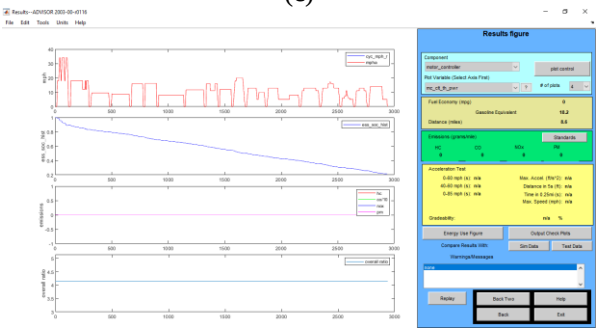
(a)



(b)



(c)



(d)

Gambar 3. 4 Tampilan *software* ADVISOR: (a) halaman depan, (b) halaman masukan pengaturan kendaraan, (c) halaman masukan *driving cycle*, (d) grafik keluaran yang dihasilkan

3.3 *Driving Cycle*

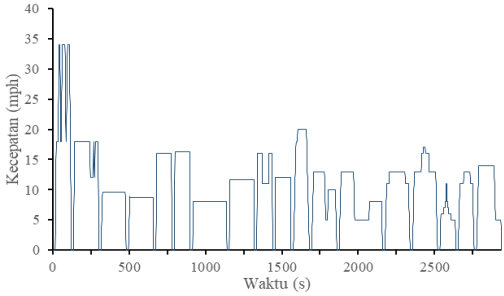
Kecepatan berkendara merupakan peranan penting dalam menentukan konsumsi energi dan emisi kendaraan selama berkendara. Bus listrik tidak mengeluarkan emisi karena tidak terjadi pembakaran bahan bakar karbon, sehingga *driving cycle* dapat digunakan dalam penentuan konsumsi energi. Konsumsi energi yang diperoleh dapat digunakan untuk menghitung ukuran dan menentukan media penyimpanan energi yang tepat.

Pada sub bab ini, *driving cycle* yang digunakan adalah yang dibuat berdasarkan rute bus listrik Transjakarta. Hal ini dimaksudkan agar

kondisi jalan sesuai dengan yang dibutuhkan di Indonesia. Bus listrik Transjakarta beroperasi pada 2 rute yaitu koridor I Blok M-Kota dan koridor IV Ragunan-Dukuh Atas. Dalam tugas akhir ini, dibuat rute driving cycle dengan perincian pada Tabel 3.1 dan Gambar 3.5 berikut:

Tabel 3. 1 Jarak dan Waktu Rute Bus Transjakarta Koridor I

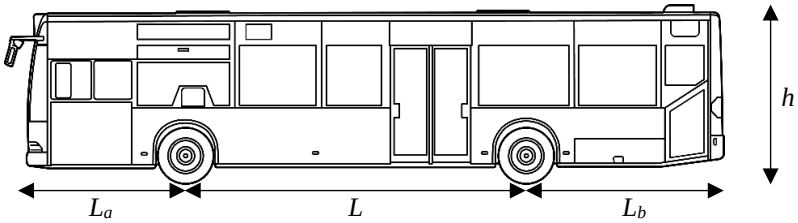
Halte	**Jarak (m)**	**Waktu (menit)**
Blok M – Masjid Agung	1500	2
Masjid Agung – Bundaran Senayan	1000	3
Bundaran Senayan – GBK	750	3
GBK – Polda Metro Jaya	700	3
Polda Metro Jaya – Bendungan Hilir	850	2
Bendungan Hilir – Karet Sudirman	1100	2
Karet Sudirman – Dukuh Atas 1	1100	4
Dukuh Atas 1 - Tosari	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	1050	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



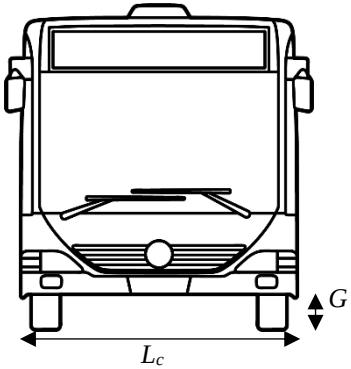
Gambar 3. 5 Driving cycle untuk koridor I Blok M-Kota

3.4 Spesifikasi Bus

Pemodelan bus listrik yang digunakan pada Tugas Akhir ini sebagian diperoleh dari bus listrik Transjakarta, yaitu model MAB MD12E dan BYD K9. Pemodelan ini dilakukan sebagai pembanding agar sesuai dengan kondisi kebutuhan bus transit di kota di Indonesia. Dimensi dan parameter bus yang digunakan dapat pada Gambar 3.6 dan Tabel 3.2 berikut.



(a)



(b)

Gambar 3.6 Dimensi bus listrik: (a) tampak samping, (b) tampak depan[10]

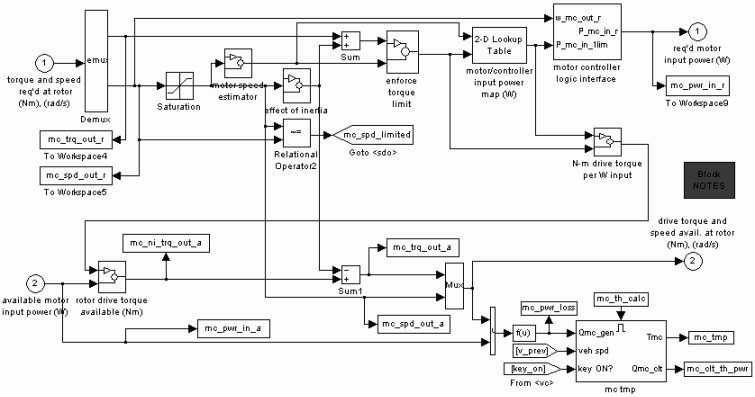
Tabel 3. 2 Spesifikasi Bus Listrik

Dimensi Kendaraan	Simbol	Besaran	Satuan
Tinggi kendaraan	h	3.72	m
Luas frontal kendaraan	A	7.89	m^2

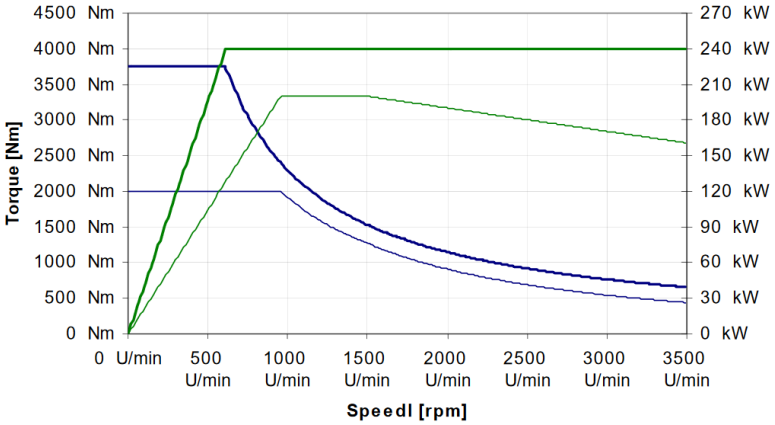
Dimensi Kendaraan	Simbol	Besaran	Satuan
Jarak sumbu roda	L	6.1	m
Overhang depan	La	2.39	m
Overhang belakang	Lb	3.6	m
Ground Clearance	G	0.25	m
Lebar kendaraan	Lc	2.5	m
Massa total	m	16000	kg
Koefisien *drag*	C_D	0.79	-
Koefisien *rolling*	C_r	0.00938	-
Massa jenis udara	ρ_u	1.23	kg/m^3
Percepatan gravitasi	g	9.81	m/s^2
Diameter roda	D	1.006	m

3.4.1 Motor dan *Controller*

Motor yang digunakan dalam simulasi pada Tugas Akhir ini memiliki peralatan penggerak utama yang berupa *Permanent Magnet Synchronous Motor* (PMSM). Penyimpan energi dihubungkan ke *controller* yang mengatur tegangan dan arus pada motor. Pemodelan motor pada software simulasi dapat dilihat pada Gambar 3.7. Nilai parameter motor yang dibutuhkan ditunjukkan dalam Gambar 3.8 dan Tabel 3.3



Gambar 3. 7 Diagram Blok Motor dan *Controller*[11]



Gambar 3. 8 Kurva Karakteristik Torsi dan Kecepatan Motor [12]

Tabel 3. 3 Parameter PMSM

Tipe	PMSM
Rating Tegangan	650 V
Rating Daya	200 KW @1500rpm
Rating Torsi	2000 Nm @320
Torsi maksimum	3800 Nm @600A
Kecepatan Maksimum	3500 rpm
Berat	480 kg
Dimensi	620 x510 x 500 mm

Blok “motor/*controller*” menerjemahkan permintaan torsi dan kecepatan menjadi permintaan daya listrik dan mengubah masukan daya aktual menjadi keluaran torsi dan kecepatan. Tiga batas berbeda ditambahkan di blok "motor / *controller*" untuk membatasi performa motor. Pertama, kecepatan yang diinginkan dibatasi oleh kecepatan maksimum motor. Kedua, torsi yang diinginkan dibatasi oleh perbedaan

antara torsi maksimum motor saat kecepatan dibatasi dan torsi yang diperlukan untuk mengatasi inersia rotor. Torsi dan kecepatan yang dibatasi kemudian digunakan untuk melakukan interpolasi pada daya masukan motor dan *controller*. Terakhir, daya masukan yang diinterpolasi dibatasi oleh batas arus maksimum.

3.4.2 Baterai dan Kapasitor super

Baterai yang digunakan dalam simulasi Tugas Akhir ini adalah baterai LiFePo4 merek Antbatt 12.8 V 5.4 Ah. Kapasitor super yang akan digunakan adalah seri BMOD0165P048C01 yang diproduksi oleh manufaktur Maxwell. Spesifikasi baterai dan kapasitor super dapat dilihat pada Tabel 3.4 dan 3.5 berikut ini

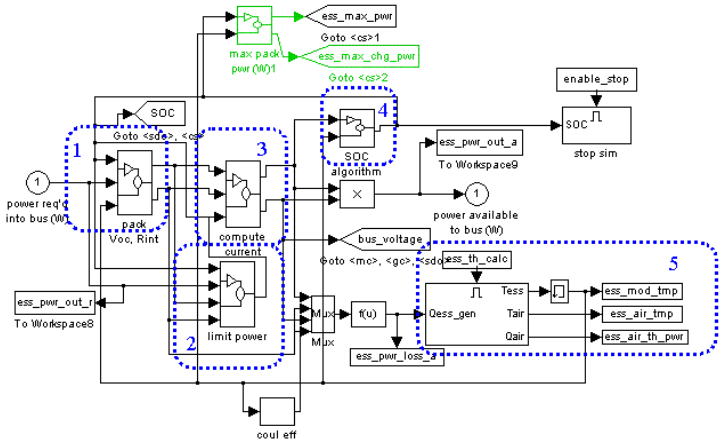
Tabel 3. 4 Spesifikasi Baterai

	Besaran	Satuan
Tegangan Nominal	12.8	V
Rating Kapasitas	5.4	Ah
Rating Energi	69.12	Wh
Daya Keluaran	70	W
Resistansi Internal	100	mΩ
Siklus hidup	2000	Cycle
Dimensi	90x70x101	mm
Berat	665	g

Tabel 3. 5 Spesifikasi Kapasitor super

	Besaran	Satuan
Tegangan Nominal	48	V
Rating Kapasitans	165	F
Rating Energi	53	Wh
Resistansi Internal	6	mΩ
Siklus hidup	1,000,000	Cycle
Dimensi	418x194x157	mm
Berat	13.7	kg

Diagram blok penyimpan energi dalam simulasi bus listrik ini dimodelkan dengan merepresentasikan rangkaian ekuivalen yaitu tegangan *open circuit* yang dihubungkan seri dengan resistansi internal. Model blok diagram yang digunakan dapat menerima permintaan daya dari motor dan menghitung daya aktual yang bisa disediakan penyimpan energi. Diagram blok penyimpan energi dapat dilihat pada Gambar 3.9 berikut ini.

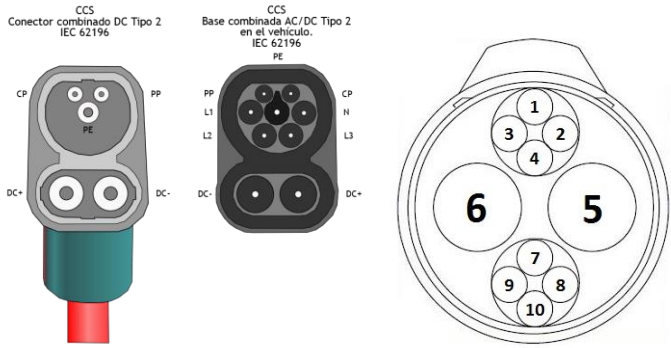


Gambar 3. 9 Diagram Blok Penyimpan Energi[11]

3.5 Stasiun Pengisian

Dalam menghitung penentuan ukuran dari penyimpan energi, diperlukan pertimbangan terhadap stasiun pengisian energi listrik. Stasiun dipertimbangkan untuk menghitung lamanya waktu yang perlukan untuk mengisi penyimpan energi pada depo atau terminal bus. Stasiun pengisian dalam analisis data pada tugas akhir ini diasumsikan menggunakan Stasiun Pengisian Listrik Umum (SPLU) yang disediakan oleh PLN. SPLU milik PLN memiliki tiga jenis, yaitu berdaya 25 kW, 50 kW, dan 125 kW. Konektor yang digunakan bertipe CHAdeMO dan *Combined*

Charging System (CCS) tipe 2. Bentuk konektor dan spesifikasinya dapat dilihat pada Gambar 3.10 dan Tabel 3.6 berikut ini.



(a) (b)

Gambar 3. 10 Soket Konektor Stasiun Pengisian [13][14]

Tabel 3. 6 Spesifikasi Pengisi Daya

	Daya Maksimum (kW)	Tegangan Maksimum (V)	Arus Maksimum (A)
CHAdeMO	62.5	500	125
CCS tipe 2	350	920	500

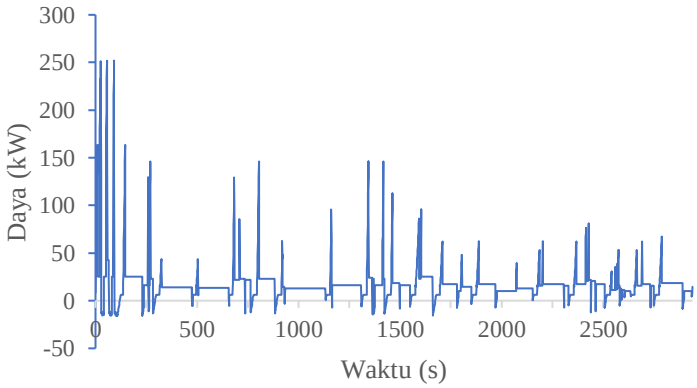
BAB 4
HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini membahas hasil simulasi dari sistem bus listrik yang terhubung dengan dua jenis penyimpan energi berbeda, yaitu kapasitor super dan baterai. Hasil simulasi kemudian dianalisis untuk mengetahui perbandingan karakteristik dari baterai dan kapasitor super seperti kebutuhan daya, energi, penentuan ukuran, dan efek temperatur yang dihasilkan.

4.1 Kebutuhan Listrik

Pada sub-bab ini akan dibahas mengenai hasil simulasi dari *software* ADVISOR. Data masukan simulasi diperoleh dari memasukkan spesifikasi umum bus listrik Transjakarta yang telah dibahas pada bab 3.

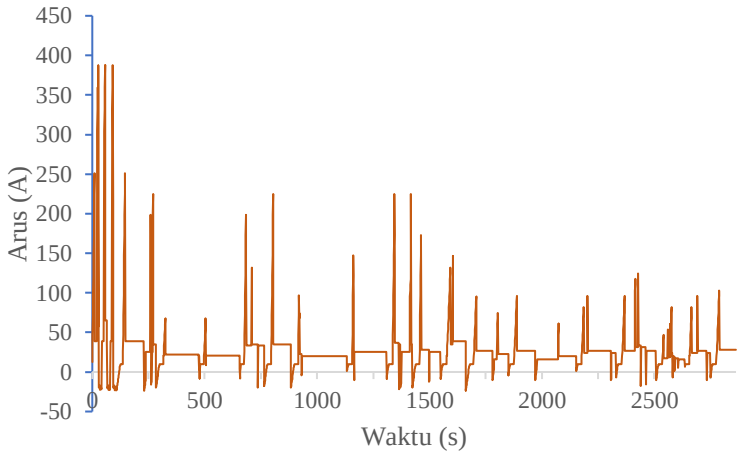
Hasil simulasi berupa konsumsi daya dapat diamati pada Gambar 4.1 berikut. Daya tertinggi dalam 1 kali rute perjalanan adalah sebesar 251.853 kW. Daya yang diperlukan oleh bus Sebagian besar dibutuhkan untuk motor traksi. Daya pada motor dipengaruhi oleh momen inersia, percepatan, dan kecepatan. Sehingga, dapat diketahui bahwa daya pada akan naik pada saat tertentu Ketika percepatan atau kecepatannya semakin tinggi. Pada grafik daya dapat diamati bahwa daya yang tinggi terjadi Ketika kendaraan mencapai puncak-puncak dari *drive cycle*.



Gambar 4. 1 Daya Yang Dibutuhkan

Dari grafik daya tiap detik dapat diketahui jumlah energi yang diperlukan dalam 1 kali rute perjalanan. Daya yang dibutuhkan untuk 1 kali perjalanan adalah sebesar 14.385.69 kWh dengan panjang rute 13.894 km. Dari data yang dihasilkan, dapat diketahui bahwa untuk rute bus Transjakarta koridor I Blok M-Kota diperlukan konsumsi energi sebesar 1.035 kWh/km.

Keluaran arus yang harus disuplai oleh penyimpan energi dapat diketahui dari grafik hasil pada Gambar 4.2 berikut. Dengan melihat grafik berikut ini, dapat diketahui bahwa arus berubah menjadi tinggi saat dibutuhkan daya yang tinggi untuk akselerasi dan berubah menjadi negatif ketika pengereman.



Gambar 4. 2 Arus Yang Dibutuhkan

4.2 Penentuan Ukuran Media Penyimpanan Energi

Pada sub-bab ini akan dibahas mengenai penentuan kapasitas baterai dan kapasitor super berdasarkan kebutuhan listrik yang telah dibahas pada sub-bab 4.1. Baterai dan kapasitor super yang dibutuhkan ditentukan dari jumlah rangkaian seri dan paralel. Cell dirangkai seri untuk memenuhi kebutuhan tegangan, sedangkan cell dirangkai paralel untuk memenuhi kebutuhan arus dan kapasitas.

4.2.1 Penentuan Ukuran Baterai

Dalam sub-bab ini dibahas mengenai perhitungan jumlah cell baterai yang diperlukan beserta jumlah rangkaian seri dan paralelnya. Untuk memenuhi tegangan motor, maka baterai harus diseri. Perhitungan untuk memenuhi tegangan tersebut adalah sebagai berikut.

$$Ns = \frac{V_{sistem}}{V_{modul}} = \frac{650}{12.4}$$

$$Ns = 52.42 \approx 53$$

Dilansir dari laman web Transjakarta, rute koridor I Blok M – Kota beroperasi dari pukul 06.00 hingga 18.00 WIB. Dari rentang waktu tersebut dapat diperkirakan bahwa dalam sehari bus listrik Transjakarta digunakan untuk menempuh 15 kali rute perjalanan, sehingga energi yang dibutuhkan adalah 15 × 14.386 = 215.785 kWh. Perhitungan untuk menentukan jumlah cell baterai yang diparalel adalah sebagai berikut.

$$Ah_{sistem} = \frac{E}{V_{sistem}} = \frac{215.785}{650}$$

$$Ah_{sistem} = 331.978$$

$$Np = \frac{Ah_{sistem}}{Ah_{modul}} = \frac{331.978}{5.4}$$

$$Np = 61.478 \approx 62$$

Nilai spesifikasi baterai setelah penentuan ukuran dibandingkan dengan nilai spesifikasi minimal yang diperlukan ditunjukkan oleh Tabel 4.1 berikut.

Tabel 4. 1 Hasil penentuan ukuran baterai

	Hasil Penentuan Ukuran	**Nilai Minimal Spesifikasi**
Tegangan	657.2 V	650 V
Kapasitas	334.8 Ah	331.978 Ah
Energi	227.128 kWh	215.785 kWh

	Hasil Penentuan Ukuran	Nilai Minimal Spesifikasi
Daya Maksimum	227.128 kW	260.82 kW

4.2.2 Penentuan Ukuran Kapasitor super

Pada sub-bab ini akan dibahas mengenai perhitungan jumlah cell baterai yang diperlukan beserta jumlah rangkaian seri dan paralelnya. Untuk memenuhi tegangan motor, maka baterai harus diseri. Perhitungan untuk memenuhi tegangan tersebut adalah sebagai berikut.

$$Ns = \frac{V_{sistem}}{V_{modul}} = \frac{650}{48}$$

$$Ns = 13.541 \approx 14$$

Perhitungan jumlah susunan paralel dihitung dengan mempertimbangkan energi dan kapasitas kapasitor super. Berikut ini adalah perhitungan untuk memenuhi jumlah energi pengisian tiap 1 kali berkendara sebesar 14.386 kWh (51,889,762 J). Asumsi besarnya pengisian telah dibahas di sub bab 3.5 dan selanjutnya 4.4.

$$E = \frac{C({V_{maks}}^2 - {V_{min}}^2)}{2}$$

$$51{,}516{,}651 = \frac{C(650^2 - 325^2)}{2}$$

$$C_{sistem} = 325.15\ F$$

$$C_{sistem} = C_{modul}\frac{N_p}{N_s}$$

$$N_p = \frac{325.15 \times 14}{165}$$

$$N_p = 27.589 = 28$$

Nilai spesifikasi kapasitor super setelah penentuan ukuran dibandingkan dengan nilai spesifikasi minimal yang diperlukan ditunjukkan oleh Tabel 4.2 berikut

Tabel 4. 2 Hasil Penentuan Ukuran Kapasitor super

	Hasil Penentuan Ukuran	**Nilai Minimal Spesifikasi**
Tegangan	672 V	650 V
Kapasitas	330 F	325.15 F
Energi	20.776 kWh	14.386 kWh
Berat	5370.4 kg	-

4.2.3 Pertimbangan Daya

Proses penentuan ukuran pada sub-bab 4.2.1 dan 4.2.2 digunakan untuk memenuhi permintaan tegangan dan kapasitas energi. Namun, hasil penentuan ukuran perlu dicek apakah penyimpan energi tersebut dapat mencapai permintaan daya yang harus dikeluarkan tiap waktu. Oleh karena itu, daya puncak diperhatikan sebagai batas apakah daya baterai dan kapasitor super dapat mencapainya. Perhitungan daya maksimum baterai adalah sebagai berikut:

$$P_{maks.bat} = V_{maks.mod} \times N_s \times I_{maks.mod} \times N_p$$

$$P_{maks.bat} = 12.8 \times 53 \times 5.4 \times 62$$

$$P_{maks.bat} = 227.128 \text{ kW}$$

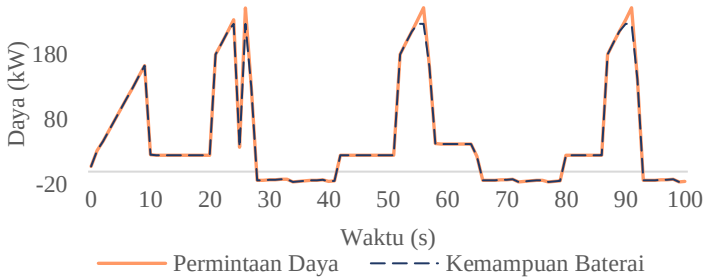
Perhitungan daya maksimum kapasitor super adalah sebagai berikut:

$$P_{maks.sup} = V_{maks.mod} \times N_s \times I_{maks.mod} \times N_p$$

$$P_{maks.sup} = 51 \times 14 \times 1900 \times 28$$

$$P_{maks.sup} = 37{,}984.8 \text{ kW}$$

Dapat diketahui dari perhitungan di atas bahwa ternyata ukuran baterai yang dihitung tidak bisa memenuhi permintaan daya di atas 227.128 kW, sedangkan daya yang dibutuhkan cukup tinggi hingga 251.853 kW. Visualisasi kemampuan baterai digambarkan oleh grafik pada Gambar 4.3 berikut.



Gambar 4. 3 Baterai tidak mampu mencapai daya maksimum yang dibutuhkan

Untuk mengatasi permasalahan ini, perlu ditambahkan beberapa modul secara paralel. Perhitungan penentuan ukuran baterai dengan mempertimbangkan daya maksimum adalah sebagai berikut.

$$Np = \frac{P_{maks}}{N_s \times P_{modul}} = \frac{251.853}{53 \times 69.12}$$

$$Np = 68.749 \approx 69$$

Spesifikasi baterai setelah mempertimbangkan daya puncak ditunjukkan oleh Tabel 4.3 berikut ini.

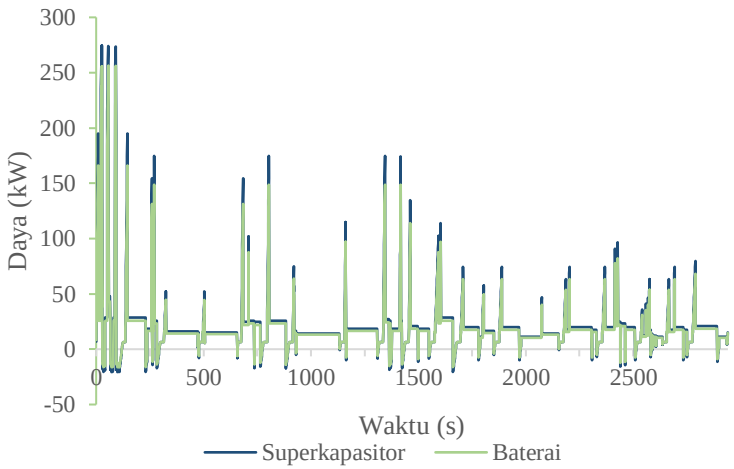
Tabel 4. 3 Hasil Penentuan Ukuran Baterai Setelah Mempertimbangkan Daya Puncak

	Hasil Penentuan Ukuran	**Nilai Minimal Spesifikasi**
Tegangan	657.2 V	650 V
Kapasitas	372.6 Ah	331.978 Ah
Energi	252.771 kWh	215.785 kWh
Daya Maksimum	252.771 kW	251.853 kW

Sedangkan untuk kapasitor super, daya yang dapat dikeluarkan terbukti sangat jauh berada di atas batas daya puncak. Sehingga tidak perlu dilakukan penentuan ukuran ulang.

4.3 Perbandingan Kebutuhan Daya Setelah Penentuan Ukuran

Saat melakukan proses penentuan ukuran, tentunya ditentukan pula berat media penyimpan energinya. Berat baterai dan kapasitor super setelah perhitungan penentuan ukuran menjadi berbeda dengan berat asumsi saat simulasi awal, yaitu baterai sebesar 2,431.9 kg dan kapasitor super sebesar 5370.4 Hal ini akan mengakibatkan konsumsi energi masing-masing dari bus bersistem baterai dan kapasitor super menjadi berbeda dikarenakan beratnya berbeda. Konsumsi daya bus baterai dan kapasitor super setelah perhitungan penentuan ukuran ditunjukkan oleh grafik pada Gambar 4.4 berikut. Terlihat bahwa bus berkapasitor super menjadi lebih tinggi karena beratnya lebih besar.



Gambar 4. 4 Perbedaan Kebutuhan Daya Baterai dan Kapasitor super Setelah Penentuan Ukuran

4.4 Perbandingan Skema Pengisian Daya

Dalam sub-bab ini akan dibahas mengenai skema pengisian daya yang tepat untuk bus bersistem baterai dan kapasitor super. Seperti yang telah dijelaskan di Bab 3 sub-bab 3.5, stasiun pengisian diasumsikan menggunakan Stasiun Pengisian Listrik Umum (SPLU) milik PLN yang ada yaitu 25, 50, dan 125 kW dengan arus dan tegangan yang dibatasi oleh spesifikasi soket konektor bertipe CHAdeMO atau CCS tipe 2.

Berikut ini adalah tabel perbandingan lama waktu pengisian dari 0% hingga penuh untuk tiap model pengisi. Kapasitas energi yang dibutuhkan diasumsikan sama dengan kapasitas hasil penentuan ukuran. Sebagai catatan, baterai tidak bisa diisi dengan daya pengisi 125 kW karena melebihi spesifikasi daya masukan baterai.

Tabel 4. 4 Perbandingan Lama Waktu Pengisian antara Baterai dan Kapasitor super

Daya	**Lama Pengisian**	
	Baterai	**Kapasitor super**
25	607 menit	50 menit
50	304 menit	25 menit
125	-	10 menit

4.4.1 *On-route Opportunity Charging*

On-route opportunity charging adalah skema pengisian penyimpan energi yang diisi ketika masih beroperasi di rute perjalanan. Penyimpan energi diisi di titik pengisian, yaitu di tiap halte atau terminal. Pengisian dengan skema ini didesain untuk penggunaan jarak perjalanan yang pendek, sehingga cocok untuk penggunaan pada bus transit.

Dengan karakteristik kapasitor super yang cepat mengisi dan cepat habis, *on-route opportunity charging* sangat disarankan untuk digunakan. Apabila menggunakan pengisian dengan skema ini, bus dapat beroperasi seharian penuh. Sesuai dengan perhitungan, maka pengisi 50 kW dan 125 kW cocok untuk diaplikasikan karena tidak terlalu lama.

On-route opportunity charging sebenarnya juga dapat diterapkan pada baterai, namun harus tetap dikombinasikan dengan *overnight charging*. Hal ini dikarenakan baterai memiliki densitas daya yang rendah, sehingga apabila bus digunakan hanya dihitung dengan ukuran sesuai dengan jarak pendek, bus dengan baterai mungkin tidak bisa memenuhi permintaan daya yang tinggi. Selain itu, waktu pengisian di halte atau terminal juga akan bertambah bila menggunakan *On-route opportunity charging*, sehingga perlu dipertimbangkan banyaknya pelanggan tiap waktu di tiap pemberhentian.

Keuntungan yang didapatkan dari *on-route opportunity charging* adalah ukuran baterai menjadi lebih kecil dan lebih murah. Jika digunakan pengisi 50 kW selama 10 menit pada terminal, baterai dapat diisi 8.3 kWh,

membuat ukurannya semakin kecil. Namun perlu dipertimbangkan harga untuk pembangunan infrastruktur pengisian, karena perlu infrastruktur yang banyak di tiap pemberhentian. Selain itu, jika tidak ada baterai untuk menyimpan energi dari *grid*, permintaan beban untuk *grid* mungkin akan bertambah sangat besar karena pengisian dalam jumlah banyak akan beroperasi bersamaan.

4.4.2 *Overnight Charging*

Overnight charging adalah skema pengisian bus listrik yang diisi malam hari di depo saat bus tidak beroperasi. Melihat profil beban harian di Indonesia yang tinggi saat sore hingga menjelang tengah malam, maka skema *overnight charging* akan sangat berpotensi untuk dipakai oleh bus dengan baterai karena waktu pengisian dapat dipilih saat bukan beban puncak, sehingga tidak membebani *grid*. Misalkan bus seperti Transjakarta akan digunakan pada saat pagi hari pukul 06.00, maka bus dapat diisi mulai pukul 23.00 hari sebelumnya hingga pukul 05.00 dengan menggunakan pengisi 50 kW (607 menit). Selain itu, pembangunan infrastruktur pengisian akan lebih murah dibandingkan *on-route opportunity charging* karena hanya dibangun di depo bus saja.

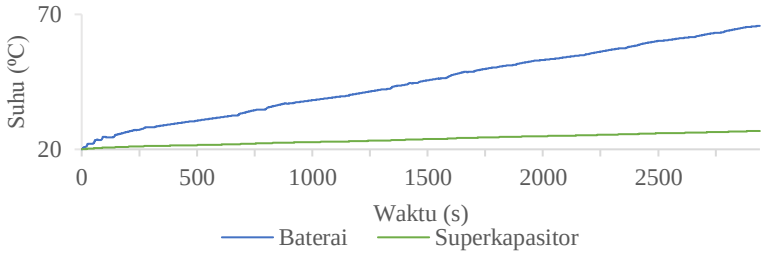
Berbeda dengan bus yang memiliki penyimpan energi berupa baterai, bus kapasitor super kurang bisa memanfaatkan skema ini. Hal ini dikarenakan sifat karakteristik kapasitor super yang dapat lebih cepat habis.

4.5 Perbandingan Temperatur

Dalam sub-bab ini dibahas mengenai perhitungan pertambahan temperatur yang dialami oleh baterai dan kapasitor super. Perhitungan temperatur dilakukan dengan pendekatan melalui rumus berikut:

$$\Delta T = I_{rms}^2 \times ESR \times R_{ca}$$

Di mana ΔT adalah pertambahan temperatur dalam ºC, I adalah arus yang mengalir pada penyimpan energi dalam Ampere, ESR adalah *Equivalent Series Resistance* atau sering disebut dengan resistansi internal dalam Ω, dan R_{ca} adalah resistansi termal dalam satuan W/ºC. Maka jika dihitung dengan spesifikasi baterai dan kapasitor super dari *datasheet* dapat digambarkan pertambahan temperatur seperti yang terlihat pada Gambar 4.6 berikut.



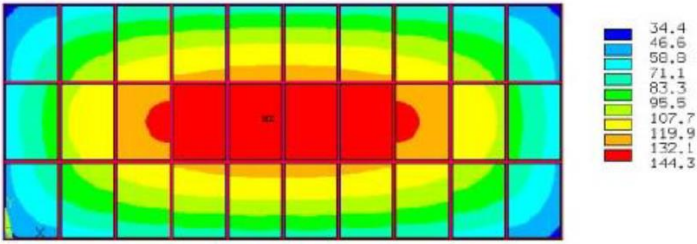
Gambar 4. 5 Pertambahan Temperatur

Suhu yang ada di Indonesia bervariasi dari 20-30 ºC, tergantung dari cuaca dan tempat. Simulasi ini menggunakan kemungkinan suhu yang paling rendah, sehingga hasil mungkin akan berbeda jika diterapkan di tempat dan cuaca yang berbeda. Kemudian, hasil simulasi temperatur di atas tidak mempertimbangkan skema transfer panas melalui konveksi, konduksi, dan radiasi. Sehingga simulasi belum dapat menggambarkan penurunan temperatur.

Pada hasil simulasi, diketahui bahwa kapasitor super tidak memerlukan pengawasan yang cukup ketat karena pertambahan temperatur yang kecil. Hal ini juga disebabkan resistansi internal yang ada pada kapasitor super jauh lebih kecil dibandingkan baterai.

Terjadi pertambahan suhu baterai yang lebih besar daripada kapasitor super, sehingga dapat diketahui bahwa baterai mendisipasi panas lebih buruk. Mengingat bahwa baterai beroperasi pada rentang temperatur yang lebih pendek (0-45 ºC), sebaiknya baterai harus diawasi selama pengisian dan pengosongan menggunakan *Battery Thermal Management System* (BTMS). BTMS dapat berupa *forced air system*, *liquid system*, *PCM system*, atau modul termoelektrik, tergantung pada bahan yang diinginkan untuk mendinginkan. Kombinasi dari sistem pendingin tersebut akan lebih baik untuk meredam panas baterai.

Simulasi terhadap temperatur baterai dan kapasitor super di atas tidak mempertimbangkan susunan modul yang dipasang, sehingga suhu dianggap sama di semua *cell*. Diperlukan pertimbangan lanjutan apabila akan diamati efek termal tiap *cell* ketika dikombinasikan, karena baterai yang disusun di tengah akan menjadi lebih panas dibandingkan yang ada di pinggir. Diperlukan penyusunan sistem pendingin yang tepat agar medium pendingin dapat masuk ke celah udara di tengah susunan modul. Perbedaan temperatur modul yang berada di tengah dan di pinggir dapat diamati pada Gambar 4.6 berikut.



Gambar 4. 6 Perbedaan Temperatur di Tiap Sel [15]

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 5
KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Dari hasil simulasi sistem bus listrik yang menggunakan baterai dan kapasitor super sebagai media penyimpan energi, didapatkan beberapa kesimpulan, di antaranya :

1. Kebutuhan daya listrik bergantung pada kecepatan dan kondisi bus listrik
2. Ketika penentuan ukuran kapasitor super menjadi lebih berat daripada baterai. Hal ini mengakibatkan bus listrik dengan kapasitor super memiliki kebutuhan daya dan energi yang lebih tinggi.
3. Kapasitor super dapat mengatasi daya beban yang sangat tinggi. Sedangkan baterai memiliki batas yang jauh lebih rendah. Oleh karena itu, diperlukan proses penentuan ukuran baterai dengan mempertimbangkan daya puncak.
4. Skema *on-route charging* cocok digunakan untuk bus listrik kapasitor super, sedangkan *overnight charging* tidak direkomendasikan.
5. Skema *overnight charging* cocok digunakan oleh bus listrik baterai. Sedangkan *on-route charging* harus tetap dikombinasikan dengan *overnight charging.*
6. Baterai memiliki disipasi panas yang lebih buruk, sehingga terjadi pertambahan temperatur yang lebih tinggi daripada kapasitor super.

5.2 Saran

Mempertimbangkan hasil perbandingan yang memiliki keunggulan dan kekurangannya masing-masing dalam beberapa aspek, penelitian selanjutnya diharap dapat mengombinasikan dengan penelitian pada bidang lainnya, misalnya dalam perhitungan biaya infrastruktur yang diperlukan. Selain itu, diharapkan penelitian selanjutnya dapat mempertimbangkan perbedaan temperatur pada tiap posisi susunan sel dalam modul.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

[1] A. L. Allegre, R. Trigui, dan A. Bouscayrol, “Different energy management strategies of Hybrid Energy Storage System (HESS) using batteries and supercapacitors for vehicular applications,” dalam 2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Lille, France, Sep 2010, hlm. 1–6, doi: 10.1109/VPPC.2010.5729110.

[2] G. Heryana, S. Prasetya, M. Adhitya, and D. A. Sumarsono, “Power consumption analysis on large-sized electric bus,” IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci., vol. 105, p. 012041, Jan. 2018, doi: 10.1088/1755-1315/105/1/012041.

[3] Ostadi, Amir, and Mehrdad Kazerani. “A Comparative Analysis of Optimal Sizing of Battery-Only, Ultracapacitor-Only, and Battery–Ultracapacitor Hybrid Energy Storage Systems for a City Bus.” IEEE Transactions on Vehicular Technology 64, no. 10 (October 2015): 4449–60. https://doi.org/10.1109/TVT.2014.2371912.

[4] N. Sato, “Thermal behavior analysis of lithium-ion batteries for electric and hybrid vehicles,” Journal of Power Sources, vol. 99, no. 1, hlm. 70–77, Agu 2001, doi: 10.1016/S0378-7753(01)00478-5

[5] Y. Barsukov dan J. Qian, Battery power management for portable devices. Boston: Artech House, 2013..

[6] J. M. Miller, Ultracapacitor applications. London: Institution of Engineering and Technology, 2011.

[7] Elcap, English: distribution of ions in a discharged/charged supercapacitor. 2013.

[8] D. O. Akinyele dan R. K. Rayudu, “Review of energy storage technologies for sustainable power networks,” Sustainable Energy Technologies and Assessments, vol. 8, hlm. 74–91, Des 2014, doi: 10.1016/j.seta.2014.07.004..

[9] M. G. Carignano, J. M. Cabello, dan S. Junco, “Sizing and performance analysis of battery pack in electric vehicles,” dalam 2014 IEEE Biennial Congress of Argentina (ARGENCON), Jun 2014, hlm. 240–244, doi: 10.1109/ARGENCON.2014.6868502

[10] B. Maddock, "Dimensions.com," Fantastic Offense, 8 April 2020. [Online]. Available: https://www.dimensions.com/element/city-transit-buses. [Accessed 6 June 2020].

[11] K. B. Wipke, M. R. Cuddy, dan S. D. Burch, “ADVISOR 2.1: a user-friendly advanced powertrain simulation using a combined backward/forward approach,” IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 48, no. 6, hlm. 1751–1761, Nov 1999, doi: 10.1109/25.806767.
[12] “ELFA Data Sheets.” https://dtsheet.com/doc/1803684/elfa-data-sheets (diakses Jun 09, 2020).
[13] Ajzh2074, Español: Conector CCS combinado Tipo 2 según estándar IEC 62196. Llamado también Combo2. Usado en Europa para la recarga de vehículos eléctricos como el BWW i3, VW e-up!, VW e-Golf y GM Spark EV. 2014.
[14] Moja. English: CHAdeMO Socket. February 20, 2016. Own work. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:CHAdeMO_socket.jpg
[15] S. Mathewson, “Experimental Measurements of LiFePO4 Battery Thermal Characteristics,” University of Waterloo, 2014..

.

LAMPIRAN

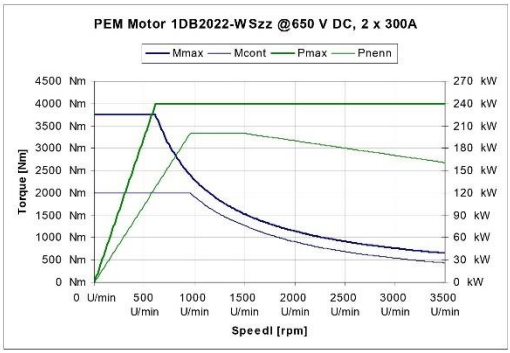
Datasheet Spesifikasi Siemens 1DB2022

PRELIMINARY

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



©Siemens ©2011
Industry Sector DT LD T HD, 03/2011

DS_Comp_AM....ppt

The information provided in this brochure contains merely general descriptions or characteristics of performance, which in actual case of use do not always apply as described or which may change as a result of further development of the products. An obligation to provide the respective characteristics shall only exist if expressly agreed in the terms of contract.

Datasheet Spesifikasi Antbatt 12.8 V 5.4 Ah

ANTBATT

LIFEPO4 BATTERY PACK 12.8V 5.4AH

Long Life

More than 2000 cycles at Lab test condition, longer serving time ranges helps vendors to extend the product serving life and help final users to reduce the battery replacement costs.

Lighter & Smaller

The $LiFePO_4$ weighs less than half of comparable lead acid batteries, providing customers with a lighter-weight solution to optimize their product design and avoid unnecessary oversizing, which helps minimize cost and system complexity.

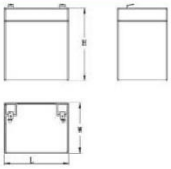
High Power Capability

$LiFePO_4$ is designed to deliver twice the power of lead acid, including at high discharge rates, while maintaining high energy capacity to maximize product performance.

Parameters

Electrical Characteristics	Nominal Voltage	12.8V
	Rated Capacity	5.4Ah
	Rated Energy	69.12Wh
	Output Power	70W
	Alternating Inner Resistance	≤100mΩ
	Self-Discharge Rate/Month	<3%/Month
	Cycle Life(0.5C 100%DOD*)	>2000 cycles
Standard Charge	Charge Voltage	14.4V
	Charge Mode	CC/CV
	Suggested Charge Current	1.1A
	Max. Charge Current	2.7A
Standard Discharge	Suggested Current	2.7A
	Max Cotinue Current	5.4A
	Discharge Cut-off Voltage	About 10V
Environmental	Charge Temperature	0°C~45°C
	Discharge Temperature	-20°C~60°C
	Storage Temperature	0°C~45°C
	Water Dust Resistance	IP65
Mechanical	Cell	18650 3.2V 1800mAh
	Configuration	4S3P*
	Dimension	90(L)x70(W)x101(H)mm
	Enclosure Material	ABS Plastics
	Weight	665g
	Charge Terminal	T1/T2
	Discharge Terminal	T1/T2

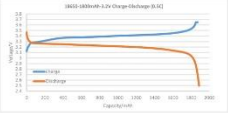
Dimension



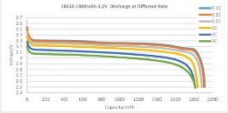
Application

> Solar Storage
> All Purpose

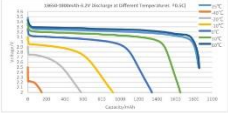
Cell Charge & Discharge at 0.5C @25°C



Cell Discharge Rate Performance@25°C



Cell Temperature Performance @0.5C



* CC/CV: Constant Current / Constant Voltage
* DOD: Depth of Discharge
* xSxP: Series & Parallel Connection

Antbatt Co., Ltd.
www.antbatt.com
E: sales@antbatt.com | T: +86 (0)760 22383547
417-1, Sunrise Plaza, No.11, Minke East Road, Zhongshan, Guangdong, 528400, China

Datasheet Spesifikasi Maxwell BMOD0165 P048 C01

DATASHEET NEW 48V MODULE

DuraBlue™
Advanced Shock & Vibration Technology

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[1]	165 F
Minimum Capacitance, initial[1]	165 F
Maximum Capacitance, initial[1]	200 F
Maximum ESR $_{DC}$ initial[1]	6.0 mΩ
Test Current for Capacitance and ESR $_{DC}$[1]	100 A
Rated Voltage	48 V
Stored Energy[4]	53 Wh
Absolute Maximum Voltage[2]	51 V
Absolute Maximum Current	1,900 A
Maximum Series Voltage	750 V
Capacitance of Individual Cells[8]	3,000 F
Stored Energy, Individual Cell[8]	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

*Results may vary. Additional terms and conditions, including the limited warranty, apply at the time of purchase. See the warranty details for applicable operating and use requirements.

Maxwell TECHNOLOGIES
Enabling Energy's Future™

Datasheet Spesifikasi Maxwell BMOD0165 P048 C01

DATASHEET NEW 48V MODULE

DuraBlue™
Advanced Shock & Vibration Technology

PRODUCT SPECIFICATIONS (Cont'd)

PHYSICAL	BMOD0165 P048 C01
Mass, typical	13.7 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[3]	NTC Thermistor (10 kΩ)
Temperature Interface	Analog
Cell Voltage Monitoring[1]	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[9]	2,500 VDC

Maxwell TECHNOLOGIES
Enabling Energy's Future

Datasheet Spesifikasi Maxwell BMOD0165 P048 C01

DATASHEET NEW 48V MODULE

DuraBlue™ Advanced Shock & Vibration Technology

TYPICAL CHARACTERISTICS

THERMAL CHARACTERISTICS	BMOD0165 P048 C01
Thermal Resistance ($R_{c.a.}$ All Cell Cases to Ambient), typical[5]	0.40°C/W
Thermal Capacitance (C_{th}), typical	13,000 J/°C
Maximum Continuous Current (ΔT = 15 °C)[5] (BOL, Beginning of Life)	79 A, RMS
Maximum Continuous Current (ΔT = 40 °C)[5] (BOL, Beginning of Life)	130 A, RMS
LIFE	
DC Life at High Temperature[1] (held continuously at Rated Voltage and Maximum Operating Temperature)	1,500 hours
Capacitance Change (% decrease from minimum initial value)	20%
ESR Change (% increase from maximum initial value)	100%
Projected DC Life at 25°C[1] (held continuously at Rated Voltage)	10 years
Capacitance Change (% decrease from minimum initial value)	20%
ESR Change (% increase from maximum initial value)	100%
Projected Cycle Life at 25°C[1,6,7]	1,000,000 cycles
Capacitance Change (% decrease from minimum initial value)	20%
ESR Change (% increase from maximum initial value)	100%
Test Current	100 A
Shelf Life (Stored uncharged at 25°C)	4 years

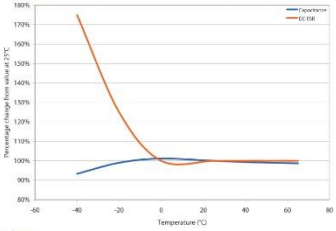
Maxwell TECHNOLOGIES Enabling Energy's Future™

Datasheet Spesifikasi Maxwell BMOD0165 P048 C01

DATASHEET NEW 48V MODULE

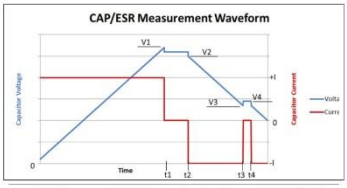
DuraBlue™ Advanced Shock & Vibration Technology

ESR AND CAPACITANCE VS TEMPERATURE

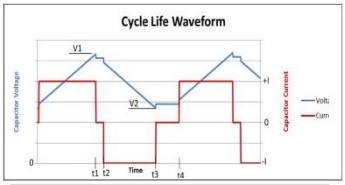


NOTES

1. Capacitance and ESR_{DC} measured at 25°C using specified test current per waveform below.
2. Absolute maximum voltage, non-repeated. Not to exceed 1 second.
3. Please refer to module user manual for additional technical details.
4. $E_{stored} = \frac{\frac{1}{2} CV^2}{3{,}600}$
5. $\Delta T = I_{RMS}^2 \times ESR \times R_{ca}$
6. Cycle using specified test current per waveform below.
7. Cycle life varies depending upon application-specific characteristics. Actual results will vary.
8. Per United Nations material classification UN3499, all Maxwell ultracapacitors have less than 10 Wh capacity to meet the requirements of Special Provisions 361. Both individual ultracapacitors and modules composed of those ultracapacitors shipped by Maxwell can be transported without being treated as dangerous goods (hazardous materials) under transportation regulations.
9. Duration = 60 seconds. Not intended as an operating parameter.



$V1 = V_{rated}$ t2 - t1 = 15 seconds Capacitance = I x (t3-t2)/(V2-V3)
$V3 = 0.5 \times V_{rated}$ t4 - t3 = 5 seconds ESR = (V4 - V3)/I



$V1 = V_{rated}$ t2 - t1 = 5 seconds (I=0)
$V2 = 0.5 \times V_{rated}$ t4 - t3 = 15 seconds (I=0)

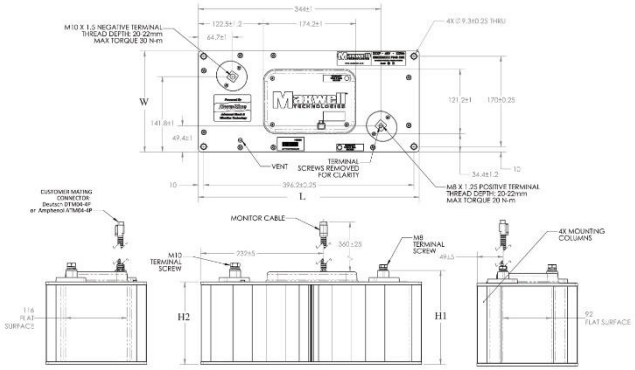
Maxwell TECHNOLOGIES Enabling Energy's Future™

Datasheet Spesifikasi Maxwell BMOD0165 P048 C01

DATASHEET **NEW 48V MODULE**

DuraBlue™
Advanced Shock & Vibration Technology

BMOD0165 P048 C01



Part Description	Dimensions (mm) L (max)	W (max)	H1 (max)	H2 (max)	Package Quantity
BMOD0165 P048 C01	418	194	179	157	1

Product dimensions are for reference only unless otherwise identified. Product dimensions and specifications may change without notice.
Please contact Maxwell Technologies directly for any technical specifications critical to application. All products featured on this datasheet are covered by the following U.S. patents and their respective foreign counterparts: 6643119, 7180726, 7295423, 7342770, 7352558, 7384433, 7440258, 7492571, 7508651, 7580243, 7791860, 7816891, 7859826, 7883553, 7935155, 8072734, 8098481, 8279580, and patents pending.

Maxwell Technologies, Inc.
Global Headquarters
3888 Calle Fortunada
San Diego, CA 92123
USA
Tel: +1 858 503 3300
Fax: +1 858 503 3301

Maxwell Technologies SA
Route de Montena 65
CH-1728 Rossens
Switzerland
Tel: +41 (0)26 411 85 00
Fax: +41 (0)26 411 85 05

Maxwell Technologies, GmbH
Leopoldstrasse 244
80807 München
Germany
Tel: +49 (0)89 / 4161403 0
Fax: +49 (0)89 / 4161403 99

Maxwell Technologies Shanghai Trading Co. Ltd.
Unit A2,C 12th Floor
Huarun Times Square
500 Zhangyang Road,
Pudong New Area
Shanghai 200122,
P.R. China
Phone: +86 21 3852 4000
Fax: +86 21 3852 4099

Maxwell Technologies Korea Co., Ltd.
Room 1524, D-Cube City
Office Tower, 15F #662
Gyeongin-Ro, Guro-Gu,
Seoul, 152-706
South Korea
Phone: +82 10 4518 9829

MAXWELL TECHNOLOGIES, MAXWELL, MAXWELL CERTIFIED INTEGRATOR, ENABLING ENERGY'S FUTURE, BOOSTCAP, C CELL, D CELL and their respective designs and/or logos are either trademarks or registered trademarks of Maxwell Technologies, Inc. and may not be copied, imitated or used, in whole or in part, without the prior written permission from Maxwell Technologies, Inc. All contents copyright © 2014 Maxwell Technologies, Inc. All rights reserved. No portion of these materials may be reproduced in any form, or by any means, without prior written permission from Maxwell Technologies, Inc.

Maxwell TECHNOLOGIES
Enabling Energy's Future™

Halaman ini sengaja dikosongkan

INDEKS

advisor, 2, 13, 16, 17, 25
baterai, vii, xvi, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 13, 14, 16, 22, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35
bus listrik, 1, 7, 17, 18
charge-discharge, vii, xvi, 25
pengisi daya, 31, 32, 33
daya, vii, xv, 1, 2, 3, 5, 8, 11, 15, 21, 23, 25, 26, 29, 30, 31, 32, 35
dimensi, 19, 21, 22
pengosongan, 7
driving cycle, 17
elektrolit, 8, 9
energi, vii, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 13, 14, 15, 16, 17, 20, 23, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 35
kapasitans, 9, 22
karakteristik, 1, 8, 13, 25, 32, 33
kecepatan, 21, 25, 35
listrik, vii, xv, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 13, 14, 15, 17, 19, 21, 23, 25, 26, 27, 33, 35
motor, 7, 8, 13, 14, 15, 16, 20, 21, 23, 25, 27, 28
on-route opportunity charging, 32
overnight charging, 33
paralel, 27
pemodelan, 13
rangkaian tenaga, 4, 5, 13, 14, 35, 37
regenerative braking, 15
resistansi internal, 22, 23, 33, 34
rute, 3, 5, 17, 25, 26, 27, 28, 32
seri, 8, 11, 22, 23, 26, 27, 28
simulasi, 2, 3, 4, 7, 13, 16, 20, 22, 23, 25, 30, 34, 35
penentuan ukuran, xvi, 5, 6, 11, 23, 25, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 35
spesifikasi, 3, 13, 25, 27, 28, 31, 33
stasiun pengisian, 13, 23, 24, 31
kapasitor super, vii, xvi, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 13, 14, 16, 22, 25, 26, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35
tegangan, 1, 20, 22, 23, 24, 26, 27, 28, 29, 30, 31
temperatur, 2, 7, 25, 33, 34, 35
thermal, ix, 6, 33

Halaman ini sengaja dikosongkan

BIODATA PENULIS

Ilham Bagus Santoso, dilahirkan di Banyuwangi, 6 Mei 1999. Penulis adalah putra dari pasangan Nur Kholifah dan Suriyanto. Penulis memulai jenjang pendidikan SDN 2 Tapanrejo, SMPN 1 Cluring, dan SMAN 1 Genteng 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 melalui jalur SBMPTN. Semasa kuliah, penulis aktif sebagai Kepala Departemen Hubungan Luar UKM Perisai Diri ITS, Kepala Departemen Keprofesian dan Kesejahteraan Mahasiswa di Himatektro ITS, dan asisten Laboratorium Instrumentasi, Pengukuran, dan Identifikasi Sistem Tenaga (LIPIST). Penulis dapat dihubungi melalui email : ilhambagus366@gmail.com