TUGAS AKHIR – EE 184801

DESAIN KONTROL MANAJEMEN ENERGI BERBASIS ATURAN PADA SISTEM HIBRIDA BATERAI DAN *SUPERCAPACITOR* UNTUK APLIKASI KENDARAAN LISTRIK

Sabri Ilma Khaidir
NRP 07111740000128

Dosen Pembimbing
Vita Lystianingrum Budiharto Putri, ST., M.Sc., Ph.D.
Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro dan Informatika Cerdas
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2021

--- halaman ini sengaja dikosongkan ---

TUGAS AKHIR – EE 184801

DESAIN KONTROL MANAJEMEN ENERGI BERBASIS ATURAN PADA SISTEM HIBRIDA BATERAI DAN *SUPERCAPACITOR* UNTUK APLIKASI KENDARAAN LISTRIK

Sabri Ilma Khaidir
NRP 07111740000128

Dosen Pembimbing
Vita Lystianingrum Budiharto Putri, ST., M.Sc., Ph.D.
Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro dan Informatika Cerdas
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2021

--- halaman ini sengaja dikosongkan ---

FINAL PROJECT – EE 184801

RULE BASED CONTROL DESIGN ENERGY MANAGEMENT SYSTEM FOR HYBRID BATTERY AND SUPERCAPACITOR TOWARD ELECTRIC VEHICLE APPLICATION

Sabri Ilma Khaidir
NRP 07111740000128

Supervisors
Vita Lystianingrum Budiharto Putri, ST., M.Sc.,
Ph.D. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.

ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT Faculty
of Electrical Technology and Intelligent Informatics
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2021

--- halaman ini sengaja dikosongkan ---

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul "DESAIN KONTROL MANAJEMEN ENERGI BERBASIS ATURAN PADA SISTEM HIBRIDA BATERAI DAN *SUPERCAPACITOR* UNTUK APLIKASI KENDARAAN LISTRIK" adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diizinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

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

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

Surabaya, 10 Desember 2021

SABRI ILMA KHAIDIR
07111740000128

--- halaman ini sengaja dikosongkan ---

Desain Kontrol Manajemen Energi Berbasis Aturan Pada Sistem Hibrida Baterai dan *Supercapacitor* Untuk Aplikasi Kendaraan Listrik.

TUGAS AKHIR

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 Budiharto Putri ST., M.Sc., Ph.D.
NIP. 198208292006042001

SURABAYA
DESEMBER, 2021

--- halaman ini sengaja dikosongkan ---

Desain Kontrol Manajemen Energi Berbasis Aturan Pada Sistem Hibrida Baterai dan *Supercapacitor* Untuk Aplikasi Kendaraan Listrik.

TUGAS AKHIR

Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik

Pada

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

Menyetujui

Dosen Pembimbing II

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

SURABAYA
DESEMBER, 2021

--- halaman ini sengaja dikosongkan ---

Desain Kontrol Manajemen Energi Berbasis Aturan Pada Sistem Hibrida Baterai dan *Supercapacitor* Untuk Aplikasi Kendaraan Listrik.

Nama Mahasiswa : Sabri Ilma Khaidir
Dosen Pembimbing I : Vita Lystianingrum, S.T., M.Sc., Ph.D.
Dosen Pembimbing II : Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.

ABSTRAK

Seiring dengan polusi suara, udara, dan juga konsumsi bahan bakar, urgensi dan ketertarikan terhadap alternatif dari *Internal Combustion Engine* (ICE) semakin tinggi. Sehingga muncul berbagai konsep baru transportasi dengan medium kendaraan listrik seperti *Electric Vehicle* (EV), *Hybrid Electric Vehicle* (HEV), dan *Plug-in Hybrid Electric Vehicle* (PHEV). Namun, tantangan terbesar dalam konsep transportasi baru ini adalah masalah penyimpan energi. Baterai merupakan sumber penyimpan energi yang paling matang untuk EV. Akan tetapi, meskipun memiliki kerapatan energi yang relatif tinggi, baterai memiliki karakteristik kerapatan daya yang rendah. Sehingga siklus pemakaian baterai relatif pendek dan kurang dinamis [1]. Untuk menanggulangi masalah tersebut penambahan *supercapacitor* dalam EV yang mana Li-ion baterai sebagai sumber energi utama dapat memperpanjang umur baterai dan menambah jarak tempuh. Kemudian, dengan adanya 2 sumber penyimpan energi diperlukannya sebuah *Energy Management System* (EMS) untuk membagi kebutuhan daya dari 2 sumber tersebut [2]. Dikarenakan penambahan *supercapacitor* dapat memperpanjang umur baterai. Maka pada tugas akhir ini akan berfokus pada desain manajemen energi berbasis aturan dan pengaruhnya terhadap usia baterai. Hasil pada tugas akhir ini menunjukkan bahwa penggunaan sistem penyimpan energi hibrid (HESS) dapat meningkatkan umur baterai dan menambah jarak tempuh. Umur baterai mengalami peningkatan hingga 90 hari pada hasil simulasi 20.000 jam pada tugas akhir ini. Dan yang terakhir nilai dar *Depth of Discharge (DOD)* mempengaruhi laju penuaan baterai.

Kata kunci : Baterai, *Supercapacitor*, *Rule-based*, Mobil Listrik

--- halaman ini sengaja dikosongkan ---

Rule Based Control Design Energy Management System for Hybrid Battery and Supercapacitor Toward Electric Vehicle Application

Student's Name : Sabri Ilma Khaidir
Supervisor I : Vita Lystianingrum, S.T., M.Sc., Ph.D.
Supervisor II : Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.

ABSTRACT

Along with the rising of noise, air pollution and fuel consumption, the urgency for Internal Combustion Engine alternative also increases. Therefore, new concept of transportation in the medium of electric vehicle emerge such as Full Electric Vehicle (EV), Hybrid Electric Vehicle (HEV), and Plug-in Hybrid Electric Vehicle (PHEV). However, the biggest challenge in this new concept of transportation is energy storage system problem. Battery remain to be the most reliable energy storage system for electric vehicle application. Nevertheless, despite having relatively higher energy density, battery has a characteristic of lower energy density. Thus, the life cycle of battery is relatively low, and the usage is not so dynamic [1]. To solve that problem, an addition energy storage system such as supercapacitor is needed. With Li-ion battery as a main energy storage system and supercapacitor to support it, there will be an improvement of life cycle and range. Since the presence of 2 energy storage system, an Energy Management System (EMS) is needed for optimal power split between them. Because the addition of supercapacitor will improve life cycle. This undergraduate thesis will focus on designing rule-based energy management system and the effect on battery life cycle. The outcome of this undergraduate thesis shows that the use of hybrid energy storage system (HESS) will improve life cycle of battery and range of EV. Life cycle of battery have an improvement of 90 days in 20.000-hour simulation from this undergraduate thesis. Lastly, the value of Depth of Discharge will influence the rate of aging in battery.

Keyword: Battery, Supercapacitor, Rule-based, Electric Vehicle.

--- halaman ini sengaja dikosongkan ---

KATA PENGANTAR

Atas izin dan rahmat Tuhan YME tugas akhir dengan judul "Desain Kontrol Manajemen Energi Berbasis Aturan Pada Sistem Hibrida Baterai dan *Supercapacitor* Untuk Aplikasi Kendaraan Listrik" dapat dilaksanakan. Terdapat banyak sekali dukungan serta bantuan yang diperoleh penulis dalam penyusunan tugas akhir ini. Namun sayang penulis tidak dapat menyebutkan semua pihak yang membantu penulis dalam penyusunan tugas akhir ini. Meskipun begitu, penulis ingin mengucapkan rasa terima kasih kepada:

1. Allah SWT atas segala rahmat, karunia, dan petunjuknya-Nya.
2. Kepada kedua orang tua saya, Ibunda Iriama Jakad dan Ayahanda M. Djalaludin yang selalu memberikan dukungan, semangat dan doa kepada penulis sehingga mampu menyelesaikan tugas akhir ini.
3. Ibu Vita Lystianingrum Budiharto Putri, ST., M.Sc., Ph.D. dan Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng. selaku dosen pembimbing yang telah memberikan arahan, ilmu, serta bimbingan dalam melaksanakan tugas akhir ini.
4. Kakak dan adik tersayang, Tiara Shaf Fitri dan Hamla Ni'matul Fauziyyah yang selalu memberi dukungan dan doa kepada penulis dalam pengerjaan tugas akhir.
5. Rekan-rekan alumni elektro ITS, Teuku Anfarul Mizan, La Ode M Fathur Rachim, M Haikal yang senantiasa membagikan pengetahuan dan pengalaman untuk kelancaran penyusunan tugas akhir ini.

Dalam penyusunan tugas akhir ini masih banyak memiliki kekurangan. Sehingga, kritik serta saran untuk pengembangan atau perbaikan dari tugas akhir ini sangat diharapkan. Semoga dengan tersusunnya tugas akhir ini dapat memberikan manfaat.

Surabaya, 10 Desember 2021

SABRI ILMA KHAIDIR
07111740000128

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL

PERNYATAAN KEASLIAN

LEMBAR PENGESAHAAN

ABSTRAK i

ABSTRACT iii

KATA PENGANTAR v

DAFTAR ISI vi

DAFTAR GAMBAR ix

DAFTAR TABEL xi

BAB I PENDAHULUAN 1

1.1. Latar Belakang 1

1.2. Perumusan Masalah 3

1.3. Tujuan Tugas Akhir 3

1.4. Batasan Masalah 3

1.5. Metodologi 3

1.5.1 Studi Literatur 3

1.5.2 Desain Kontrol Manajemen Energi Berbasis Aturan 4

1.5.3 Simulasi & Analisa Simulasi Desain Kontrol Manajemen Berbasis Aturan 4

1.5.4 Penyusunan Laporan Tugas Akhir 4

1.6. Sistematika Penulisan 4

1.7. Relevansi 5

BAB II TINJAUAN PUSTAKA 6

2.1 *Electric Vehicle (EV)* 6

2.2 Baterai 8

2.3 Supercapacitor 8

2.4 Manajemen Energi Berbasis Aturan 8
2.5 *End of Life (EOL)* 10
BAB III PENENTUAN PARAMETER KENDARAAN DAN PERMODELAN SIMULASI 11
3.1 Parameter kendaraan, Simulasi ADVISOR & Profil Daya..... 11
3.1.1 Parameter Kendaraan 12
3.1.2 Simulasi ADVISOR (Advance Vehicle Simulator) 13
3.1.3 Hasil Simulasi ADVISOR..... 16
3.1.4 Profil Daya 17
3.2 Topologi & Desain Manajemen Energi berbasis Aturan. 17
3.2.1 Topologi 17
3.2.2 Desain Manajemen Energi 18
3.3 Perhitungan Kapasitas Penyimpan Energi. 20
3.3.1 Perhitungan Kapasitas Baterai..... 20
3.3.2 Perhitungan Kapasitas Supercapacitor 26
3.4 Model Penuaan Baterai..... 27
3.4.1 Gambaran Umum Model Penuaan Baterai..... 27
3.4.2 Parameter blok DOD dan charge current 28
3.4.3 Mekanisme kerja blok “Cycle Generator”..... 30
BAB IV HASIL SIMULASI DAN PEMBAHASAN 31
4.1 Hasil Simulasi..... 31
4.1.1. Simulasi 300 Jam 31
4.1.2. Simulasi 20.000 Jam 34
4.2 Analisa Hasil Simulasi..... 37
4.2.1. Simulasi 300 jam..... 38
4.2.2. Simulasi 20.000 jam..... 40
4.3 Analisa Hubungan Batas Daya Limit Dengan Siklus Hidup Baterai 42

BAB V KESIMPULAN & SARAN 44
5.1 Kesimpulan..... 44
5.2 Saran..... 44
DAFTAR PUSTAKA..... 45
LAMPIRAN..... 48

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Ilustrasi spektrum kendaraan listrik dari kendaraan konvensional hingga full EV [9] 6
Gambar 2. 2 (a).All Electric Vehicle (b).Hybrid Electric Vehicle (c).Extended Range Electric Vehicle [9]..... 7
Gambar 2. 3 Desain Kontrol Manajemen Energi oleh J. Shen dan S.Dusmez [13]..... 9

Gambar 3. 1 *Advance Vehicle Simulator* (ADVISOR)..... 13
Gambar 3. 2 Halaman Pertama Simulasi ADVISOR parameter kendaraan 14
Gambar 3. 3 Halaman Kedua Simulasi ADVISOR Pemilihan Siklus Berkendara 15
Gambar 3. 4 Blok Diagram Simulasi ADVISOR 16
Gambar 3. 5 Hasil Simulasi ADVISOR 16
Gambar 3. 6 Diagram Topologi Semi Aktif 18
Gambar 3. 7 Diagram Alur Desain Manajemen Energi Berbasis Aturan 18
Gambar 3. 8 Grafik Hasil Manajemen Energi Berbasis Aturan 19
Gambar 3. 9 Spesifikasi Baterai Panasonic NCR18650B 20
Gambar 3. 10 74p6s Modul Baterai Tesla Model S [19]..... 21
Gambar 3. 11 Parameter *Generic Battery* (kiri atas ke kanan) (a) Parameter umum (b) Parameter *Discharge* (c) Parameter Temperatur (d) Parameter *aging* 23
Gambar 3. 12 Grafik karakteristik siklus hidup baterai NCR18650B . 24
Gambar 3. 13 Model Penuaan Baterai 27
Gambar 3. 14 Parameter blok DOD dan blok *charging* 30

Gambar 4. 1 Grafik Arus Pada Simulasi 300 Jam Baterai Saja..... 31
Gambar 4. 2 Grafik SOC Pada Simulasi 300 Jam Baterai Saja..... 32
Gambar 4. 3 Grafik Umur Baterai (Satuan Setara Siklus Penuh) Pada Simulasi 300 Jam Baterai Saja 32
Gambar 4. 4 Grafik Penurunan Kapasitas Baterai Pada Simulasi 300 Jam Baterai Saja 32
Gambar 4. 5 Grafik Arus Pada Simulasi 300 Jam Sistem Hibrida 33
Gambar 4. 6 Grafik SOC Pada Simulasi 300 Jam Sistem Hibrida 33
Gambar 4. 7 Grafik Umur Baterai (Satuan Setara Siklus Penuh) Pada Simulasi 300 Jam Sistem Hibrida 33

Gambar 4. 8 Grafik Penurunan Kapasitas Baterai Pada Simulasi 300 Jam Sistem Hibrida 34
Gambar 4. 9 Grafik Arus Pada Simulasi 20.000 Jam Baterai Saja 34
Gambar 4. 10 Grafik SOC Pada Simulasi 20.000 Jam Baterai Saja 34
Gambar 4. 11 Grafik Umur Baterai (Satuan Setara Siklus Penuh) Pada Simulasi 20.000 Jam Baterai Saja 35
Gambar 4. 12 Grafik Penurunan Kapasitas Baterai Pada Simulasi 20.000 Jam Baterai Saja 35
Gambar 4. 13 Grafik Hasil Simulasi 20.000 Jam Baterai Saja 35
Gambar 4. 14 Grafik Arus Pada Simulasi 20.000 Jam Sistem Hibrida 36
Gambar 4. 15 Grafik SOC Pada Simulasi 20.000 Jam Sistem Hibrida 36
Gambar 4. 16 Grafik Umur Baterai (Satuan Setara Siklus Penuh) Pada Simulasi 20.000 Jam Sistem Hibrida 36
Gambar 4. 17 Grafik Penurunan Kapasitas Baterai Pada Simulasi 20.000 Jam Sistem Hibrida 37
Gambar 4. 18 Grafik Hasil Simulasi 20.000 Jam Sistem Hibrida 37
Gambar 4. 19 Hubungan DOD dengan Umur Baterai pada Simulasi 300 Jam Baterai Saja 38
Gambar 4. 20 Hubungan DOD dengan Umur Baterai pada Simulasi 300 Jam Sistem Hibrida 39
Gambar 4. 21 Grafik Variasi Limit Daya VS End of Life baterai 43

DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1 Spesifikasi Mobil Tesla Model S Signature 2012 12
Tabel 3. 2 Detail Data Profil daya 17
Tabel 3. 3 Detail Profil Daya Penyimpan Energi Sistem Hibrida 19
Tabel 3. 4 Spesifikasi Modul Baterai Tesla 74p6s 22
Tabel 3. 5 Spesifikasi Battery Pack Tesla Model S Signature 2012..... 22
Tabel 3. 6 Spesifikasi Supercapacitor AOWEI UCK42V6800C..... 26
Tabel 3. 7 Standar charging dari IEC-62196 [23] 28
Tabel 4. 1 Perbandingan Hasil Simulasi 300 Jam Baterai Saja dengan Sistem Hibrida 39
Tabel 4. 2 Rekapitulasi Data Hasil Simulasi 20.000 Jam..... 42

BAB I
PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Otomobil sebagai penunjang kebutuhan mobilitas sehari-hari memiliki kontribusi penting bagi tumbuhnya masyarakat modern saat ini [2]. Ditambah lagi bahan bakar fosil telah menjadi tulang punggung peradaban sehingga penggunaan *Internal Combustion Engine* (ICE) mengalami peningkatan yang sangat tinggi [3]. Emisi berbahaya dalam bentuk karbon dioksida (CO_2), karbon monoksida (CO), nitrogen oksida (NO_x), hidrokarbon yang tidak terbakar (HCs), dan lainnya merupakan ancaman serius pada lingkungan dan juga manusia [2]. Permintaan tinggi terhadap bahan bakar fosil yang terbatas menimbulkan peningkatan harga yang cepat, sehingga perlu dikurangi pemakaiannya [2], [3]. Seiring dengan polusi suara, udara, dan juga konsumsi bahan bakar, urgensi dan ketertarikan terhadap alternatif dari ICE semakin tinggi [1]. Sehingga muncul berbagai konsep baru transportasi dengan medium kendaraan listrik seperti *Electric Vehicle* (EV), *Hybrid Electric Vehicle* (HEV), dan *Plug-in Hybrid Electric Vehicle* (PHEV) [2].

EV, HEV, dan PHEV merupakan solusi efektif pada masalah energi dan masalah lingkungan pada saat ini [4]. Dengan kontribusi revolusioner dari elektronika daya dan *Energy Storage System* (ESS) penggerak listrik dapat menggantikan peran ICE secara keseluruhan atau sebagian pada kendaraan [4]. Kelemahan penggerak listrik adalah masalah penyimpanan energi [1]. Terdapat banyak penelitian yang berfokus pada peningkatan efisiensi penggerak, peningkatan jarak tempuh, peningkatan efisiensi baterai, dan pengurangan biaya agar penggerak listrik dapat bersaing secara kompetitif dalam dunia otomobil [1] - [5].

Untuk saat ini dan masa yang akan datang pilihan penyimpan energi untuk EV adalah baterai, *fuel cell*, *supercapacitor*, dan *high speed flywheel* memiliki potensi yang baik untuk EV [1], [5]. Perkembangan *high speed flywheel* untuk saat ini belum dapat diaplikasikan pada EV [1]. Sedangkan untuk *fuel cell* selain harganya yang mahal, *fuel cell* memiliki kerapatan daya yang sangat rendah sehingga tidak dapat digunakan dalam pengaplikasian *standalone* seperti EV [5]. Adapun *supercapacitor* memiliki kerapatan daya yang sangat baik, namun kapasitasnya yang kecil tidak dapat digunakan sebagai penyimpan

energi untuk EV. Baterai merupakan sumber energi yang paling matang untuk EV saat ini. Akan tetapi, meskipun memiliki kerapatan energi yang relatif tinggi, baterai memiliki karakteristik kerapatan daya yang rendah tergantung dari jenis baterainya. Sehingga siklus pemakaian baterai relatif pendek dan kurang dinamis. [1], [5].

Dalam artikel [6] disebutkan bahwa kerapatan energi pada baterai yang digunakan di EV adalah 10% dari kendaraan konvensional. Ditambah lagi karena baterai memiliki kerapatan daya yang rendah, maka jarak tempuh dan keandalan kendaraan listrik kurang mumpuni apabila hanya menggunakan satu pilihan penyimpan energi. Oleh karena itu, perlunya penggabungan sumber penyimpan energi untuk hasil yang optimal [1], [6]. Penambahan *supercapacitor* dalam EV yang mana Li-ion baterai sebagai sumber energi utama dapat memperpanjang umur baterai dan menambah jarak tempuh [6], [7]. Kerapatan daya dari *supercapacitor* dapat menutup kelemahan dari kerapatan daya rendah pada baterai.

Dengan adanya 2 sumber penyimpan energi, maka desain manajemen energi sangat diperlukan untuk membagi kebutuhan daya dari 2 sumber tersebut [2]. Sebuah sistem manajemen energi atau *Energy Management System* (EMS) telah banyak dibahas dalam artikel-artikel jurnal ilmiah. Seperti dalam paper [8] telah diusulkan sebuah EMS berbasis aturan dengan 3 tahapan. Ketiga tahapan tersebut adalah menentukan mode operasi untuk penyimpan energi, perhitungan parameter pembobotan yang baru, dan pembuatan aturan untuk menentukan besar daya pada baterai dan *supercapacitor*. Dari hasil penelitian tersebut, arus *discharge* dari baterai tampak lebih halus pada saat percepatan mendadak.

Seperti yang telah disampaikan sebelumnya bahwa penambahan *supercapacitor* dalam EV yang mana Li-ion baterai sebagai sumber energi utama, dapat memperpanjang umur baterai dan menambah jarak tempuh. Sebagai akibat dari kerapatan daya *supercapacitor* yang dapat menutup kelemahan dari kerapatan daya rendah pada baterai. Oleh karena penambahan *supercapacitor* dapat memperpanjang umur baterai. Maka pada tugas akhir, penelitian akan lebih berfokus pada desain manajemen energi berbasis aturan dan pengaruhnya terhadap usia baterai. Hasil pada tugas akhir ini adalah membandingkan usia baterai mencapai *End of Life* (EOL) sebelum penambahan *supercapacitor* (*battery only)* dan sesudah penambahan *supercapacitor* (*hybrid)*.

1.2. Perumusan Masalah

Permasalahan yang dibahas dalam tugas akhir ini adalah:

1. Bagaimana mendesain kontrol manajemen energi berbasis aturan pada sistem hibrida baterai dan *supercapacitor?*
2. Bagaimana pengaruh manajemen energi berbasis aturan terhadap usia baterai pada kendaraan listrik?

1.3. Tujuan Tugas Akhir

Tujuan yang hendak dicapai pada tugas akhir ini adalah:

1. Merancang dan menentukan desain kontrol manajemen energi berbasis aturan pada sistem hibrida baterai dan *supercapacitor*.
2. Mengetahui pengaruh manajemen energi berbasis aturan terhadap usia baterai pada kendaraan listrik.

1.4. Batasan Masalah

Batasan masalah pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Dalam tugas akhir ini berfokus pada pengaruh manajemen energi berbasis aturan terhadap usia baterai pada kendaraan listrik.
2. Tugas akhir ini tidak membahas mengenai temperatur kerja baterai.
3. Pertimbangan dan pengaruh dari sisi ekonomi diabaikan pada tugas akhir ini.

1.5. Metodologi

Metodologi atau tahapan yang akan dilakukan dalam pelaksanaan tugas akhir ini adalah sebagai berikut.

1.5.1 Studi Literatur

Sebagai penunjang referensi pengerjaan tugas akhir ini dilakukan studi literatur dari publikasi-publikasi ilmiah, buku, tugas akhir dan sumber relevan lainnya. Dalam studi literatur ini kata kunci yang akan dipakai adalah baterai, *supercapacitor/ ultracapacitor*, *Energy Managements System* (EMS), *Rule-Based Energy Management System* ,*Hybrid Energy Storage System* (HESS), *Electric Vehicle* (EV), dan atau *Hybrid Electric Vehicle*.

1.5.2 Desain Kontrol Manajemen Energi Berbasis Aturan

Setelah melakukah tahap studi literatur dilanjutkan dengan merancang/ mendesain kontrol manajemen energi berbasis aturan. Merancang atau mendesain sistem manajemen energi ini mempertimbangkan SoC dari baterai, SoC s*upercapacitor*, daya referensi, keadaan torsi beban dan parameter-parameter lainnya. Pada pengerjaan tugas akhir ini dapat kembali pada tahap ini apabila manajemen energi yang dirancang memiliki kekurangan atau harus diperbaiki.

1.5.3 Simulasi & Analisa Simulasi Desain Kontrol Manajemen Berbasis Aturan

Apabila telah didapat desain manajemen energi, maka dilakukan simulasi pada *software* Simulink MATLAB. Hasil dari simulasi akan di analisa lebih lanjut untuk mengetahui kelebihan atau kekurangannya. Apabila hasil analisa dirasa kurang memuaskan atau desain dari manajemen energi harus diperbaiki maka tahapan pengerjaan tugas akhir akan kembali pada tahapan desain manajemen energi. Analisa ini akan melalui bimbingan serta arahan dari dosen pembimbing dan atau orang yang ahli dalam bidang manajemen energi.

1.5.4 Penyusunan Laporan Tugas Akhir

Setelah tahapan-tahapan di atas telah selesai dan mendapat hasil yang memuaskan. Langkah selanjutnya adalah untuk menjelaskan secara rinci dan ilmiah dalam laporan tugas akhir.

1.6. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan di dalam tugas akhir ini terdiri dari 5 bagian, yaitu:

1. BAB 1 atau pendahuluan merupakan bab yang menjelaskan mengenai alasan atau latar belakang memilih judul desain manajemen energi berbasis aturan. Selain itu, pada bab ini juga dibahas mengenai perumusan masalah, tujuan, Batasan masalah, metodologi, sistematika, serta relevansi laporan

2. Pada BAB 2 berisi mengenai pemaparan literatur – literatur ilmiah dan dasar teori atau yang disebut tinjauan pustaka. Dasar-dasar teori yang dibahas diantaranya adalah *Electric Vehicle* (EV), baterai, *supercapacitor*, manajemen energi berbasis aturan, dan *End of Life* (EOL)
3. Kemudian pada BAB 3 akan berfokus untuk membahasa parameter model kendaraan dan permodelan simulasi. Pada bab ini akan dibahas rinci model kendaraan yang akan digunakan beserta spesifikasi lengkapnya. Ditambah dengan model serta parameter simulasi penuaan baterai maupun simulasi profil daya dengan ADVISOR yang akan digunakan pada tugas akhir ini.
4. Setelah itu, BAB 4 akan membahas hasil simulasi dan pembahasan dari hasil simulasi. Dan juga ditambah dengan pembahasan pengaruh perubahan variasi daya limit terhadap penuaan baterai.
5. Yang terakhir pada BAB 5 akan ditutup dengan kesimpulan dan saran.

1.7. Relevansi

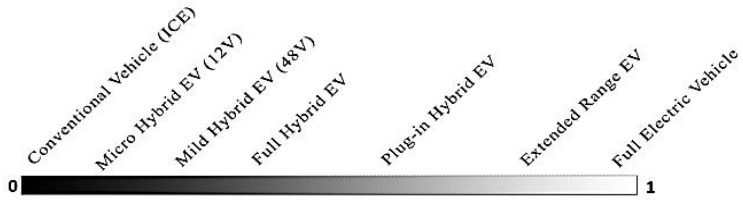
Hasil dari tugas akhir ini dapat dijadikan referensi bagi pihak industri maupun akademisi dalam merancang maupun mendesain manajemen energi pada sistem hibrida baterai dan SC. Berbagai macam manajemen energi dapat dikomparasikan dengan hasil dari tugas akhir ini. Sehingga, dapat menghasilkan manajemen energi yang optimal dalam aplikasi kendaraan listrik penyimpan energi baterai dan SC.

BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

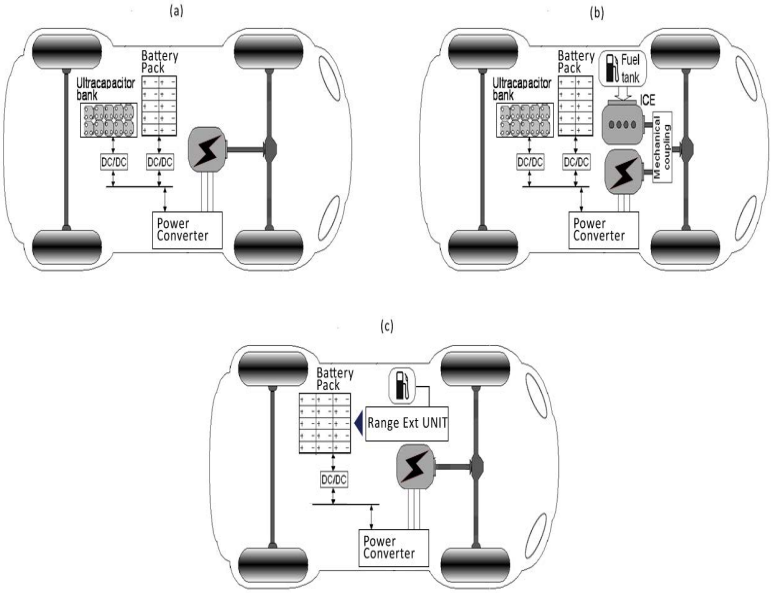
2.1 *Electric Vehicle (EV)*

Konsep kendaraan listrik atau *electric vehicle* (EV) telah dipaparkan secara lengkap dan rinci oleh Mahmoudi, Flah, dan Sbita pada artikel [9]. Kendaraan listrik atau EV adalah kendaraan yang memiliki satu atau lebih motor (listrik maupun tidak). Ilustrasi pada Gambar 2. 1 menunjukkan klasifikasi EV dengan skala dari 0 (0=kendaraan konvensional penggerak ICE) hingga 1 (1=*Full* EV).

Umumnya, terdapat 3 tipe dari EV menurut artikel [9]. Yang pertama adalah *All Electric Vehicle* (AEV) atau *Battery Electric Vehicle* (BEV) yang menggunakan sumber energi baterai dengan kapasitas besar. AEV atau juga dapat disebut BEV (*Battery Electric Vehicle*) menggunakan baterai untuk menggerakkan motor listrik tanpa adanya mesin ICE. AEV dapat digandeng dengan *supercapacitor* untuk memperpanjang umur baterai. Yang kedua adalah *Hybrid Electric Vehicle* (HEV). HEV mengombinasikan dua penggerak yakni ICE dan motor listrik. Hal ini dilakukan untuk menambah *range* atau jarak tempuh kendaraan dan juga menambah fleksibilitas Yang ketiga adalah Extended *Range Electric Vehicle* (EREV) adalah kendaraan listrik yang penggeraknya hanya motor listrik saja. Namun, memiliki unit generator untuk menambah jarak tempuh dari kendaraan listrik tersebut. Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya terdapat lebih dari 3 jenis EV namun menurut [9] EV dapat terbagi secara umum menjadi 3. Ilustrasi ketiga tipe EV dapat dilihat pada Gambar 2. 2.



Gambar 2. 1 Ilustrasi spektrum kendaraan listrik dari kendaraan konvensional hingga *full EV* [9]



Gambar 2. 2 (a).All Electric Vehicle (b).Hybrid Electric Vehicle (c).Extended Range Electric Vehicle [9]

Ketiga tipe EV yang dijelaskan di atas menggunakan sumber penyimpan energi baterai. Sumber penyimpan energi baterai dapat digandengkan dengan *supercapacitor* untuk memperpanjang umur baterai. Baik AEV, HEV, maupun EREV semuanya dapat dipasang *supercapacitor*. Terdapat banyak hasil penelitian yang menyatakan keuntungan menggunakan *supercapacitor* pada kendaraan listrik [8]. Selain ketiga tipe EV di atas pada jurnal artikel [9] juga dijelaskan beberapa tipe lagi seperti *Fuel Cell Electric Vehicle* (FCEV) dan *Solar Electric Vehicle.* Namun, kedua opsi tersebut masih memiliki harga yang relative mahal.

Pada tugas akhir kali ini kendaraan listrik yang akan digunakan adalah AEV. Spesifikasi kendaraan listrik yang akan digunakan akan dibahas lebih lanjut dan rinci pada BAB 3. Adapun segala macam istilah hibrid pada tugas akhiri ini merujuk pada penyimpan energi sistem hibrida baterai-*supercapacitor*. Atau yang biasanya disebut *Hybrid Energy Storage System (*HESS).

2.2 Baterai

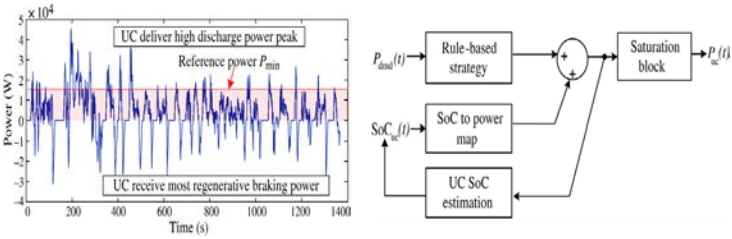
Baterai merupakan medium penyimpan energi yang sangat luas dan masif digunakan karena kerapatan energinya yang baik. Namun kerapatan energi maupun kerapatan daya dari sebuah baterai sangat bergantung pada jenis baterai. Baterai dengan tipe *lead-acid* mempunyai kerapatan energi dan daya yang rendah di antara baterai yang lain [10]. Baterai NiMH memiliki kerapatan energi dua kali lebih besar dari kerapatan energi baterai *lead-acid* dan ramah lingkungan. Baterai *lithium-ion* memiliki kerapatan daya dan energi yang lebih tinggi dibandingkan dengan teknologi baterai lainnya [10]. Oleh karena itu, baterai Li-Ion merupakan baterai yang populer dalam dunia teknologi.

2.3 Supercapacitor

Supercapacitor (SC) memiliki kerapatan daya yang lebih baik dan kerapatan energi yang lebih buruk daripada baterai. Namun, SC memiliki umur pemakaian atau siklus pemakaian yang lebih tinggi dibandingkan dengan baterai [11]. SC memiliki siklus hidup yang tinggi karena kelembaman elektrokimia dari elektroda karbon aktif [11]. Para ilmuwan juga bereksperimen untuk menggunakan material lain seperti grafena dan *nanotubes* [12]. Keunggulan-keunggulan SC seperti proses pengisian yang cepat, umur yang lebih panjang dan kerapatan daya yang lebih baik dari baterai membuat SC sangat cocok untuk digunakan sebagai sumber penyimpan energi bersamaan dengan baterai

2.4 Manajemen Energi Berbasis Aturan

Sebuah desain kontrol berbasis aturan telah dibahas dalam artikel jurnal [13]. Dalam penyimpan energi sistem hibrida, SC digunakan untuk menyediakan energi pada saat permintaan daya puncak dan menerima energi saat *regenerative braking*. Strategi pada jurnal artikel [13] didesain untuk memanfaatkan 2 kondisi di atas. Adapun desain kontrol manajemen energi yang diusulkan adalah dengan mendefinisikan daya referensi minimum dan permintaan daya. Apabila permintaan daya melebihi daya referensi minimum ataupun bernilai negatif (*regenerative braking*) maka daya akan di *supply* oleh *supercapacitor*. Sebaliknya jika permintaan daya berada diantara nilai 0 sampai batas daya minimum, maka daya akan di *supply* oleh baterai. Kemudian desain tersebut digabungkan dengan algoritma *State of Charge* atau SoC (Kapasitas tersedia dalam baterai) dari *supercapacitor*.



Gambar 2. 3 Desain Kontrol Manajemen Energi oleh J. Shen dan S. Dusmez [13]

Manajemen energi yang diusulkan oleh [1] menggunakan pendekatan yang berbeda dari kontrol berbasis aturan yang diusulkan oleh [13]. Manajemen energi yang diusulkan pertama-tama mempertimbangkan keadaan kendaraan. Apabila kendaraan dalam keadaan diam maka SC dapat diisi ulang oleh surplus dari daya yang diminta dengan daya tersedia pada baterai. Namun SC hanya dapat diisi apabila SoC SC berada di bawah 80%. Jika tidak, maka baterai hanya memasok daya yang diminta dan SC tidak dapat diisi ulang. Jika kendaraan dalam keadaan bergerak, maka besar dari torsi beban (T_L) menjadi pertimbangan selanjutnya. Apabila besar torsi beban menunjukkan nilai negatif, maka kendaraan dalam kondisi *regenerative braking*. Apabila salah satu SoC penyimpan energi kurang dari 95%, maka penyimpan energi tersebut diisi ulang sebesar daya terbangkitkan pada *regenerative braking.* Dan saat kedua penyimpan energi memiliki SoC kurang dari 95%, sebuah LPF digunakan untuk mengisi ulang kedua penyimpan energi. Apabila semua penyimpan energi dalam kondisi penuh (SoC > 95%). Maka sebuah mekanisme dinamis dilakukan untuk disipasi energi untuk melindungi penyimpan energi dari *over charge.*

Manajemen energi yang diusulkan pada [14] menggunakan algoritma dan *flowchart* juga. Namun mendefinisikan daya referensi minimum dan permintaan daya seperti pada [13]. Desain manajemen energi pada [14] dibandingkan pada [8] dengan desain yang diusulkan oleh artikel jurnal tersebut. Desain pada [8] berisi 3 tahapan; ketiga tahapan tersebut adalah menentukan mode operasi untuk penyimpan energi, perhitungan parameter pembobotan yang baru, dan pembuatan aturan untuk menentukan besar daya pada baterai dan *supercapacitor*. halus pada saat percepatan mendadak. Namun penelitian ini baru dalam tahapan simulasi pada komputer.

2.5 *End of Life (EOL)*

Baterai memiliki keadaan atau kondisi yang menunjukkan bahwa baterai tersebut telah mencapai *end of life* atau mencapai masa akhir hidupnya. Seperti yang telah dibahas pada tugas akhir sebelumnya yang disusun oleh Mizan [15]. Perusahaan baterai mendeskripsikan EOL baterai ini ke dalam beberapa jenis penyebutan.

Untuk penyebutan pertama, baterai dapat mencapai EOL dengan indikasi banyaknya siklus hidup atau *life cycle*. Siklus hidup sendiri adalah banyaknya siklus pengosongan dan pengisian kembali sampai menuju masa akhir hidup baterai. Yang dimaksud satu siklus penuh adalah pengosongan baterai secara penuh kemudian diisi lagi hingga penuh dengan nilai arus nominal dan pada temperatur ruangan. Sehingga pada penyebutan ini perusahaan menyebutkan berapa banyak siklus hidup baterai yang dapat ditempuh (contoh: 500 siklus).

Kemudian untuk penyebutan kedua perusahaan biasanya memberikan sebuah garansi terhadap pemakaian baterai. Garansi ini biasanya dalam satuan waktu seperti tahun. Hal ini dikarenakan baterai saat tidak digunakan pun dapat mengalami penurunan kapasitas.

Baterai tidak berarti tidak dapat digunakan sama sekali pada saat baterai mencapai EOL. Namun, baterai mengalami penurunan performa terutama pada penurunan kapasitas baterai. Penurun performa ini akan mengalami penurunan yang lebih cepat ketika baterai telah mencapai EOL. Penurunan kapasitas baterai pada masa EOL beragam tergantung dari jenis baterainya. Mengutip dari [15] baterai *lithium-ion* akan mencapai EOL ketika kapasitas maksimum baterai hanya bersisa 80% dari kapasitas awal pemakaian.

BAB III
PENENTUAN PARAMETER KENDARAAN DAN PERMODELAN SIMULASI

Pada bab ini akan dibahas mengenai segala macam parameter yang dibutuhkan dalam simulasi. Baik Simulasi profil daya pada ADVISOR maupun simulasi penuaan baterai. Simulasi ADVISOR akan dibahas tuntas pada subbab 3.1. Sedangkan simulasi penuaan baterai akan dikaji pada 3 subbab, yakni pada subbab 3.2, 3.3, dan 3.4.

Pada subbab 3.1 akan dibahas tentang parameter serta hasil dari simulasi ADVISOR. Adapun parameter simulasi ADVISOR yang akan dibahas adalah parameter kendaraan secara umum, Siklus berkendara, *Drivetrain Configuration*, *Energy Storage*, Motor, *Transmission*, *Wheel/Axle*, *Accessory*, dan *Powertrain Control*. Selain itu, subbab ini juga akan membahas mengenai hasil dari simulasi ADVISOR.

Kemudian simulasi penuaan baterai terbagi menjadi tiga bagian. Yang pertama adalah topologi dan desain dari manajemen energi berbasis aturan dibahas pada subbab 3.2. Kemudian pada subbab 3.3 akan dibahas perhitungan kapasitas penyimpan energi. Perhitungan kapasitas penyimpan energi ini terdiri dari penyimpan energi baterai dan penyimpan energi *supercapacitor*. Dan yang terakhir pada subbab 3.4 dibahas secara tuntas model penuaan baterai dengan SIMULINK. Desain manajemen pada subbab Untuk simulasi penuaan baterai akan dibahas pada subbab 3.2 diintegrasikan pada model penuaan baterai pada subbab 3.4. Ditambah lagi hasil perhitungan kapasitas penyimpan energi pada subbab 3.3 akan berperan sebagai salah satu *input* parameter pada simulasi ini. Adapun parameter-parameter lainnya akan dibahas pada subbab 3.4 itu sendiri. Selain itu, subbab 3.4 juga akan membahas cara kerja dari model penuaan baterai. Adapun hasil simulasi penuaan baterai akan dibahas pada bab selanjutnya

3.1 Parameter kendaraan, Simulasi ADVISOR & Profil Daya.

Pada subbab ini akan dibahas mengenai segala macam parameter yang dibutuhkan dalam simulasi ADVISOR. Mulai dari parameter umum kendaraan yang akan digunakan, hingga komponen-komponen spesifik kendaraan seperti baterai dan motor listrik. Selain itu, pada subbab ini akan dibahas juga mengenai hasil simulasi atau keluaran dari simulasi ADVISOR yang berupa profil daya.

3.1.1 Parameter Kendaraan

Tabel 3. 1 Spesifikasi Mobil Tesla Model S Signature 2012

Parameter	Model S Signature	Unit
Panjang	4,978	m
Tinggi	1,435	m
Lebar (dengan kaca spion)	2,189	m
Berat kendaraan	2.108	kg
Berat *battery pack*	344,544	kg
Drag Coefficient [16]	0,24	
Sel baterai	Panasonic NCR18650B [17]	
Modul baterai	74 Paralel, 6 grup seri (74p6s) [18]	
Total Kapasitas *Battery pack*	85	kWh
Tipe Motor	*Liquid cooled, 3-phase, 4-pole, AC induction*	
Peak Motor Power	362	HP
	270	kW
RPM maksimal	15.400	RPM
Arus fasa maksimal	900	A
Rantai penggerak	*Transverse rear motor, Rear Wheel Drive*	
Gearbox	*Single ratio transaxle*	

Model kendaraan yang akan digunakan adalah kendaraan Tesla Model S *Signature* 2012. Kendaraan ini adalah kendaraan dengan kapasitas baterai sebesar 85 kWh. Kemudian kendaraan ini menggunakan penggerak roda belakang atau RWD. Motor listrik juga terletak di belakang kendaraan dengan posisi melintang (*transverse*). Motor listrik yang digunakan adalah motor listrik AC induksi 3 fasa. Kendaraan ini memiliki kekuatan puncak hingga 362 HP atau setara 270 kW Adapun spesifikasi kendaraan Tesla Model S terlampir pada *datasheet* [19]. Rangkuman spesifikasi mobil Tesla Model S *Signature* 2012 dapat dilihat pada Tabel 3. 1 Spesifikasi Mobil Tesla Model S Signature 2012.

3.1.2 Simulasi ADVISOR (*Advance Vehicle Simulator*)

Gambar 3. 1 *Advance Vehicle Simulator* (ADVISOR)

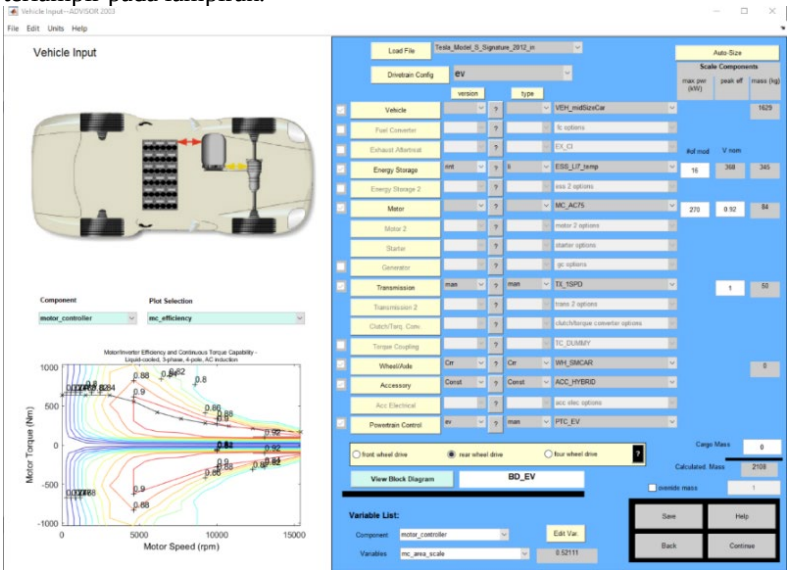
Advance Vehicle Simulator atau ADVISOR merupakan program simulasi pada MATLAB/Simulink untuk analisa kendaraan konvensional, *hybrid-electric*, *full electric*, dan *fuel cell* yang dikembangkan oleh *National Renewable Energy Laboratory* (NREL). Umumnya ADVISOR pada tugas akhir ini digunakan untuk menghasilkan profil daya dari parameter kendaraan dan siklus berkendara.

Parameter dari kendaraan listrik yang digunakan pada ADVISOR akan mengikuti spesifikasi dari Tesla model S *Signature* 2012 [19]. Adapun referensi spesifikasi yang digunakan selain dari *datasheet* [19] juga digunakan *datasheet* baterai NCR18650B [17] dan data *battery pack* dari jurnal *paper* [18]. Parameter-parameter kendaraan mempengaruhi profil daya pada hasil simulasi ADVISOR. Sehingga pengisian parameter yang sesuai dengan spesifikasi dirasa penting oleh penulis.

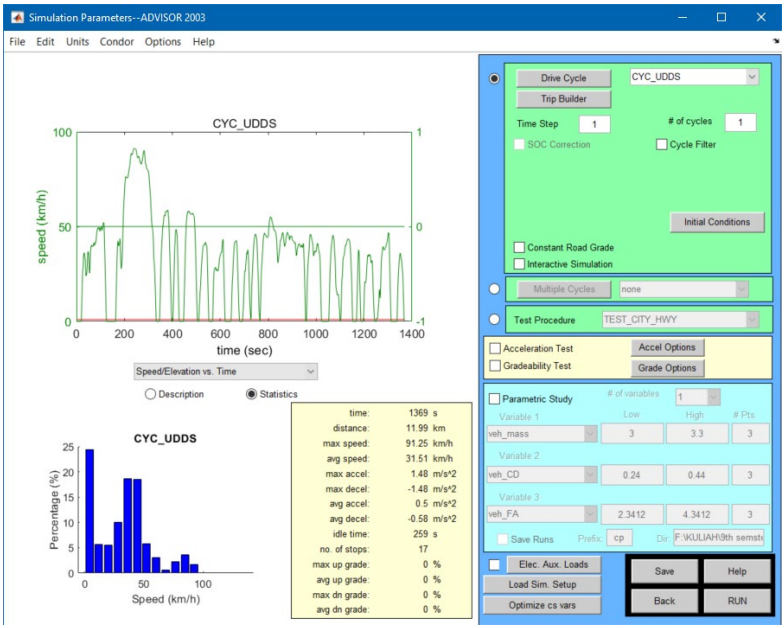
Pada halaman pertama ADVISOR, parameter-parameter kendaraan seperti *Drivetrain Configuration*, *Vehicle*, *Energy Storage*, Motor, *Transmission*, *Wheel/Axle*, *Accessory*, dan *Powertrain Control* dapat dipilih versi dan tipenya menggunakan grafis antarmuka (GUI) yang telah disediakan oleh simulator ADVISOR itu sendiri. Pemilihan versi dan tipe dilakukan dengan mengacu pada spesifikasi mobil Tesla Model S. Untuk *Energy Storage* dipilih versi “rint” atau model penyimpan energi tahanan dalam (*resistant internal*). Dan versi “ev” tipe “man” (manual) pada parameter *Powertrain Control*.

Setelah memilih versi dan tipe menggunakan GUI, selanjutnya adalah memilih *m file* spesifik dari parameter tersebut. Sebagai contoh, parameter kendaraan *"vehicle"* menggunakan *m file* dengan nama "VEH_midSizeCar". Kemudian untuk parameter *Energy Storage*, Motor, *Transmission*, *Wheel/Axle*, *Accessory*, dan *Powertrain Control* secara berurutan menggunakan *m file* "ESS_LI7_temp", "MC_AC75", "TX_1SPD", "WH_SMCAR", "ACC_HYBRID, dan "PTC_EV". Untuk detail lebih lengkap dari halaman pertama ADVISOR dapat dilihat pada Gambar 3. 2.

M file yang telah dipilih di atas belum merepresentasikan model kendaraan Tesla Model S *Signature* 2012. Sehingga, untuk dapat merepresentasikan mobil Tesla Model S maka *m file* tersebut dimodifikasi oleh penulis. Sebagai contoh, *m file* "MC_AC75" merepresentasikan kode *m file* motor induksi 75kW dari Westinghouse. *M file* tersebut dimodifikasi agar lebih merepresentasikan *Liquid-cooled, 3-phase, 4-pole, AC induction* seperti spesifikasi yang tertera pada Tabel 3. 1. Adapun *source code* dari semua *m file* yang telah dimodifikasi terlampir pada lampiran.



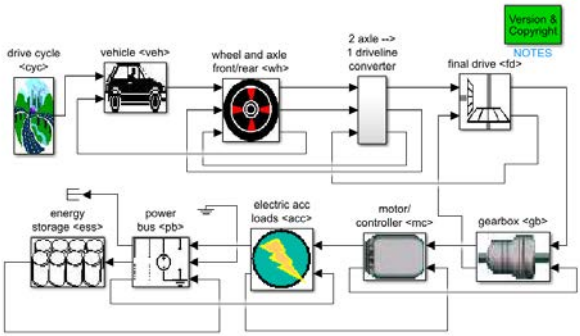
Gambar 3. 2 Halaman Pertama Simulasi ADVISOR parameter kendaraan



Gambar 3. 3 Halaman Kedua Simulasi ADVISOR Pemilihan Siklus Berkendara

Kemudian, pada halaman kedua simulasi ADVISOR akan disediakan berbagai pilihan siklus berkendara. Selain memilih siklus berkendara, pada halaman kedua ini juga kita dapat membuat siklus berkendara sendiri dengan menggabungkan beberapa siklus berkendara yang berbeda. Namun, pada tugas akhir ini siklus berkendara yang akan digunakan adalah siklus berkendara *Urban Dynamometer Driving Schedule* (UDDS). Siklus berkendara UDDS adalah siklus berkendara yang merepresentasikan keadaan berkendara pada jalan perkotaan. Siklus ini sering digunakan dalam artikel-artikel ilmiah seperti artikel yang ditulis oleh J. Shen pada [13]. Halaman kedua ADVISOR ini dapat dilihat pada Gambar 3. 3. Setelah memilih siklus berkendara, Simulasi ADVISOR dijalankan.

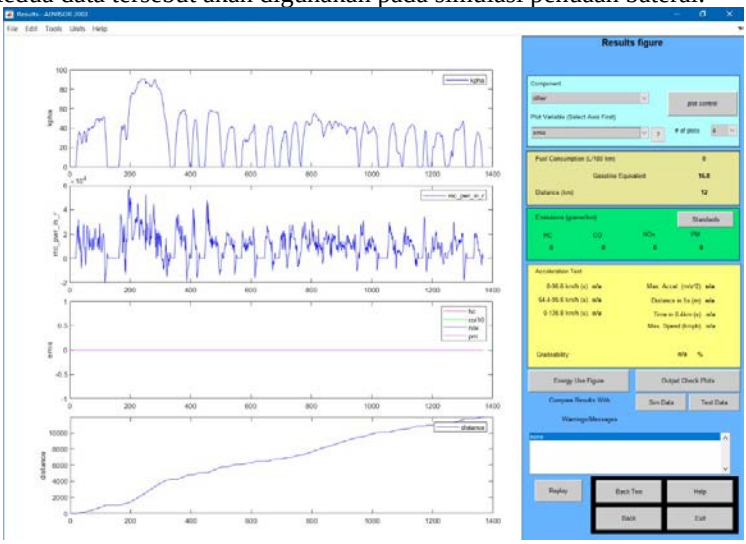
Parameter kendaraan, siklus berkendara dan simulasi ADVISOR dapat direpresentasikan dengan diagram blok. Diagram blok ini dapat diakses pada halaman pertama ADVISOR. Dan akan muncul dalam file SIMULIK. Blok diagram dapat dilihat pada Gambar 3. 4.



Gambar 3. 4 Blok Diagram Simulasi ADVISOR

3.1.3 Hasil Simulasi ADVISOR

Pada Gambar 3. 5. terlihat berbagai macam grafik dan data hasil simulasi ADVISOR. Grafik pertama dengan nama “kpha” merupakan grafik kecepatan terhadap waktu yang mengindikasikan kecepatan siklus berkendara UDDS. Kemudian di bawahnya terdapat grafik dengan nama “mc_pwr_in_r” yang merupakan profil daya motor. Kedua data tersebut akan digunakan pada simulasi penuaan baterai.



Gambar 3. 5 Hasil Simulasi ADVISOR

3.1.4 Profil Daya

Tabel 3. 2 Detail Data Profil daya

Daya Maksimal	56,4	kW
Daya Minimal	19,6	kW
Total Energi	3,8	kWh

Data dan grafik “mc_pwr_in” yang telah dibahas di atas adalah profil daya yang akan digunakan dalam desain manajemen energi. Seperti siklus berkendara UDDS, profil daya ini berjalan selama 1369 detik. Daya maksimal yang dicapai sebesar 56.4 kW dan daya minimal sebesar 19.6 kW. Detail data dari profil daya terdapat pada Tabel 3. 2 Detail Data Profil daya.

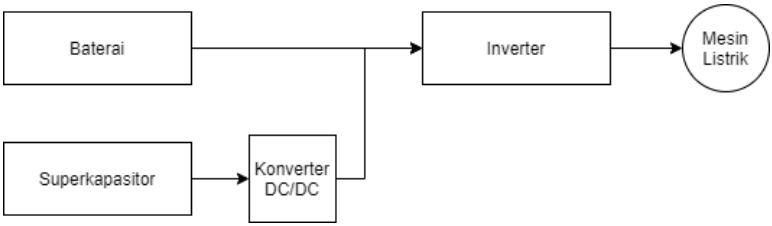
Profil daya ini nantinya yang akan menjadi data utama sebagai masukan dalam desain manajemen energi berbasis aturan. Desain manajemen energi atau *Energy Management System* (EMS) ini untuk membagi kebutuhan daya dari 2 sumber yakni baterai dan *supercapacitor* [2]. Profil daya yang telah dibagi dengan EMS akan menjadi *input* atau masukan dari penyimpan energi baterai dan *supercapacitor*.

3.2 Topologi & Desain Manajemen Energi berbasis Aturan.

3.2.1 Topologi

Topologi yang akan digunakan pada simulasi tugas akhir ini menggunakan topologi semi aktif seperti yang digunakan dalam penelitian [20]. Topologi semi aktif adalah topologi penyimpan energi sistem hibrida (baterai-*supercapacitor*) yang memiliki DC-DC konverter pada salah satu media penyimpannya yakni *supercapacitor*. Sehingga, memungkinkan untuk memanfaatkan potensi penuh *supercapacitor* dengan meningkatkan kisaran tegangan [10].

Spesifikasi penyimpan energi baterai dan *supercapacitor* akan dibahas pada Subbab 33. Pada subbab tersebut tegangan kerja *supercapacitor* lebih rendah daripada tegangan kerja motor/inverter mobil Tesla Model S maupun tegangan *battery pack*. Oleh sebab itu, pada simulasi tugas akhir ini akan menggunakan topologi semi aktif dengan DC-DC konverter pada sisi *supercapacitor*. Dengan adanya DC-DC konverter, maka *supercapacitor* dapat digunakan dengan kisaran tegangan yang lebih banyak. Diagram topologi semi aktif ini dapat dilihat pada Gambar 3. 6.

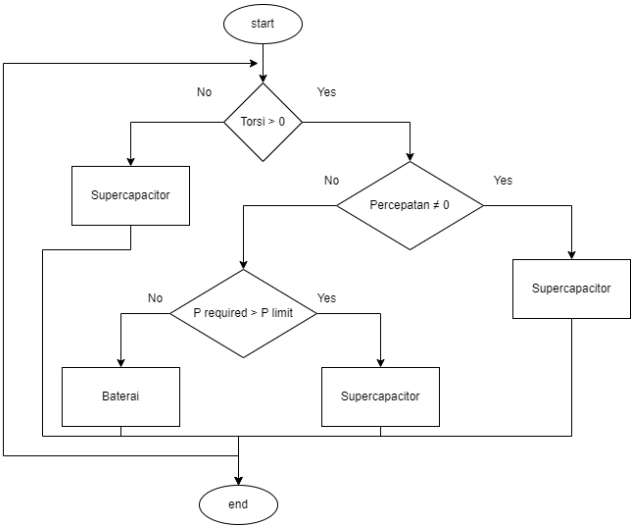


Gambar 3. 6 Diagram Topologi Semi Aktif

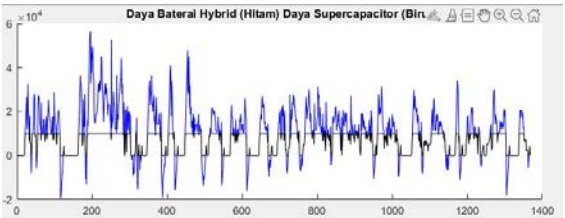
3.2.2 Desain Manajemen Energi

Pada subbab sebelumnya didapatkan profil daya dengan data pada Tabel 3. 2. Selain itu grafik profil daya juga dapat dilihat pada hasil simulasi ADVISOR pada grafik kedua di Gambar 3. 5.

Mula-mula torsi beban digunakan sebagai acuan untuk menentukan kondisi motor sedang bekerja sebagai motor atau generator (*regenerative braking*). Apabila motor dalam bekerja sebagai generator, maka daya yang terbangkitkan akan diambil oleh *supercapacitor*. Namun, apabila motor bekerja sebagaimana motor, maka percepatan motor yang menjadi pertimbangan selanjutnya. Apabila mobil mengalami percepatan maka daya akan diampuh oleh supercapacitor. Jika tidak maka faktor penentu selanjutnya adalah batas daya limit.



Gambar 3. 7 Diagram Alur Desain Manajemen Energi Berbasis Aturan



Gambar 3. 8 Grafik Hasil Manajemen Energi Berbasis Aturan

Batas daya limit yang digunakan adalah 10 kWh. Apabila daya yang diminta melebihi 10 kWh, maka *supercapacitor* akan menyuplai daya yang diminta. Namun bila daya belum melewati batas daya limit, maka baterai yang akan menyuplai daya yang diminta. Grafik hasil manajemen energi dapat dilihat pada Gambar 3. 8.

Dari diagram alur algoritma desain manajemen energi pada Gambar 3. 7 dibuat ke dalam bentuk kode dengan format *m file* pada MATLAB. Namun, terdapat beberapa asumsi dalam kode manajemen energi yang akan dibuat. Asumsi pertama adalah tegangan kerja motor dan tegangan *output* DC-DC konverter sama dengan tegangan *battery pack*. Kemudian, segala komponen yang pada sistem bekerja dalam kondisi ideal. Hal ini berarti, berbagai susut daya yang akan timbul dalam sistem akibat panas penghantar, *eddy current losses*, dan lain sebagainya diasumsikan tidak ada. Dan yang terakhir, temperatur baterai dianggap tidak mempengaruhi kinerja baterai. *Source code* yang digunakan terlampir.

Manajemen energi berbasis aturan dengan pertimbangan torsi beban, daya limit dan percepatan sebagai masukan membagi profil daya menjadi dua. Daya yang akan digunakan baterai dan daya akan digunakan *supercapacitor*. Daya maksimal yang akan digunakan baterai adalah 10kW dan daya minimalnya adalah 0 kW. Dengan total energi yang harus disediakan baterai dalam satu siklus berkendara sebesar 2,4kWh. Sedangkan, daya maksimal yang akan digunakan *supercapacitor* adalah 46.4 kWh dan daya minimalnya adalah sebesar 19,6kWh. Dengan total energi yang harus disediakan oleh *supercapacitor* dalam satu siklus berkendara sebesar 1,4 kWh.

Tabel 3. 3 Detail Profil Daya Penyimpan Energi Sistem Hibrida

Total energi baterai	2,4	kWh
Total energi *Supercapacitor*	1,4	kWh

3.3 Perhitungan Kapasitas Penyimpan Energi.

3.3.1 Perhitungan Kapasitas Baterai

Specifications

Rated capacity(1)	Min. 3200mAh
Capacity(2)	Min. 3250mAh Typ. 3350mAh
Nominal voltage	3.6V
Charging	CC-CV, Std. 1625mA, 4.20V, 4.0 hrs
Weight (max.)	48.5 g
Temperature	Charge*: 0 to +45°C Discharge: -20 to +60°C Storage: -20 to +50°C
Energy density(3)	Volumetric: 676 Wh/l Gravimetric: 243 Wh/kg

(1) At 20°C (2) At 25°C (3) Energy density based on bare cell dimensions

Gambar 3. 9 Spesifikasi Baterai Panasonic NCR18650B

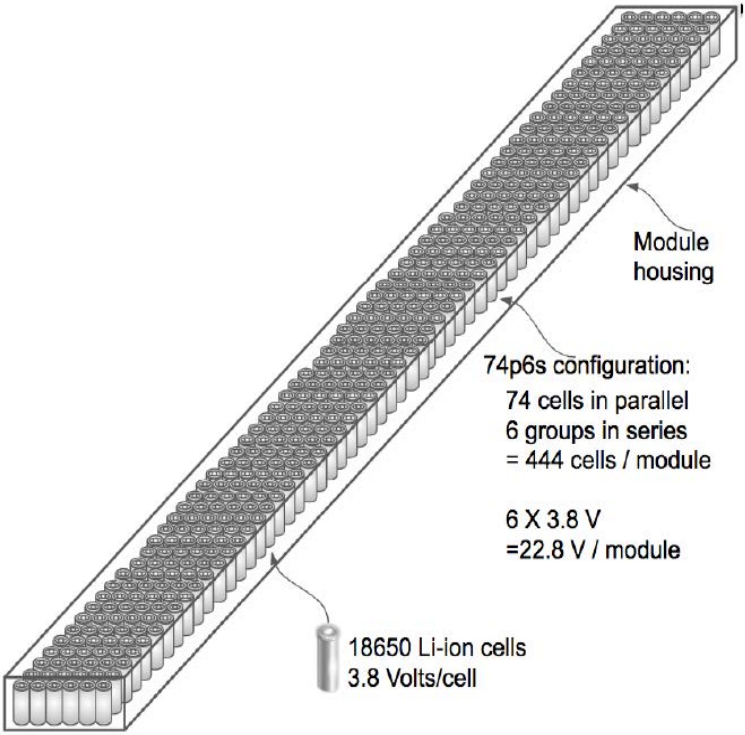
Pada tugas akhir ini media penyimpanan baterai yang akan digunakan adalah Panasonic NCR18650B. Baterai tersebut merupakan baterai yang juga digunakan pada kendaraan Tesla Model S *Signature* tahun 2012. *Datasheet* lengkap akan dilampirkan pada lampiran di akhir buku Tugas Akhir ini. Adapun spesifikasi singkat dari Panasonic NCR18650B tertera pada Gambar 3. 9.

Pada mobil Tesla Model S *battery pack* tersusun atas beberapa modul baterai. Adapun modul baterai tersusun dengan konfigurasi 74 sel baterai paralel yang disebut dengan grup. Kemudian grup baterai tersebut di seri sebanyak 6 grup. Sehingga modul baterai ini disebut modul 74p6s karena konfigurasinya dari 74 baterai paralel yang kemudian di seri lagi sebanyak 6 seri. Maka dari itu total sel baterai NCR18650B adalah sebanyak 7104 sel. Dengan tegangan modul sebesar 22.8 V dan kapasitas baterai sebesar 5.3 kWh atau 236.8 Ah. Kapasitas modul baterai didapat dengan persamaan (3.1). Spesifikasi dan susunan baterai 74p6s sesuai artikel ilmiah A. Sharma [18] dapat dilihat pada Gambar 3. 10 dan Tabel 3. 4

$$\text{Kapasitas modul baterai} = N_{Bp} \times \text{Kapasitas Baterai} \quad (3.1)$$

$$\text{Kapasitas modul baterai} = 74 \times 3200\ mAh = 236.8\ Ah$$

$N_{Bp} = Jumlah\ sel\ baterai\ yang\ diparalel$



Gambar 3. 10 74p6s Modul Baterai Tesla Model S [19]

Kemudian modul tersebut disusun lagi dengan konfigurasi seri sebanyak 16 modul untuk membentuk sebuah *battery pack*. Sehingga, tegangan total *battery pack* menjadi 364.8 V. Dan kapasitas *battery pack* sebesar 85 kWh atau 233 Ah. Akibatnya total sel baterai NCR18650B pada *battery pack* mobil Tesla Model S 2012 menjadi sebanyak 7104 sel baterai. Adapun spesifikasi singkat dari *battery pack* dapat dilihat pada Tabel 3. 5.

Pada simulasi yang akan dilakukan pada bab selanjutnya, *battery pack* akan direpresentasikan dengan blok *"Generic Battery"* pada Simulink/Simscape. Yang mana pada blok *"Generic Battery"* terdapat beberapa parameter-parameter yang harus diisi. Detail data parameter akan dibahas lebih lanjut.

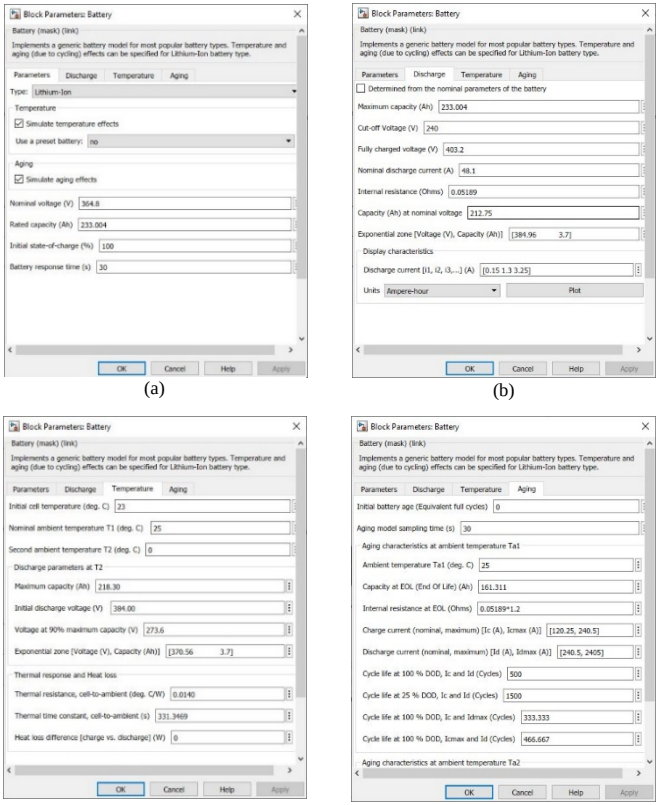
Tabel 3. 4 Spesifikasi Modul Baterai Tesla 74p6s

Modul Baterai Tesla 74p6s		
Total Kapasitas modul baterai	5,3	kWh
	236,8	Ah
Total tegangan modul baterai	22,8	V
Jumlah sel baterai yang di pararel (grup)	74	Sel
Jumlah grup yang di seri	6	Grup
Jumlah sel baterai dalam 1 modul	444	Sel
Total masa modul baterai	21,5	Kg
Dimensi	1369	mm
	1776	mm

Tabel 3. 5 Spesifikasi *Battery Pack* Tesla Model S *Signature* 2012

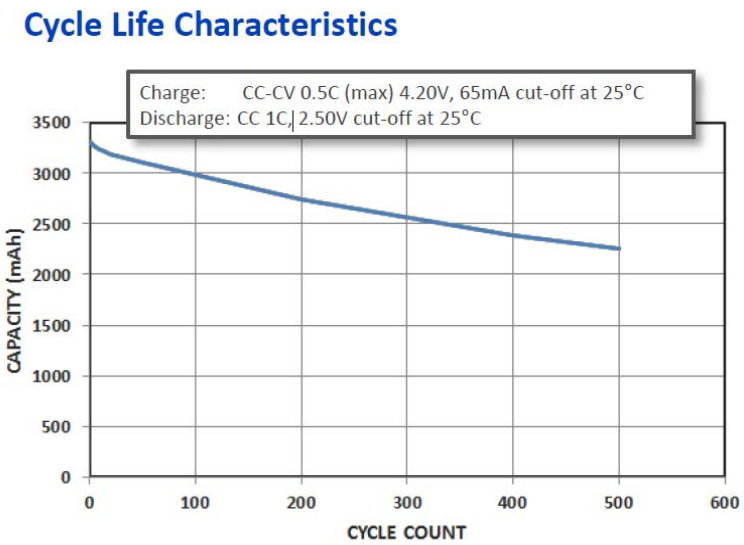
Tesla *Battery pack* (85 kWh)		
Total Kapasitas *Battery pack*	85	kWh
	233,0044	Ah
Total tegangan *Battery pack*	364,8	V
Jumlah modul 74p6s dalam *Battery pack*	16	Modul
Jumlah sel baterai pada *Battery pack*	7104	Sel
Total masa modul *Battery pack*	344,544	Kg

Pada pengisian parameter blok *"Generic Battery"* tab umum dipilih tipe baterai *lithium-ion* sesuai spesifikasi [17]. Kemudian mencentang kotak centang simulasi parameter temperatur dan *aging*. Agar tab parameter temperatur dan *aging* aktif dan dapat disimulasikan. Setelah itu, pada pilihan *"Use a preset battery"* dipilih *"no"*.Hal ini dikarenakan model *battery pack* Tesla Model S tidak tersedia pada *library* Simulink. Kemudian, tegangan nominal adalah total tegangan *battery pack* yang didapat dari Tabel 3. 5. Sedangkan nilai kapasitas adalah nilai kapasitas *battery pack* (85kWh) dibagi tegangan nominal menjadi 233,004 Ah. Dan yang terakhir adalah mengisi *"Initial SOC"* dengan angka 100% dan *"Battery response time"* sebesar 30 detik. Detail parameter tab umum dapat dilihat pada Gambar 3. 11(a).



Gambar 3. 11 Parameter *Generic Battery* (kiri atas ke kanan) (a) Parameter umum (b) Parameter *Discharge* (c) Parameter Temperatur (d) Parameter *aging*

Selanjutnya, pengisian parameter pada tab *discharge* mengikuti *datasheet* baterai [17] dan menggunakan pendekatan kurva karakteristik *discharge* pada [17]. Pendekatan kurva karakteristik ini untuk mengisi parameter *"Exponential zone (Exp_z)"* sesuai petunjuk dari Simulink pada blok *"Generic Battery"*. Kurva karakteristik pada [17] adalah untuk satu sel. Konversi nilai kurva sel ke *battery pack* diekspresikan pada persamaan 3.1 dan 3.2. Persamaan tersebut dapat berlaku untuk parameter-parameter lainnya pada tab *discharge.*



Gambar 3. 12 Grafik karakteristik siklus hidup baterai NCR18650B

$$Exp_z Volt\ (Battery\ pack) = Exp_z volt\ cell \times N_{Gs} \times N_M \quad (3.2)$$

$$Exp_z Ah\ (Battery\ pack) = Exp_z Ah\ cell \times N_{Bp} \quad (3.3)$$

Khusus untuk perhitungan parameter pada tab temperatur, pengisian model baterai mengikuti pendekatan kurva *discharge* pada [17] dan perhitungan pada [15]. Mizan dalam tugas akhirnya [15] telah menjelaskan dan menghitung secara rinci parameter pada tab temperatur. Tugas akhir ini tidak membahas temperatur lebih lanjut.

Pengisian parameter tab *aging* juga melakukan pendekatan kurva karakteristik siklus hidup pada *datasheet* [17]. Parameter "*Initial battery age*" diisi dengan angka 0, *sampling time* sebesar 30s dan temperatur pada suhu ruangan 25°C. Sedangkan tahanan internal adalah 120% dari tahanan internal pada tab *discharge*. Kemudian, nilai arus *charge* dan arus *discharge* nominal maupun maksimum baterai tersedia pada [17]. Nilai tersebut kemudian dikonversikan dengan persamaan 3.2 dan 3.3. Adapun parameter "*Cycle life*" pertama diisi dengan 500 *Cycle* [17]. Perhitungan nilai arus *charge* dan arus *discharge* tersebut akan dibahas lebih lanjut pada paragraf selanjutnya.

Grafik pada Gambar 3. 12 merupakan grafik siklus hidup yang diambil dari *datasheet* baterai [17]. Kurva karakteristik siklus hidup baterai ini diambil dengan spesifikasi pengoperasian baterai dalam keadaan dan arus tertentu. Pada saat *charge* atau pengisian baterai, metode yang digunakan adalah *constant current- constant voltage* (CC-CV). Dengan arus konstan sebesar 0.5C (1625mA) dan tegangan konstan 4.2V. Kemudian akan dilakukan pemutusan pada suhu 25°C dengan besar arus 65mA. Sedangkan pada saat *discharge*, metode yang digunakan adalah *constant current* (CC) sebesar 1C (3250mA). Dan juga akan mengalami pemutusan pada saat tegangan 2.5V (*cut-off voltage*) dan suhu 25°C,

Besar arus konstan baik pada saat *charging* maupun *discharging* di atas merupakan besar arus nominal tiap sel. Untuk mengubahnya menjadi nilai arus *battery pack*, maka nilai arus di atas dikalikan dengan banyaknya sel yang diparalel. Sehingga, nilai parameter *charge* dan *discharge current nominal* pada Gambar 3. 11(d) adalah sebagai berikut :

$$\text{Arus Nominal } charging = 1625\ mA \times 74\ sel\ paralel = 120{,}25\ A$$
$$\text{Arus Nominal } discharging = 3250\ mA \times 74\ sel\ paralel = 240{,}5\ A$$

Dapat dilihat pada Gambar 3. 12 Grafik karakteristik siklus hidup baterai NCR18650B, bahwa baterai mengalami penurunan kapasitas dari 3250 mAh menjadi 2250 mAh. Penurunan tersebut berlangsung bertahap mulai dari siklus ke-0 hingga siklus ke-500. Dengan kata lain, baterai mengalami penurunan kapasitas sebanyak 1000mAh atau turun hingga 69.23% dari kapasitas awal baterai selama kurun waktu 500 siklus. Seperti yang telah dijelaskan di atas, bahwa grafik di atas bekerja dalam besar arus (nominal) dan keadaan tertentu. Maka, nilai 500 siklus ini dimasukkan dalam parameter Gambar 3. 11 (d) pada isian *"Cycle life at 100%, Ic and Id (cycle)"*. Dikarenakan data *aging* atau siklus hidup pada *datasheet* [17] hanya tersedia kurva Gambar 3. 12. Maka pengisian parameter siklus hidup yang lain seperti *"Cycle life at 25%, Ic and Id (cycle)"* akan mengikuti rasio format model *"Generic battery"* pada data Simulink.

Kemudian, pada isian *"Capacity at EOL"* atau kapasitas baterai pada saat EOL diisi dengan mengikuti perhitungan di bawah:

$$Capacity\ at\ EOL = \text{Kapasitas } battery\ pack\ (Ah) \times 69.23\%$$
$$= 233\ \text{Ah} \times 69.23\% = 161.3\ Ah$$

3.3.2 Perhitungan Kapasitas *Supercapacitor*

Media penyimpanan *supercapacitor* yang akan digunakan adalah AOWEI UCK42V6800C. Spesifikasi lengkap *supercapacitor* tersebut dapat dilihat pada *Datasheet* [21] dan lampiran. Adapun rangkuman mengenai spesifikasi ringkas dari *supercapacitor* AOWEI UCK42V6800C terdapat pada Tabel 3. 6. Selain itu, DC-DC konverter yang digunakan adalah Brusa BDC546 - *Bidirectional 750 V DC/DC-Converter* [22]. *Datasheet* lengkap dari Brusa BDC546 terlampir.

Tabel 3. 6 Spesifikasi Supercapacitor AOWEI UCK42V6800C

Kapasitansi	7.200	F
Tegangan Operasi	2,8-4,0	V
Energi Tersimpan	8,5	Wh
Arus *charge/discharge* nominal	20	A
Arus *charge/discharge max (pulse)*	45	A
Cycle life (cycle)	50.000	*Cycle*
Berat	120	gram

Dari hasil pembagian daya yang telah dibahas pada sub subbab 3.2.2 dan yang dapat dilihat pada Tabel 3. 3, total energi yang dibutuhkan *supercapacitor* adalah sebesar 1,4 kWh dengan angka yang lebih rinci sebesar 1.425.000 Wh atau setara dengan $5{,}13 \times 10^9$ Ws. Dengan mempertimbang efisiensi dari Brusa BDC546 - *Bidirectional Converter* sebesar 98.9% maka energi yang dibutuhkan *supercapacitor* menjadi sebesar 5,1871 GWs.

Dengan mengacu pada Tabel 3. 6 Spesifikasi Supercapacitor AOWEI UCK42V6800C, Maka banyaknya *supercapacitor* yang dibutuhkan dapat dicari dengan persamaan 3.4.

$$E_{uc} = 0.5 \times cap \times \left({V_{uc\,\max}}^2 - {V_{uc\,\min}}^2\right) > 5{,}1871 \times 10^6 \qquad (3.4)$$

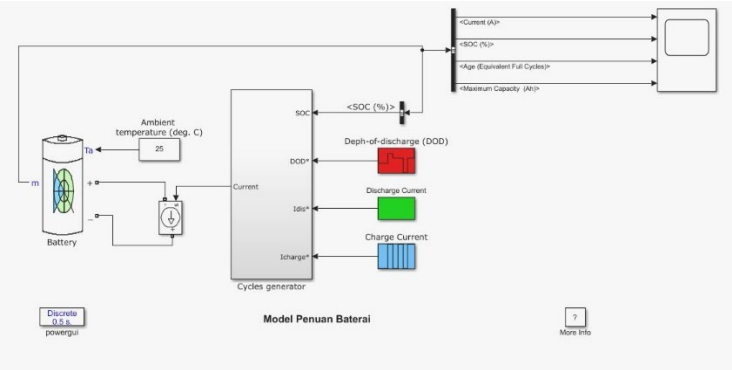
$$0.5 \times cap \times (4^2 - 2{,}8^2) > 5{,}1871 \times 10^6$$

$$cap \quad > \quad 1.271.338 \text{ F}$$

Maka untuk memenuhi daya dan energi yang harus diampu oleh *supercapacitor* dibutuhkan 1.271.338 F kapasitas *supercapacitor*. Sehingga, *supercapacitor* AOWEI UCK42V6800C yang dibutuhkan sebanyak 177 sel. Dengan total berat menjadi 21,24 kg.

3.4 Model Penuaan Baterai

3.4.1 Gambaran Umum Model Penuaan Baterai



Gambar 3. 13 Model Penuaan Baterai

Gambar di atas merupakan model penuaan baterai yang dimodifikasi dari model *"12.8 V, 40 Ah, Lithium-Ion (LiFePO4) Battery Aging Model (1000 h Simulation)"* yang tersedia pada Simulink. Blok diagram *"Battery"* merepresentasikan *battery pack* 85 kWh seperti yang telah dijelaskan pada subbab sebelumnya. Blok *ambient temperature* adalah blok yang merepresentasikan suhu sekitar. Blok *source current* memungkinkan untuk mengubah sinyal *output* blok *cycle generator* menjadi sumber arus sebagai *input* blok *"generic battery"*. Adapun *input* dari *"cycle generator"* terdiri dari blok *"Depth of Discharge (DOD)"*, *"discharge current"*, dan *"charge current"*. Blok "DOD" merupakan blok *stair generator* pada Simulink. Fungsi blok DOD adalah untuk menentukan seberapa banyak persenan baterai yang akan digunakan dalam simulasi. Untuk fungsi blok *discharge current* yang merupakan blok *repeating table* adalah sebagai *input* utama model penuaan baterai. Yang mana datanya berasal dari *output* kode *m file* desain manajemen energi berbasis aturan yang telah dibahas pada subbab sebelumnya dan akan berulang terus akibat fungsi dari blok *repeating table*. Kemudian blok *charge current* adalah blok *stair generator* dengan fungsi sebagai nilai arus *charging*. Kemudian yang terakhir adalah blok *cycle generator* yang berfungsi untuk memilih *input* baterai dengan parameter DOD. Adapun parameter blok DOD dan *charge current* akan dibahas lebih lanjut pada 3.4.2. Begitu pula dengan cara kerja blok *"Cycle Generator"* akan dibahas pada 3.4.3.

3.4.2 Parameter blok DOD dan charge current

Parameter DOD dibuat dengan menggunakan blok *stair generator* pada Simulink. Besar DOD dibuat beragam mulai dari 20%, 40%, 70%, 30%, dan 50%. Pemilihan DOD yang beragam ini untuk mereplika penggunaan kendaraan yang dinamis. Hal ini dikarenakan, umur baterai sangat berpengaruh pada besar DOD, arus *charging*, dan arus *discharging*.

Untuk parameter waktu masing-masing DOD tersebut beroperasi, waktu dibagi secara persentase dari seberapa lama simulasi akan berjalan. Sebagai contoh, pada Gambar 3. 14 simulasi dijalankan selama 20.000 jam ($20.000 \times 3600\ detik$). Kemudian, dapat terlihat bahwa 7% pertama dari 20.000 jam, DOD yang akan digunakan adalah 20%. lalu pada 20% selanjutnya dari 20.000 jam waktu simulasi DOD yang akan digunakan adalah 40% dan seterusnya. Parameter waktu ini juga akan digunakan pada blok *charging*.

Mekanisme *charging* pada simulasi ini menggunakan standar IEC-62196 seperti yang telah dijelaskan pada [23]. IEC-62196 adalah standar internasional yang dibuat oleh *International Electrotechnical Commission* (IEC) untuk menentukan karakteristik umum dan cara menyuplai energi dalam proses *charging*. Pada standar tersebut terdapat 4 mode *charging* kendaraan listrik. Ringkasan metode ini dapat dilihat pada Tabel 3. 7 Standar charging dari IEC-62196 [23].

Tabel 3. 7 Standar charging dari IEC-62196 [23]

Metode *Charge*	Fasa	Arus Maks.	Tegangan (Maks.)	Daya Maks.	Spesifik Konektor
Mode 1	1 Fasa 3 Fasa	16 A	230-240V 480 V	3.8 kW 7.6 kW	No
Mode 2	1 Fasa 3 Fasa	32 A	230-240V 480 V	7.6 kW 15.3 kW	No
Mode 3	1 Fasa 3 Fasa	32–250A	230-240V 480 V	60 kW 120 kW	Yes
Mode 4	DC	250–400 A	600-1000 V	400 kW	Yes

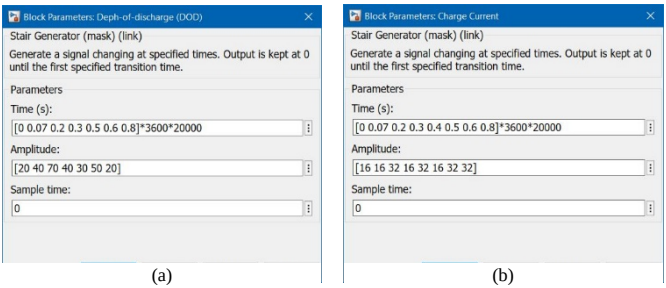
Standar ini berasal dari standar IEC-61851. Yang mana menyediakan klasifikasi pertama dari tipe *charging* berdasarkan daya nominal dan waktu *charging* [23] Adapun mengenai penjelasan keempat mode dari metode *charging* standar IEC-62196 adalah sebagai berikut:

- Mode pertama *(Slow charging)* adalah mode pengisian domestik, dengan intensitas arus maksimum sebesar 16 A. Dengan menggunakan steker standar satu fasa ataupun tiga fasa yang memiliki 3 konduktor fasa, netral dan pentanahan. Kemudian daya maksimum pada 1 fasa dan 3 fasa berturut-turut adalah 3.8 kW dan 7.6 kW. Mode ini biasanya digunakan di rumah.
- Mode kedua *(Semi-fast charging)* dapat digunakan di rumah maupun tempat umum. Intensitas arus maksimum adalah 32 A. Dan seperti mode sebelumnya menggunakan steker standar satu fasa ataupun tiga fasa yang memiliki 3 konduktor fasa, netral dan pentanahan.
- Mode ketiga *(Fast charging)* menggunakan intensitas maksimum arus dengan rentang 32-250 A. Mode ini mengharuskan penggunaan alat *Electric Vehicle Supply Equipment* sebuah *power supply* khusus untuk mengisi sebuah kendaraan listrik. Alat ini memungkinkan untuk melakukan komunikasi dengan kendaraan, memonitor proses pengisian, menambah fitur proteksi seperti memutus aliran energi sesaat sebelum konektor dilepas.
- Mode keempat (*Ultra-fast charging*). Diumumkan pertama kali pada IEC-62196-3 merupakan koneksi langsung dengan jaringan suplai DC dengan intensitas arus mencapai 400A, maksimum tegangan 10000 V, dan maksimum daya hingga 400kW. Mode ini juga membutuhkan *external charger* untuk berkomunikasi antara kendaraan dan *charger*, dan juga proteksi serta kontrol tambahan.

Pada parameter blok *charge current* akan dipilih 2 jenis mode. Mode pertama (*Slow charging)* akan digunakan pada saat kendaraan melakukan pengisian daya di rumah. Dengan asumsi daya PLN di rumah tersebut sebesar 3500-5500 VA atau golongan R-2/TR (Rumah tangga menengah tegangan rendah) sesuai [24]. Hal ini agar daya listrik rumah mampu menyuplai daya pengisian mode ini. Maka, arus *charging* atau nilai parameter yang akan dimasukkan pada blok *charging* adalah sebesar 16A. Kemudian, apabila kendaraan melakukan pengisian di tengah perjalanan seperti di Stasiun Pengisian Kendaraan Listrik Umum (SPKLU) atau fasilitas umum lainnya. Maka pengisian kendaraan listrik akan menggunakan mode kedua (*Semi-fast charging)* dengan besar arus 32 A. Detail parameter blok DOD dan blok *charging* dapat dilihat pada Gambar 3. 14.

3.4.3 Mekanisme kerja blok "*Cycle Generator*"

Apabila nilai DOD dalam baterai **<u>belum</u>** melewati atau sama dengan nilai blok DOD, maka *output cycle* generator adalah nilai yang berada pada blok *discharge current.* Namun, apabila DOD baterai **<u>telah</u>** tercapai atau sama dengan nilai blok DOD, maka *output cycle generator* berpindah menjadi nilai yang ada pada blok *charge current*. Pada saat baterai diisi dengan blok "*charge current*" maka sesaat sebelum **<u>baterai penuh</u>** blok *cycle generator* akan kembali menggunakan nilai pada blok *discharge current* sebagai *output*. Sehingga, akan timbul siklus *charging* dan *discharging* pada *output cycle generator*. Oleh karena itu, blok ini dinamakan blok *cycle generator* atau pembangkit siklus.



(a) (b)

Gambar 3. 14 Parameter blok DOD dan blok *charging*

BAB IV
HASIL SIMULASI DAN PEMBAHASAN

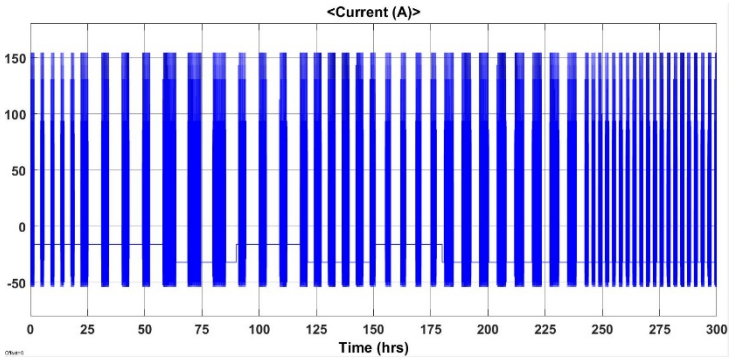
Bab ini akan menampilkan grafik, data serta pembahasan mengenai simulasi penuaan baterai. Pada subbab 4.1 akan ditampilkan berbagai grafik hasil simulasi penuaan baterai. Kemudian setelah itu akan dibahas juga analisis dari grafik hasil simulasi tersebut pada subbab 4.2. Selain itu, pada subbab 4.3 akan dijelaskan juga hubungan variasi daya limit terhadap umur atau waktu baterai mencapai EOL. Sedangkan, parameter-parameter simulasi, spesifikasi baterai, profil daya, serta model simulasi penuaan baterai ini telah dijelaskan sebelumnya pada Bab III.

4.1 Hasil Simulasi

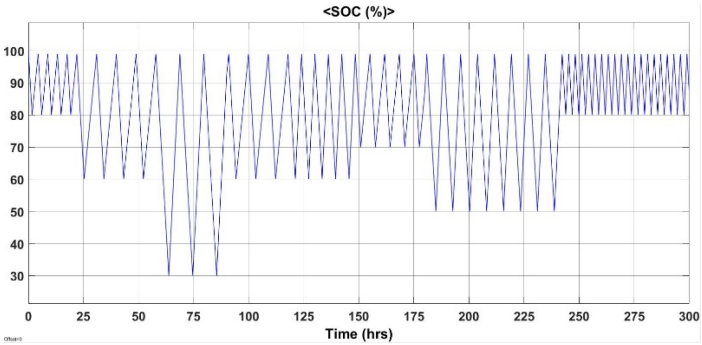
Pada subbab ini akan ditampilkan grafik-grafik serta data dari hasil simulasi penuaan baterai. Simulasi dilakukan dengan 2 rentang atau lama simulasi yang berbeda. Yakni simulasi selama 300 jam dan simulasi selama 20.000 jam. Masing-masing dari simulasi tersebut dilakukan dua kali pula dengan pembeda pada *input* blok *discharge current*. *Input* pertama adalah dengan memasukkan arus baterai saja. Dan kemudian *input* kedua dengan memasukkan arus baterai sistem hibrida. Adapun grafik dan data hasil simulasi penuaan baterai adalah sebagai berikut.

4.1.1. Simulasi 300 Jam

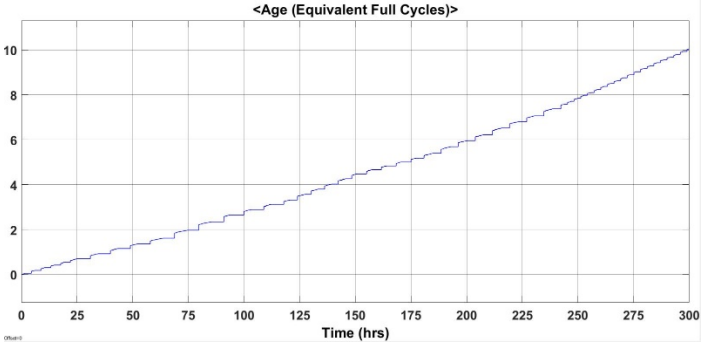
4.1.1.1 *Baterai Saja*



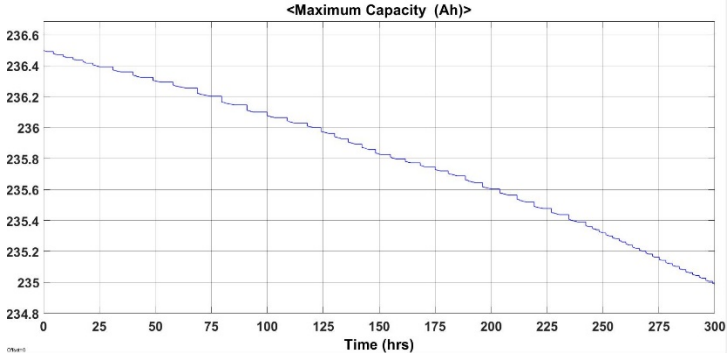
Gambar 4. 1 Grafik Arus Pada Simulasi 300 Jam Baterai Saja



Gambar 4. 2 Grafik SOC Pada Simulasi 300 Jam Baterai Saja

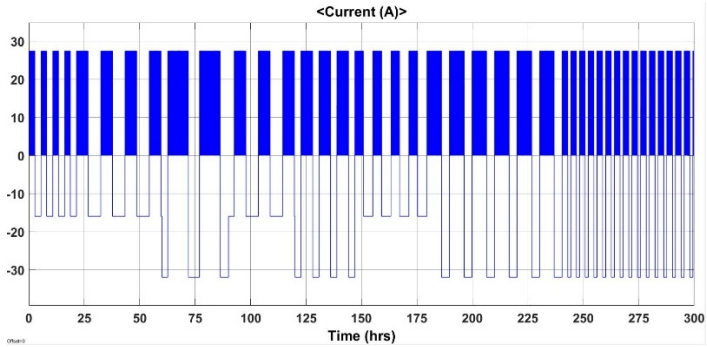


Gambar 4. 3 Grafik Umur Baterai (Satuan Setara Siklus Penuh) Pada Simulasi 300 Jam Baterai Saja

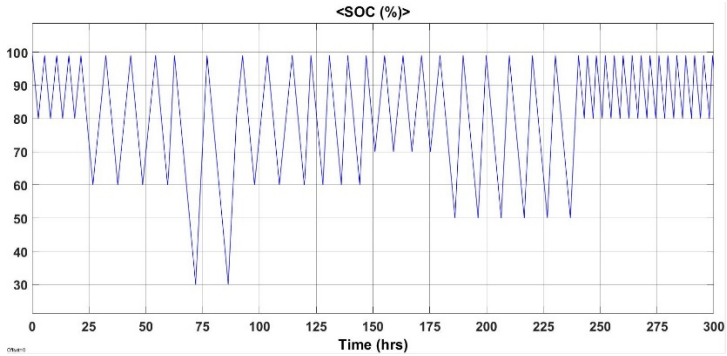


Gambar 4. 4 Grafik Penurunan Kapasitas Baterai Pada Simulasi 300 Jam Baterai Saja

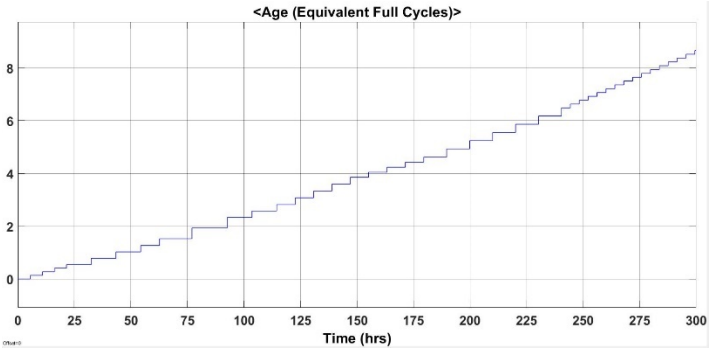
4.1.1.2 *Sistem Hibrida*



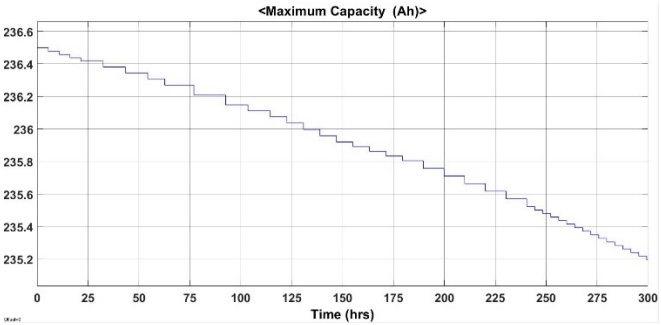
Gambar 4. 5 Grafik Arus Pada Simulasi 300 Jam Sistem Hibrida



Gambar 4. 6 Grafik SOC Pada Simulasi 300 Jam Sistem Hibrida



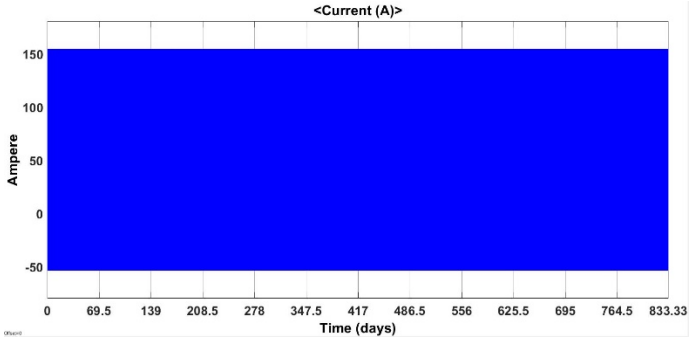
Gambar 4. 7 Grafik Umur Baterai (Satuan Setara Siklus Penuh) Pada Simulasi 300 Jam Sistem Hibrida



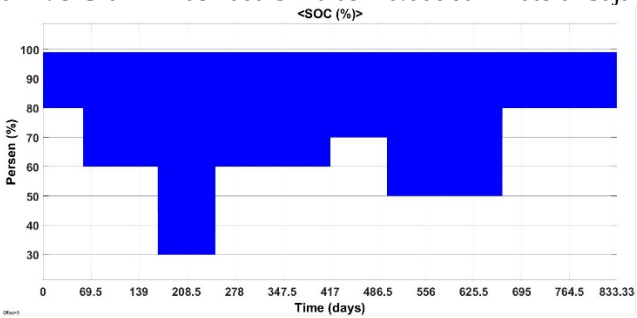
Gambar 4. 8 Grafik Penurunan Kapasitas Baterai Pada Simulasi 300 Jam Sistem Hibrida

4.1.2. Simulasi 20.000 Jam

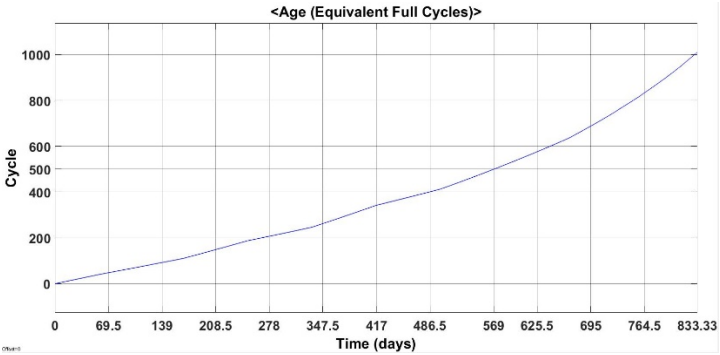
4.1.2.1 *Baterai Saja*



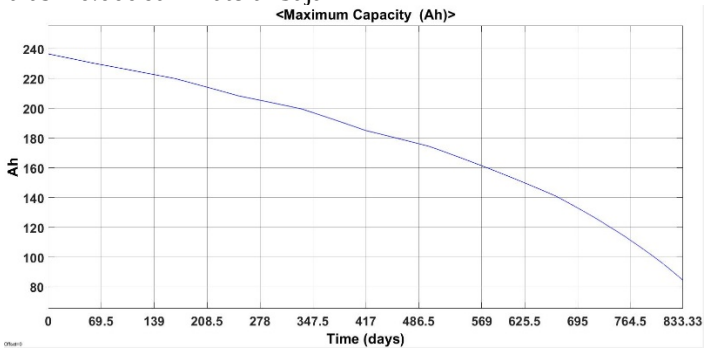
Gambar 4. 9 Grafik Arus Pada Simulasi 20.000 Jam Baterai Saja



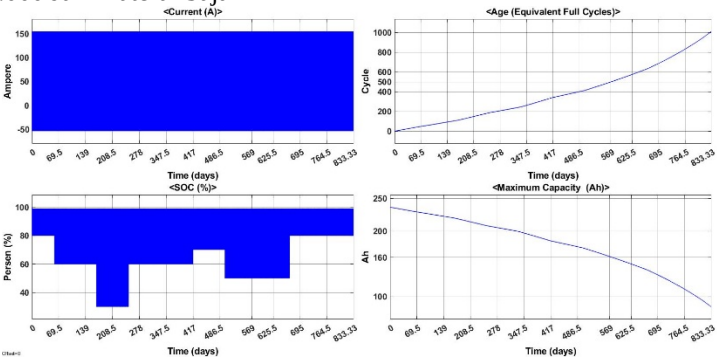
Gambar 4. 10 Grafik SOC Pada Simulasi 20.000 Jam Baterai Saja



Gambar 4. 11 Grafik Umur Baterai (Satuan Setara Siklus Penuh) Pada Simulasi 20.000 Jam Baterai Saja

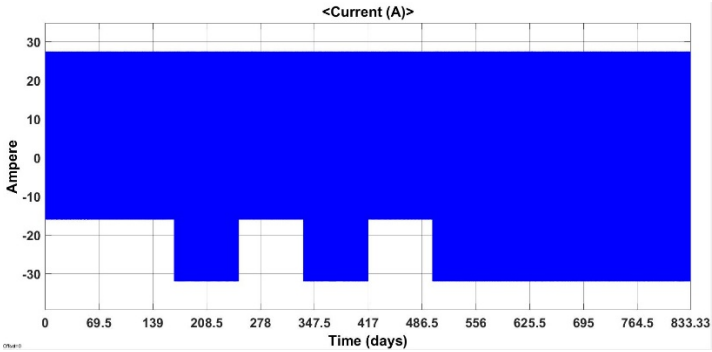


Gambar 4. 12 Grafik Penurunan Kapasitas Baterai Pada Simulasi 20.000 Jam Baterai Saja

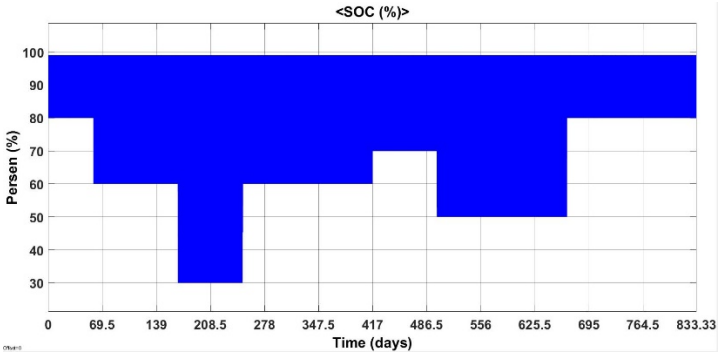


Gambar 4. 13 Grafik Hasil Simulasi 20.000 Jam Baterai Saja

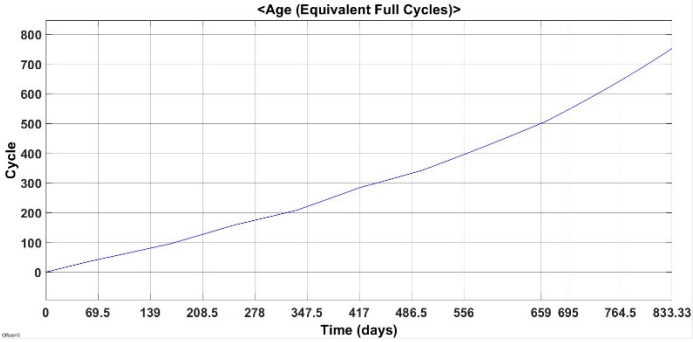
4.1.2.2 *Sistem Hibrida*



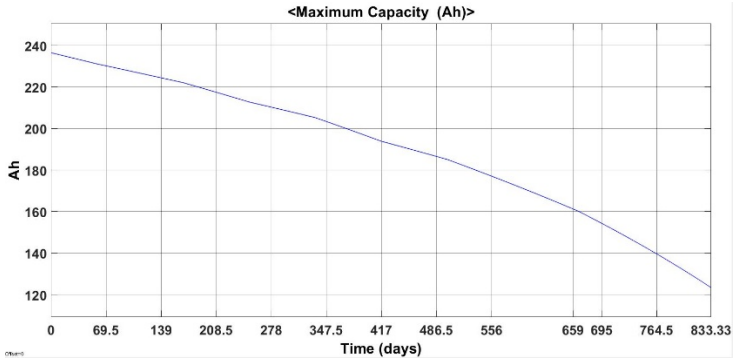
Gambar 4. 14 Grafik Arus Pada Simulasi 20.000 Jam Sistem Hibrida



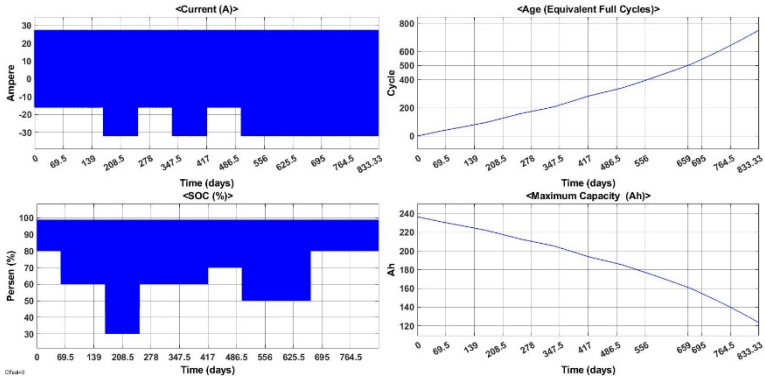
Gambar 4. 15 Grafik SOC Pada Simulasi 20.000 Jam Sistem Hibrida



Gambar 4. 16 Grafik Umur Baterai (Satuan Setara Siklus Penuh) Pada Simulasi 20.000 Jam Sistem Hibrida



Gambar 4. 17 Grafik Penurunan Kapasitas Baterai Pada Simulasi 20.000 Jam Sistem Hibrida



Gambar 4. 18 Grafik Hasil Simulasi 20.000 Jam Sistem Hibrida

4.2 Analisa Hasil Simulasi

Simulasi dilakukan selama 20.000 jam dan 300 jam. Setiap simulasi dilakukan dua kali dengan pembeda pada *input* blok *discharge current*. *Input* pertama adalah dengan memasukkan arus baterai saja. Dan kemudian *input* kedua dengan memasukkan arus baterai sistem hibrida. Hal ini dilakukan baik pada simulasi 20.000 jam maupun simulasi 300 jam. Sehingga total terdapat 4 hasil simulasi. Pada hakikatnya, inti dari simulasi penuaan baterai adalah untuk membandingkan nilai *cycle life* pada baterai yang telah mencapai EOL (*End of Life*). Namun, simulasi 300 jam khusus dilakukan untuk melihat respons DOD terhadap *cycle life* pada baterai.

4.2.1. Simulasi 300 jam

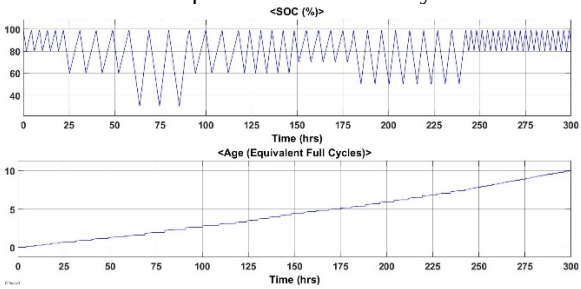
4.2.1.1 *Baterai saja*

Untuk keakuratan yang baik, pada blok *powergui* simulasi 300 jam dipilih tipe simulasi diskrit dengan *sampling time* 0.01 detik. Artinya, simulasi akan mengambil *sample* setiap 0.01 detik.

Profil arus atau *input* masukan blok *charge current* pada simulasi ini sesuai pada profil daya yang telah dibahas pada sub subbab 3.1.4. Kemudian, pada Gambar 4. 19 grafik SOC dapat terlihat bahwa baterai mengalami varian pengosongan SOC yang berbeda-beda. Hal ini dikarenakan parameter DOD yang telah dibahas pada sub subbab 3.4.2

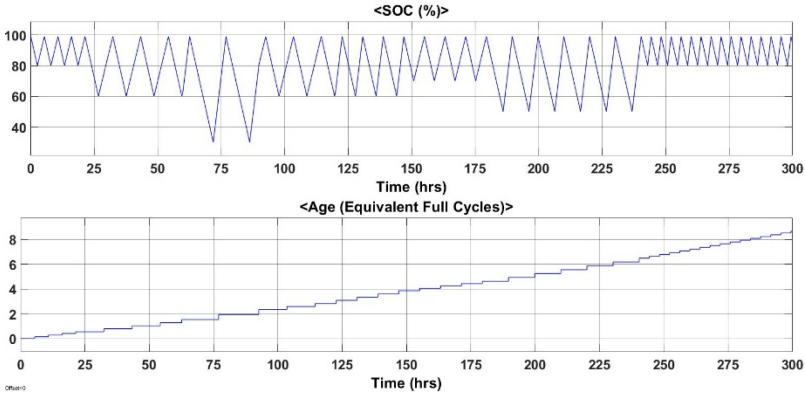
Simulasi 300 jam berakhir dengan grafik umur baterai menunjukkan angka 10 siklus setara siklus penuh. Siklus penuh adalah pengisian penuh 100% SOC baterai dan pengosongan penuh 100% DOD baterai dengan besar nominal arus. Sehingga, selama 300 jam simulasi berjalan, baterai seolah-olah mengalami pengisian dan pengosongan secara penuh selama 10 kali. Meskipun pada Gambar 4. 2 grafik SOC simulasi 300 jam baterai saja, tidak terlihat bahwa baterai mengalami 10 kali siklus penuh. Hal ini dikarenakan nilai tersebut adalah nilai penyetaraan siklus penuh dari siklus yang terlihat pada grafik SOC simulasi 300 jam baterai saja.

Kemudian hasil simulasi menunjukkan bahwa baterai mengalami penurunan kapasitas yang tidak begitu signifikan yakni sekitar 1.5 Ah. Seperti yang telah dijelaskan pada BAB 3, DOD memiliki beberapa variasi yang akan mempengaruhi laju kenaikan nilai siklus setara siklus penuh. Hubungan antara DOD dengan umur baterai dapat dilihat pada Gambar 4. 19 dan Gambar 4. 20. Hubungan tersebut akan dijelaskan lebih rinci pada subbab berikutnya.



Gambar 4. 19 Hubungan DOD dengan Umur Baterai pada Simulasi 300 Jam Baterai Saja

4.2.1.2 *Sistem Hibrida*



Gambar 4. 20 Hubungan DOD dengan Umur Baterai pada Simulasi 300 Jam Sistem Hibrida

Simulasi penuaan baterai 300 jam dengan profil arus hibrida menggunakan parameter yang sama dengan simulasi sebelumnya 4.2.1.1 Baterai saja. Simulasi ini berakhir dengan grafik umur baterai menunjukkan angka kurang lebih 8.5 siklus setara siklus penuh. Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, baterai seolah-olah mengalami pengisian dan pengosongan secara penuh selama 8.5 kali. Kemudian, penurunan kapasitas baterai pada simulasi ini adalah 1.2 Ah. Sehingga, terlihat dari nilai siklus sistem hibrida yang lebih rendah dari baterai saja. Dan penurunan kapasitas yang juga lebih rendah dari baterai saja. Maka, hal ini menunjukkan bahwa terdapat peningkatan performa baterai dari segi umur (siklus hidup) baterai. Peningkatan performa ini terlihat lebih jelas dengan mengamati Tabel 4. 1.

Tabel 4. 1 Perbandingan Hasil Simulasi 300 Jam Baterai Saja dengan Sistem Hibrida

Simulasi 300 Jam	Baterai Saja	Sistem Hibrida
Umur Baterai (Setara Siklus Penuh)	10 Siklus	8.5 Siklus
Penurunan Kapasitas Baterai	1.5 Ah	1.3 Ah

Hubungan variasi DOD terhadap laju kenaikan siklus hidup dapat dilihat dengan memperhatikan grafik SOC dan grafik *Age (Equivalent Full Cycle)* simulasi 300 jam sistem hibrida Gambar 4. 20. Pada 100.000 detik pertama simulasi, dapat ditarik kesimpulan bahwa 4 siklus pengosongan dan pengisian baterai dengan DOD 20% membutuhkan waktu kurang dari 100.000 detik. Sedangkan pada DOD 40% dengan jumlah siklus yang sama yakni 4 siklus, waktu yang dibutuhkan adalah sekitar 150.000 detik. Hal ini membuktikan bahwa nilai DOD mempengaruhi siklus hidup baterai.

Namun, dengan DOD yang kecil, periode atau waktu yang dibutuhkan satu siklus menjadi lebih singkat. Sehingga, frekuensi siklus menjadi naik atau tinggi. Hal ini terlihat jelas pada akhir simulasi pada saat DOD 50% berubah drastis menjadi DOD 20%. Frekuensi siklus terlihat naik signifikan pada DOD 20% dibandingkan frekuensi siklus pada DOD 50%. Karena frekuensi yang meningkat, maka grafik umur baterai tampak mengalami kenaikan yang cukup tajam. Namun, hal ini bukan berarti semakin kecil DOD semakin cepat penuaan baterai.

Karena, seperti yang telah dipelajari sebelumnya DOD 40% membutuhkan waktu yang lebih lama dibandingkan dengan DOD 20 %. Sehingga, hubungan DOD dengan penuaan baterai adalah sebagai berikut. Semakin besar DOD yang digunakan, maka semakin cepat pula penuaan baterai. Adapun penjelasan mengenai tumbuhnya laju grafik umur baterai pada akhir simulasi 300 jam sistem hibrida. Adalah karena meningkatnya frekuensi siklus pada DOD kecil.

4.2.2. Simulasi 20.000 jam

4.1.1.3 *Baterai saja*

Tidak seperti pada simulasi 300 jam, parameter blok *powergui* pada simulasi 20.000 jam menggunakan tipe diskrit dengan *sampling time* sebesar 0.5s. Hal ini dilakukan karena banyaknya data yang dihasilkan simulasi 20.000 jam. Sehingga, tidak memungkinkan untuk menggunakan *sampling time* 0.01s seperti pada simulasi 300 jam. Dengan demikian, simulasi 20.000 jam memiliki akurasi yang relatif sedikit lebih rendah dari simulasi 300 jam.

Seperti simulasi 300 jam sebelumnya profil arus mengikuti profil daya yang telah dibahas pada sub subbab 3.1.4. Kemudian, SOC yang beragam dikarenakan parameter DOD mengikuti isian yang telah dibahas pada sub subbab 3.4.2 sebelumnya.

Hasil simulasi menunjukkan baterai mencapai masa *End of Life* pada siklus ke-500. Angka ini berkorelasi langsung dengan parameter baterai *aging* yang telah dibahas pada subbab 3.3.1 Perhitungan Kapasitas Baterai. Yakni pada parameter dengan isian "*Cycle life at 100% DOD, Ic & Id"* yang diisi dengan angka 500 *cycle*. Hal ini terjadi karena profil arus yang digunakan tidak mencapai nilai maksimal arus *charging* dan *discharging*. Selain itu, baterai mencapai EOL pada siklus ke-500 juga diperkuat dengan nilai penurunan kapasitas baterai pada siklus ke-500. Penurunan kapasitas baterai pada saat baterai mencapai siklus ke-500 adalah 161.4 Ah. Nilai tersebut mendekati dengan nilai yang dimasukkan pada parameter "*Capacity at EOL"* yakni sebesar 161.311 Ah.

End of Life baterai pada simulasi 20.000 jam dengan arus profil baterai saja dicapai pada detik ke-49.175.566,280 sesuai data pada Gambar 4. 11. Kemudian dikonversikan menjadi 13.659,88 Jam atau 569 hari. Artinya, baterai mencapai kapasitas EOL 161.4 Ah pada pemakaian secara non-stop selama 13.659,88 jam atau 569 hari.

Seperti yang telah dijelaskan pada subbab 4.2.1, terdapat kenaikan laju penuaan pada 20% waktu terakhir simulasi. Laju penuaan ini terlihat lebih jelas dibandingkan simulasi 300 jam. Hal ini disebabkan karena waktu simulasi yang lebih lama. Dengan frekuensi yang sama, waktu yang lebih lama membuat jumlah siklus lebih banyak. Sehingga, kenaikan laju penuaan tampak lebih jelas.

4.1.1.4 *Sistem Hibrida*

Untuk hasil simulasi dengan sistem hibrida 20.000 jam. Hasil simulasi menunjukkan bahwa baterai mencapai masa EOL pada siklus ke-500. Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, nilai siklus ke-500 ini berhubungan dengan parameter baterai yang dijelaskan pada subbab 3.3.1. Kemudian, penurunan kapasitas baterai pada saat EOL adalah 161,3 Ah. Nilai ini sama seperti sebelumnya, mendekati atau sama dengan nilai kapasitas EOL pada parameter baterai yang dibahas sebelumnya (subbab 3.3.1. Perhitungan Kapasitas Baterai).

Profil arus atau *input* masukan blok *charge current* pada simulasi ini sesuai pada profil daya yang telah dibahas pada sub subbab 3.1.4. Pada Gambar 4. 19 grafik SOC dapat terlihat bahwa baterai mengalami varian pengosongan SOC yang berbeda-beda. Hal ini dikarenakan parameter DOD yang telah dibahas pada sub subbab 3.4.2

End of Life baterai pada simulasi 20.000 jam dengan arus profil baterai sistem hibrida dicapai pada detik ke-56.920.448,501. Kemudian dikonversikan menjadi 15.811,236 jam atau 659 hari. Artinya, baterai mencapai kapasitas EOL 161.3 Ah pada saat pemakaian secara non-stop selama 15.811,236 jam atau 659 hari. Memiliki peningkatan pemakaian selama 90 hari dibandingkan dengan simulasi baterai saja sebelumnya.

Dari hasil simulasi ini terlihat bahwa dengan menambahkan penyimpan energi *supercapacitor*, baterai mengalami peningkatan siklus hidup selama 90 hari. Dengan kata lain, penggunaan penyimpan energi sistem hibrida (HESS) baterai-*supercapacitor* memberikan peningkatan umur baterai hingga 115.8% dibandingkan dengan penyimpan energi baterai saja. Perbandingan data simulasi 20.000 jam antara baterai saja dengan sistem hibrida dapat dilihat dengan jelas pada Tabel 4. 2 Rekapitulasi Data Hasil Simulasi 20.000 Jam.

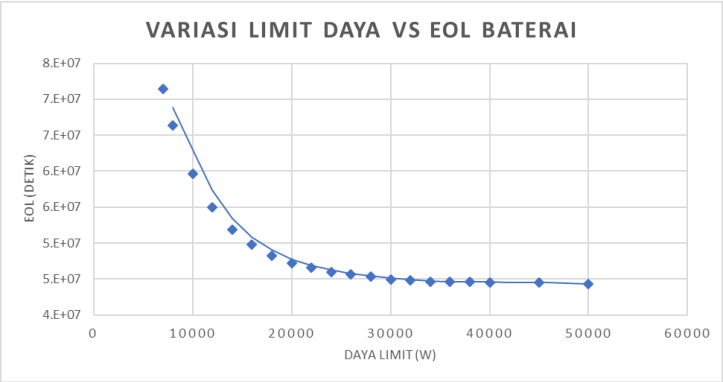
Selain mengalami peningkatan umur, jarak tempuh kendaraan juga mengalami peningkatan. Hal ini dapat dilihat dengan membandingkan Gambar 4. 19 dengan Gambar 4. 20 Hubungan DOD dengan Umur Baterai. Dapat dilihat bahwa pada simulasi baterai saja banyaknya siklus terlihat lebih banyak atau pengisian baterai dilakukan lebih sering. Sebagai contoh pada DOD 70% penyimpan baterai saja melakukan pengisian sebanyak 3 kali sedangkan pada penyimpan energi hibrid pengisian hanya dilakukan sebanyak 2 kali.

Tabel 4. 2 Rekapitulasi Data Hasil Simulasi 20.000 Jam

Baterai Mencapai EOL	Baterai Saja	Sistem Hibrida
Detik	49.175.566,280	56.920.448,501
Jam	13.659,88	15.811,236
Hari	569	659

4.3 Analisa Hubungan Batas Daya Limit Dengan Siklus Hidup Baterai

Pada sub-bab ini akan dilakukan simulasi penuaan baterai dengan variasi daya limit. Daya limit yang digunakan pada simulasi sebelumnya dan yang telah dibahas pada BAB 3 adalah sebesar 10.000 W. Dengan mengubah nilai daya limit yang digunakan maka mengubah besar daya dan energi yang harus diampu oleh baterai dan *supercapacitor*. Sehingga, akan mengubah lama waktu untuk baterai mencapai EOL.



Gambar 4. 21 Grafik Variasi Limit Daya VS End of Life baterai

Dari Grafik Variasi Limit Daya VS End of Life baterai dapat dilihat hubungan antara perubahan daya limit dengan umur baterai. Semakin kecil limit daya maka semakin lama baterai mencapai EOL. Hal ini dapat dilihat pada limit daya yang berada di bawah 10kW, lama baterai mencapai EOL meningkat secara eksponensial. Dengan titik paling tinggi dimiliki oleh daya limit 7.000-Watt yang memiliki nilai EOL mencapai 827 hari. Sebaliknya, semakin tinggi daya limit maka semakin cepat baterai mencapai EOL. Alasan mengapa grafik mengalami saturasi pada detik ke-50×10^{6} adalah karena baterai mengampu lebih dari 90% profil daya pada saat limit daya berada di atas 20kW. Sehingga menaikkan limit daya di atas 20 kW tidak memberikan pengurangan yang signifikan untuk baterai mencapai EOL. Namun, perubahan limit daya ini mempengaruhi kapasitas *supercapacitor* yang harus disediakan. Semakin rendah daya limit semakin besar kapasitas *supercapacitor* yang diperlukan.

BAB V
KESIMPULAN & SARAN

5.1 Kesimpulan

Pada akhirnya, terdapat beberapa poin kesimpulan yang dapat ditarik pada pengerjaan tugas akhir ini, diantarainya:

1. Penggunaan sistem penyimpan energi hibrid (HESS) dapat meningkatkan umur baterai dan menambah jarak tempuh.
2. Umur baterai mengalami peningkatan hingga 90 hari pada hasil simulasi 20.000 jam pada tugas akhir ini.
3. Nilai *Depth of Discharge* (DOD) mempengaruhi laju penuaan baterai
4. Variasi limit daya pada manajemen energi berbasis aturan mempengaruhi nilai *End of Life* (EOL) pada baterai
5. Semakin tinggi nilai limit daya semakin rendah atau semakin cepat baterai mencapai EOL
6. Semakin rendah nilai limit daya, semakin tinggi atau semakin lama baterai mencapai EOL.
7. Semakin rendah nilai limit daya, maka semakin tinggi nilai kapasitansi *supercapacitor* yang harus disediakan.

Pada kesimpulan nomor 6 terdapat poin penting yang harus menjadi perhatian. Dengan bertambahnya nilai kapasitansi *supercapacitor*, maka bertambah pula jumlah modul *supercapacitor* yang dibutuhkan. Ataupun menambah kapasitas *supercapacitor*. Bagaimanapun juga kedua cara tersebut berarti menambah biaya yang harus dikeluarkan.. Namun, pada tugas akhir ini tidak membahas masalah biaya lebih lanjut

5.2 Saran

Dikarenakan besar DOD mempengaruhi laju penuaan baterai. Penelitian atau desain manajemen energi berbasis aturan berikutnya dapat mempertimbangkan masukan DOD sebagai parameter penentuan manajemen energi. Dalam tugas akhir ini, simulasi yang dilakukan masih mengabaikan berbagai macam komponen elektronika daya yang lain. Permodelan simulasi dengan model mendekati mobil yang sesungguhnya serta variabel-variabel atau parameter yang lebih banyak akan membuat simulasi menjadi lebih akurat.

DAFTAR PUSTAKA

[1] I. Azizi and H. Radjeai, "A new strategy for battery and supercapacitor energy management for an urban electric vehicle," *Electrical Engineering,* vol. 100, pp. 667-676, 2018.

[2] A. Panday and H. Bansal, "A Review of Optimal Energy Management Strategies for Hybrid Electric Vehicle," *International Journal of Vehicular Technology,* pp. 1-19, 2014.

[3] M. Sabri, K. Danapalasingam and M. F. Rahmat, "A review on hybrid electric vehicles architecture and energy management strategies," *Renewable & Sustainable Energy Reviews,* vol. 53, pp. 1433-1442, 2016.

[4] A. Khaligh and Z. Li, "Battery, Ultracapacitor, Fuel Cell, and Hybrid Energy Storage Systems for Electric, Hybrid Electric, Fuel Cell, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles: State of the Art," *IEEE Transactions on Vehicular Technology,* vol. 59, pp. 2806-2814, 2010.

[5] J. P. Trovão, P. G. Pereirinha, H. M. Jorge and C. H. Antunes, "A multi-level energy management system for multi-source electric vehicle - An integrated rule-based meta-heuristic approach," *Applied Energy,* vol. 105, pp. 304-318, 2013.

[6] H. F. Gharibeh, L. M. Khiavi, M. Farrokhifar, A. Alahyari and D. Pozo, "Power Management of Electric Vehicle Equipped with Battery and Supercapacitor Considering Irregular Terrain," *2019 International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE),* pp. 1-5, 2019.

[7] B. Lakshmikantha, "Performance Evaluation of Battery and SuperCapacitor for Electric Vehicle with Hybrid Techniques," 2019.

[8] K. Gokce and A. Ozdemir, "A Rule Based Power Split Strategy for Battery/Ultracapacitor Energy Storage Systems in Hybrid Electric Vehicles," 2016.

[9] C. Mahmoudi, A. Flah and L. Sbita, "An Overview of Electric Vehicle Concept and Power Management Strategies," *2014 International Conference on Electrical Sciences and Technologies*

in Maghreb (CISTEM), pp. 1-8, 2014.

[10] L. O. M. F. Rachim, "DESAIN SIMULATOR HARDWARE-IN-THE-LOOP," *Magister Tesis Teknik Sistem Tenaga Departemen Teknik Elektro FTEIC, ITS*, 2021.

[11] V. Sedlakova, J. Sikula, J. Majzner and P. Sedl, "Supercapacitor Degradation Assesment by Power Cycling and Calendar Life Tests," *Metrology and Measurement Systems*, pp. 345-358, 2016.

[12] M. El-Kady and R. Kaner, "Scalable fabrication of high-power graphene micro-supercapacitors for flexible and on-chip energy storage.," *Nature communications*, vol. 4, p. 1475, 2013.

[13] J. Shen, S. Dusmez and A. Khaligh, "Optimization of Sizing and Battery Cycle Life in Battery/Ultracapacitor Hybrid Energy Storage Systems for Electric Vehicle Applications," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 10, pp. 2112-2121, 2014.

[14] R. Carter, A. Cruden and P. Hall, "Optimizing for Efficiency or Battery Life in a Battery/Supercapacitor Electric Vehicle," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 61, pp. 1526-1533, 2012.

[15] T. A. Mizan, "Analisis Pengaruh Penambahan Ultrakapasitor Terhadap Usia Baterai Pada Media Penyimpanan Energi Hibrida Kendaraan Listrik Transit dan Non-Transit," *Undergraduate Thesis Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro dan Informatika Cerdas Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya*, 2021.

[16] D. Sherman, "Drag Queens; Five Slippery Cars Enter A Wind Tunnel; One Slinks Out A winner," Tesla, 06 2014. [Online]. Available: https://www.tesla.com/sites/default/files/blog_attachments/the-slipperiest-car-on-the-road.pdf. [Accessed 08 11 2021].

[17] Panasonic, "NCR18650B Datasheet (PDF) - Panasonic Battery Group," Panasonic, [Online]. Available: https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/597043/PANASONICBATTERY/NCR18650B.html. [Accessed 22 10 2021].

[18] A. Sharma, P. Zanotti and L. P. Musunur, "Enabling the Electric Future of Mobility: Robotic Automation for Electric Vehicle Battery Assembly.," *IEEE Access,* vol. PP, pp. 1-1, 2019.

[19] Tesla, Inc., "2012 Tesla Model S Specifations And Features," Tesla, 7 6 2012. [Online]. Available: https://www.tesla.com/blog/model-s-efficiency-and-range. [Accessed 08 11 2021].

[20] Q. Zhang and G. Li, "Experimental Study on A Semi-active Battery-Supercapacitor Hybrid Energy Storage System for Electric Vehicle Application," *IEEE Transactions on Power Electronics* , vol. 35, pp. 1014-1021, 2020.

[21] Shanghai Aowei Technology Development Co, "aowei.com," 2018 December 2018. [Online]. Available: http://www.aowei.com/en/uploads/product/20181210/15444197912079.pdf. [Accessed 13 November 2021].

[22] Brusa, "Brusa BDC546 - Bidirectional 750 V DC/DC-Converter," 03 2021. [Online]. Available: https://www.brusa.biz/wp-content/uploads/2021/03/BRUSA_Factsheet_BDC546.pdf. [Accessed 19 Nov 2021].

[23] J. Sanguesa, V. Torres-Sanz, P. Garrido, F. J. Martinez and J. M. Marquez-Barja, "A Review on Electric Vehicle: Technologies and Challenges," *Smart Cities,* vol. 4, pp. 372-404, 2021.

[24] Mentri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, "Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia Nomor 31 Tahun 2014," in *Tarif Tenaga Listrik yang Disediakan oleh Perusahaan Perseroan (Persero) PT Perusahaan Listrik Negara*, Jakarta, 2014.

LAMPIRAN

Source Code

1. **Kode *M File* Manajemen Energi Berbasis Aturan**

```
clear
clc
%Load data power motor
    load('Parameter_Simulasi7.mat')
    speed = kpha;
    accel = diff(speed) ;
    accel(1370) = 0;
    arl = 0;
    acc = zeros(size(kpha));
    for i = 1:length(kpha)
        a = accel(i,:);
            if a > 0
                arl = a;
            else
                arl = 0;
            end
        acc(i,:) = arl;
    end
    power = mc_pwr_in_r;
    energi_total = (trapz(power))/3600

    V = 364.8; %Tegangan Baterai
    time = 0:1:(length(power)-1);
    timeeee = 0:1:(length(power)*2-1);


    energi_dari_baterai = 0;
    energi_dari_ultracapacitor = 0;

    energi_dari_baterai_detik =
zeros(size(mc_pwr_in_r));
    energi_dari_ultracapacitor_detik =
zeros(size(mc_pwr_in_r));
```

```
            arus_baterai_hibrid =
zeros(size(mc_pwr_in_r));
            arus_ultracapacitor_hibrid =
zeros(size(mc_pwr_in_r));
            arus_Bat_only = mc_pwr_in_r/V;
        %EMS RULE BASED PROPOSED
        PL = 10000; %POWER LIMIT
            for i = 1:length(mc_pwr_in_r)
                daya_detik = mc_pwr_in_r(i,:);

              if daya_detik >= 0
%Torsi Beban > 0
                  if acc > 0
%Percepatan > 0
                      energi_dari_ultracapacitor =
daya_detik;
                  else
%Percepatan = 0

                          if daya_detik > PL
%Melebihi Power Limit 10kW
                              energi_dari_baterai = PL;
                              energi_dari_ultracapacitor
= (daya_detik - PL);
                          else
%Belum Melebihi Power Limit 10kW
                              energi_dari_baterai =
daya_detik;
                          end
                  end
              else
%Regenerative Braking or Torque Load < 0
                  energi_dari_baterai = 0;
                  energi_dari_ultracapacitor =
daya_detik;

              end
```

```
                    energi_dari_baterai_detik(i,:) =
energi_dari_baterai;

energi_dari_ultracapacitor_detik(i,:) =
energi_dari_ultracapacitor;
                    arus_baterai_hibrid(i,:) =
energi_dari_baterai_detik(i,:)/V;
                    arus_ultracapacitor_hibrid(i,:) =
energi_dari_ultracapacitor_detik(i,:)/V;



            end


            detik = size(arus_Bat_only);
            x = 4; %Berapa kali cycle
            detik_charging = 8640;
            detik_end = 8640+detik*x;  %Lama siklus
satu hari

        %Profil arus satu hari Battery_Only
            for i = 1:x %Pengulangan siklus berkendara
                if i == 1
                Diss_Current_Bat_Only(1,1:detik)=
arus_Bat_only;
                else
                Diss_Current_Bat_Only(1,(((i-
1)*detik)+1):i*detik) = arus_Bat_only;
                end
            end
            for i = 1:x+1         %Charging, Berapa
kali cycle + 1
                if i <= x       %Tulis angka berapa
kali cycle mengikuti angka diatas
                Current_1_day_Batt_only(1,1:x*detik)=
Diss_Current_Bat_Only;
```

```
                else
                Current_1_day_Batt_only(1,(((i-
1)*detik)+1):detik_end) = -5.79; %Charging current
5.79 A
                end
            end
        %Profil arus Battery Hybrid satu hari
            for i = 1:x
                if i == 1
                Diss_Current_Hybrid(1,1:detik)=
arus_baterai_hibrid;
                else
                Diss_Current_Hybrid(1,(((i-
1)*detik)+1):i*detik) = arus_baterai_hibrid;
                end
            end
            for i = 1:x+1
                if i <= x

Current_1_day_Batt_Hybrid(1,1:x*detik)=
Diss_Current_Hybrid;
                else
                Current_1_day_Batt_Hybrid(1,(((i-
1)*detik)+1):detik_end) = -5.79;
                end
            end
            timeee =
0:1:(length(Diss_Current_Bat_Only)-1);
            timee =
0:1:(length(Current_1_day_Batt_only)-1);
            energi_baterai_hibrid =
(trapz(energi_dari_baterai_detik))/3600
            energi_supercapacitor_hibrid =
(trapz(energi_dari_ultracapacitor_detik))/3600


             subplot (1,1,1)
             hold on
```

```
            plot(time,power, 'b');
            plot(time,energi_dari_baterai_detik,
'black');
            title('Daya Baterai Hybrid (Hitam) Daya
Supercapacitor (Biru)')
```

2. **Kode *M File* "ESS_LI7_temp".**

```
% ADVISOR data file:  ESS_LI7_temp.m
% Modified : SABRILMA 07111740000128
% Data source: Panasonic NCR18650B Datasheet
%               Tesla Battery module 74p6s 5.3 kWh
spec
%                 Tesla Battery pack 85 kWh 16
modules 74p6s spec
% Data confirmation:
%
% Notes:
% File created by modified batmodel ESS_li7_temp for
undergrad thesis "Rule Based
% Control Design Energy Management System for Hybrid
Battery and Supercapacitor
% Toward Electric Vehicle Application" by : Sabri
Ilma K
%
% Created on: 04-NOV-2021 09:58:00
% By: Sabri Ilma K, sabrilma.khaidir@gmail.com
%
% Revision history at end of file.
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% FILE ID INFO
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
ess_description='5.3 kWh 74p6s Tesla module battery';
ess_version=2003; % version of ADVISOR for which the
file was generated
```

```
ess_proprietary=1; % 0=> non-proprietary, 1=>
proprietary, do not distribute
ess_validation=0; % 0=> no validation, 1=> data
agrees with source data,
% 2=> data matches source data and data collection
methods have been verified
disp(['Data loaded: ESS_LI7_temp.m -
',ess_description])


%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% SOC RANGE over which data is defined
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
ess_soc=[0 10 20 40 60 80 100]/100;  % (--)

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Temperature range over which data is defined
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
ess_tmp=[0 25 40];  % (C)

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% LOSS AND EFFICIENCY parameters
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Parameters vary by SOC horizontally, and
temperature vertically
% Capacity cell : 3200 mAh or 3.2 Ah
% max. capacity at C/3 rate = 3.4 Ah
% 74p6s
% Cell on Paralel : 74 cell
% Group on Series : 6 Series
% Capacity Module : 74*3.2 = 236.8 Ah
ess_max_ah_cap=[2.950 3.290 3.320]*74; %Ah

      % (A*h), max. capacity at C/1 rate, indexed by
ess_tmp
% average coulombic (a.k.a. amp-hour) efficiency
below, indexed by ess_tmp
ess_coulombic_eff=[0.968 0.99 0.992];  % (--)
```

```
% module's resistance to being discharged, indexed by
ess_soc and ess_tmp
ess_r_dis=[0.0419 0.0288 0.0221 0.014 0.0145 0.0145
0.0162;
0.072 0.01515 0.00839 0.00493 0.00505 0.005524
0.005722;
0.0535 0.0133 0.0082 0.0059 0.0059 0.006 0.0063]*6; %
(ohm)
% module's resistance to being charged, indexed by
ess_soc and ess_tmp
ess_r_chg=[0.021 0.018 0.0177 0.0157 0.0138 0.0138
0.015;
0.0124 0.0068 0.005426 0.00442 0.00463 0.00583
0.00583;
0.0104 0.0079 0.0072 0.0064 0.0059 0.0058 0.006]*6; %
(ohm)
% module's open-circuit (a.k.a. no-load) voltage,
indexed by ess_soc and ess_tmp
ess_voc=[3.44 3.473 3.496 3.568 3.637 3.757 5.796;
3.124 3.349 3.433 3.518 3.616 3.752 5.798;
3.128 3.36 3.44 3.528 3.623 3.761 5.799]*6; % (V)

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% LIMITS
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
ess_min_volts=3*6;
ess_max_volts=4.2*6;

ess_module_num=16;  %a default value for number of
modules

% battery thermal model unmodified
ess_th_calc=1;                                % --
0=no ess thermal calculations, 1=do calc's
ess_mod_cp=795;                               % J/kgK
ave heat capacity of module
ess_set_tmp=35;                               % C
thermostat temp of module when cooling fan comes on
```

```
ess_mod_sarea=.032;                          % m^2
total module surface area exposed to cooling air
ess_mod_airflow=.07/12;                    % kg/s
cooling air mass flow rate across module (140
cfm=0.07 kg/s at 20 C)
ess_mod_flow_area=.0011;                    % m^2
cross-sec flow area for cooling air per module
ess_mod_case_thk=.001;                    % m
thickness of module case
ess_mod_case_th_cond=15;                  % W/mK
thermal conductivity of module case material
ess_air_vel=ess_mod_airflow/(1.16*ess_mod_flow_area);
% m/s  ave velocity of cooling air
ess_air_htcoef=30*(ess_air_vel/5)^0.8;      % W/m^2K
cooling air heat transfer coef.
ess_th_res_on=((1/ess_air_htcoef)+(ess_mod_case_thk/e
ss_mod_case_th_cond))/ess_mod_sarea; % K/W  tot
thermal res key on
ess_th_res_off=((1/4)+(ess_mod_case_thk/ess_mod_case_
th_cond))/ess_mod_sarea; % K/W  tot thermal res key
off (cold soak)
% set bounds on flow rate and thermal resistance
ess_mod_airflow=max(ess_mod_airflow,0.001);
ess_th_res_on=min(ess_th_res_on,ess_th_res_off);
clear ess_mod_sarea ess_mod_flow_area
ess_mod_case_thk ess_mod_case_th_cond ess_air_vel
ess_air_htcoef

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% OTHER DATA
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% NCR18650B weight : 0.0485 kg
% Total cell in 1 module : 74*6 = 444 cell
ess_module_mass=.0485*74*6;  % (kg), mass of single
module

ess_cap_scale=1; % scale factor for module max ah
capacity
```

```
% user definable mass scaling relationship
ess_mass_scale_fun=inline('(x(1)*ess_module_num+x(2))
*(x(3)*ess_cap_scale+x(4))*(ess_module_mass)','x','es
s_module_num','ess_cap_scale','ess_module_mass');
ess_mass_scale_coef=[1 0 1 0]; % coefficients in
ess_mass_scale_fun

% user definable resistance scaling relationship
ess_res_scale_fun=inline('(x(1)*ess_module_num+x(2))/
(x(3)*ess_cap_scale+x(4))','x','ess_module_num','ess_
cap_scale');
ess_res_scale_coef=[1 0 1 0]; % coefficients in
ess_res_scale_fun
```

3. **Kode *M File*** “MC_AC75”.

```
% ADVISOR Data file:  MC_AC75.m
%
% Data source:
%  Tesla model s 2012 Signature spec
%
% Data confidence level:
%
% Notes:  This is a motor file based on the MC_AC75
motor that has been modified
% to better represent the motor in the Tesla model s
2012 Signature spec
% for Undergrad thesis "Rule Based Control Design
Energy Management System for Hybrid Battery
% and Supercapacitor Toward Electric Vehicle
Application".

% Created on:  6/NOV/2021
% By:  SABRI ILMA KHAIDIR
%
% Revision history at end of file.
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% FILE ID INFO
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
mc_description='Liquid-cooled, 3-phase, 4-pole, AC
induction';
mc_version=2003; % version of ADVISOR for which the
file was generated
mc_proprietary=0; % 0=> non-proprietary, 1=>
proprietary, do not distribute
mc_validation=0; % 0=> no validation, 1=> data agrees
with source data,
% 2=> data matches source data and data collection
methods have been verified
disp(['Data loaded: MC_AC75 - ',mc_description]);


%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% SPEED & TORQUE RANGES over which data is defined
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% (rad/s), speed range of the motor
mc_map_spd=[0 1540 3080 4620 6160 7700 9240 10780
12320 13860 15400]*(2*pi/60);
% Note: the above conversion from RPM to rad/s was
fixed 6/16/98

% (N*m), torque range of the motor
% 1 foot pounds = 4.448/3.281 (N*m)
mc_map_trq=[-325 -292.5 -260 -227.5 -195 -162.5 -130
-97.5 -65 -32.5 ...
      0 32.5 65 97.5 130 162.5 195 227.5 260 292.5
325]*4.448/3.281;


%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% EFFICIENCY AND INPUT POWER MAPS
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
% (--), efficiency map indexed vertically by
mc_map_spd and
% horizontally by mc_map_trq
mc_eff_map=[...
0.7    0.7    0.7    0.7    0.7    0.7    0.7    0.7
       0.7    0.7    0.7    0.7    0.7    0.7    0.7
       0.7    0.7    0.7    0.7    0.7    0.7
0.78   0.78   0.79   0.8    0.81   0.82   0.82   0.82
       0.81   0.77   0.7    0.77   0.81   0.82   0.82
       0.82   0.81   0.8    0.79   0.78   0.78
0.85   0.86   0.86   0.86   0.87   0.88   0.87   0.86
       0.85   0.82   0.7    0.82   0.85   0.86   0.87
       0.88   0.87   0.86   0.86   0.86   0.85
0.86   0.87   0.88   0.89   0.9    0.9    0.9    0.9
       0.89   0.87   0.7    0.87   0.89   0.9    0.9
       0.9    0.9    0.89   0.88   0.87   0.86
0.81   0.82   0.85   0.87   0.88   0.9    0.91   0.91
       0.91   0.88   0.7    0.88   0.91   0.91   0.91
       0.9    0.88   0.87   0.85   0.82   0.81
0.82   0.82   0.82   0.82   0.85   0.87   0.9    0.91
       0.91   0.89   0.7    0.89   0.91   0.91   0.9
       0.87   0.85   0.82   0.82   0.82   0.82
0.79   0.79   0.79   0.78   0.79   0.82   0.86   0.9
       0.91   0.9    0.7    0.9    0.91   0.9    0.86
       0.82   0.79   0.78   0.79   0.79   0.79
0.78   0.78   0.78   0.78   0.78   0.78   0.8    0.88
       0.91   0.91   0.7    0.91   0.91   0.88   0.8
       0.78   0.78   0.78   0.78   0.78   0.78
0.78   0.78   0.78   0.78   0.78   0.78   0.78   0.8
       0.9    0.92   0.7    0.92   0.9    0.8    0.78
       0.78   0.78   0.78   0.78   0.78   0.78
0.78   0.78   0.78   0.78   0.78   0.78   0.78   0.78
       0.88   0.92   0.7    0.92   0.88   0.78   0.78
       0.78   0.78   0.78   0.78   0.78   0.78
0.78   0.78   0.78   0.78   0.78   0.78   0.78   0.78
       0.8    0.92   0.7    0.92   0.8    0.78   0.78
       0.78   0.78   0.78   0.78   0.78   0.78];
```

```
%if ~exist('mc_inpwr_map')
 %  disp('Converting: MC_AC75 motor map efficiency
data --> power loss data')
      %% find indices of well-defined efficiencies
(where speed and torque > 0)
      pos_trqs=find(mc_map_trq>0);
      pos_spds=find(mc_map_spd>0);

      %% compute losses in well-defined efficiency
area
      [T1,w1]=meshgrid(mc_map_trq(pos_trqs),mc_map_s
pd(pos_spds));
      mc_outpwr1_map=T1.*w1;
      mc_losspwr_map=(1./mc_eff_map(pos_spds,pos_trq
s)-1).*mc_outpwr1_map;

      %% to compute losses in entire operating range
      %% ASSUME that losses are symmetric about
zero-torque axis, and
     %% ASSUME that losses at zero torque are the
same as those at the lowest
     %% positive torque, and
     %% ASSUME that losses at zero speed are the same
as those at the lowest
     %% positive speed
      mc_losspwr_map=[fliplr(mc_losspwr_map)
mc_losspwr_map(:,1) mc_losspwr_map];
      mc_losspwr_map=[mc_losspwr_map(1,:);mc_losspwr
_map];

      %% compute input power (power req'd at
electrical side of motor/inverter set)
      [T,w]=meshgrid(mc_map_trq,mc_map_spd);
      mc_outpwr_map=T.*w;
      mc_inpwr_map=mc_outpwr_map+mc_losspwr_map;
%end
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% LIMITS
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% max torque curve of the motor indexed by mc_map_spd
mc_max_trq=[200 200 200 175.2 131.4 105.1 87.6 75.1
65.7 58.4 52.5]*...
      4.448/3.281; % (N*m)

mc_max_gen_trq=-1*[200 200 200 175.2 131.4 105.1 87.6
75.1 65.7 58.4 52.5]*...
      4.448/3.281; % (N*m), estimate

% maximum overtorque capability (not continuous,
because the motor would overheat)
mc_overtrq_factor=1.8; % (--), estimated

mc_max_crrnt=480; % (A), maximum current allowed by
the controller and motor
mc_min_volts=120; % (V), minimum voltage allowed by
the controller and motor


%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% DEFAULT SCALING
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% (--), used to scale mc_map_spd to simulate a faster
or slower running motor
mc_spd_scale=1.0;

% (--), used to scale mc_map_trq to simulate a higher
or lower torque motor
mc_trq_scale=1.0;


%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% OTHER DATA
%%%%%%%%% %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
mc_inertia=0;  % (kg*m^2), rotor inertia; unknown
```

```
mc_mass=84.2/2.3478;  % (kg), mass of motor and
controller



% user definable mass scaling function
mc_mass_scale_fun=inline('(x(1)*mc_trq_scale+x(2))*(x
(3)*mc_spd_scale+x(4))*mc_mass','x','mc_spd_scale','m
c_trq_scale','mc_mass');
mc_mass_scale_coef=[1 0 1 0]; % mass scaling function
coefficients


% motor/controller thermal model
mc_th_calc=1;                               % --
0=no mc thermal calculations, 1=do calc's
mc_cp=430;                                  % J/kgK
ave heat capacity of motor/controller (estimate: ave
of SS & Cu)
mc_tstat=45;                                % C
thermostat temp of motor/controler when cooling pump
comes on
mc_area_scale=(mc_mass/91)^0.7;             % --     if
motor dimensions are unknown, assume rectang shape
and scale vs AC75
mc_sarea=0.4*mc_area_scale;                 % m^2
total module surface area exposed to cooling fluid
(typ rectang module)

%the following variable is not used directly in
modelling and should always be equal to one
%it's used for initialization purposes
mc_eff_scale=1;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% CLEAN UP
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
clear T w mc_outpwr1_map mc_outpwr_map mc_losspwr_map
T1 w1 pos_spds pos_trqs


%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% REVISION HISTORY
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% 6/12/98 (KW): converted data from A1.2.1 into A2
(as MC_WESTINGHOUSE), have not yet verified
% 6/15/98 (KW): combined with MRC's MC_AC75.m and
replaced both with new one
% 6/16/98 (KW): speed vector multiplier from RPM to
rad/s was correctly inverted
% 6/23/98 (MC): disabled existence check preceding
computation of input power map
% 6/30/98 (MC): cosmetic changes
% 2/3/99  (SB): added thermal model variables
% 3/15/99:ss updated *_version to 2.1 from 2.0
% 11/03/99:ss updated version from 2.2 to 2.21
% 11/1/00:tm added max gen trq placeholder data
% 7/30/01:tm added mass scaling function
mass=f(mc_spd_scale, mc_trq_scale, mc_mass)
%
% 30-Jul-2001: automatically updated to version 3.2
```

4. **Kode *M File*** “TX_1SPD”.

```
% ADVISOR data file:  TX_1SPD.m
%
% Data source:
%
% Data confirmation:
%
% Notes:
% This file defines a 1-speed gearbox by defining a
gear ratio and gear number,
% and calling TX_VW to define loss characteristics.
%
```

```
% Created on: 24-Jun-1998
% By:  MRC, NREL, matthew_cuddy@nrel.gov
%
% Revision history at end of file.
%%%
```

```
%TX_VW % FILE ID, LOSSES

gb_mass=0; % (kg), mass of the gearbox

%the following variable is not used directly in
modelling and should always be equal to one
%it's used for initialization purposes
gb_eff_scale=1;

%final drive portion
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% LOSSES AND EFFICIENCIES
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
fd_loss=0;    % (Nm), constant torque loss in final
drive, measured at input

% below, the loss map for this 1 speed transmission
is calculated
gb_vars.gb_loss_input_spd_coeff=0.614307976;  % loss
coefficiencts from old eff equation (TX_VW)
gb_vars.gb_loss_output_spd_coeff=5.530953616; % ""
gb_vars.gb_loss_input_trq_coeff=-0.861652506; % ""
gb_vars.gb_loss_output_trq_coeff=0.229546756; % ""
gb_vars.gb_loss_output_pwr_coeff=0.023981187; % ""
gb_vars.gb_loss_const=-92.07523029;           % ""
w.vals = [0:1:20,25:5:400]; % transmission output
speeds to evaluate efficiency at
T.vals = [-1000:400:-200,-150,-100:10:-40,-36:2:-
2,2:2:36,40:10:100,150,200:400:1000]; % transmission
output torque to evaluate efficiency at
% Note: although a 1-spd gearbox is required to have
gb_ratio of length two (where both elements are the
same),
% ...there is no need to make two efficiency maps.
Therefore, only one gb_ratio is fed into the below
function.
```

```
[tx_eff_map, tx_map_spd, tx_map_trq] =
tx_eff_mapper(gb_vars,w,T,gb_ratio(1)); % create
efficiency map and T, w index

clear w T gb_vars;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% OTHER DATA
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
fd_ratio=1;   % (--), =(final drive input
speed)/(f.d. output speed)
fd_inertia=0; % (kg*m^2), rotational inertia of final
drive, measured at input
fd_mass=110/2.205; % (kg), mass of the final drive -
1990 Taurus, OTA report

tx_mass=gb_mass+fd_mass;% (kg), mass of the gearbox +
final drive=(transmission)
gb_inertia=0;% (kg*m^2), gearbox rotational inertia
measured at input; unknown

% trq and speed scaling parameters
gb_spd_scale=1;
gb_trq_scale=1;

% user definable mass scaling relationship
tx_mass_scale_fun=inline('(x(1)*gb_trq_scale+x(2))*(x
(3)*gb_spd_scale+x(4))*(fd_mass+gb_mass)','x','gb_spd
_scale','gb_trq_scale','fd_mass','gb_mass');
tx_mass_scale_coef=[1 0 1 0]; % coefficients for mass
scaling relationship


%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% REVISION HISTORY
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% 08/28/98:tm gb_mass added
%9/30/98:ss added fd variables and added tx_mass
%10/16/98:ss renamed to TX_1SPD was GB_1SPD
```

```
%12/22/98:ss added variable tx_type to determine what
block diagram to run.
% 11/03/99:ss updated version from 2.2 to 2.21
% 9-July-2001:mpo updated to use lookup table method
for transmission gearbox efficiency and
% ................made file self-sufficient (i.e., no
longer calls tx_vw)
% 7/30/01:tm added transmission mass scaling function
mass=f(gb_spd_scale,gb_trq_scale,fd_mass,gb_mass)
```

5. **Kode *M File*** "WH_SMCAR".

```
% ADVISOR data file:  WH_SMCAR.m
%
% Data source:
%
% Data confirmation:
%
% Notes:
% Defines tire, wheel, and axle assembly parameters
for use with ADVISOR 2, for
% a hypothetical small car.
%
% Created on: 23-Jun-1998
% By:  MRC, NREL, matthew_cuddy@nrel.gov
%
% Revision history at end of file.
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%


%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% FILE ID INFO
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
wh_description='Wheel/axle assembly for small car';
wh_version=2003; % version of ADVISOR for which the
file was generated
```

```
wh_proprietary=0; % 0=> non-proprietary, 1=>
proprietary, do not distribute
wh_validation=0; % 0=> no validation, 1=> data agrees
with source data,
% 2=> data matches source data and data collection
methods have been verified
disp(['Data loaded: WH_SMCAR - ',wh_description])


%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% FORCE AND MASS RANGES over which data is defined
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% vehicle test mass vector used in tandem with
"wh_axle_loss_trq" to estimate
% wheel and axle bearing and brake drag
wh_axle_loss_mass=[0 2000];   % (kg)
% (tractive force on the front tires)/(weight on
front axle), used in tandem
% with "wh_slip" to estimate tire slip at any time
wh_slip_force_coeff=[0 0.3913 0.6715 0.8540 0.9616
1.0212];  % (--)

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% LOSS parameters
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% drag torque applied at the front (drive) axle, used
with "wh_axle_loss_mass"
wh_axle_loss_trq=[4 24]*.4;   % (Nm)
% slip=(omega * r)/v -1; used with
"wh_slip_force_coeff"
wh_slip=[0.0 0.025 0.050 0.075 0.10 0.125];  % (--)


%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% OTHER DATA
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
wh_radius=0.282;    % (m), rolling radius of
185/70R14 tire from a
```

```
                    % ~1990 Mazda 626
% rotational inertia of all wheels, tires, and axles
% below uses OTA's '94 estimate of Taurus wheel, tire
& tool mass as mass of
% solid cylinders of radius wh_radius, rotating at
wheel speed in this vehicle
wh_inertia=181/2.205*wh_radius^2/2;  % (kg*m^2)
% fraction of braking done by driveline, indexed by
wh_fa_dl_brake_mph
wh_fa_dl_brake_frac=[0 0 0.5 0.8 0.8];  % (--)
% (--), fraction of braking done by front friction
brakes,
% indexed by wh_fa_fric_brake_mph
wh_fa_fric_brake_frac=[0.8 0.8 0.4 0.1 0.1];  % (--)
wh_fa_dl_brake_mph=[-1 0 10 60 1000];   % (mph)
wh_fa_fric_brake_mph=wh_fa_dl_brake_mph; % (mph)

wh_1st_rrc=0.009; % (--), rolling resistance
coefficient
wh_2nd_rrc=0; % (s/m)

wh_mass=0;

% front or rear or both axles driving?
wh_front_active_bool=1; % 0==> inactive; 1==> active
wh_rear_active_bool=0; % 0==> inactive; 1==> active

% braking force limits
wh_max_front_brake_force=-inf;% (N)
wh_max_rear_brake_force=-inf;% (N)

%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Error checking
%%%%%%%%%%%%%%%%%
% dl+fa_fric must add up to <= 1 for all speeds.
Give user warning if in error
temp_total_braking=wh_fa_dl_brake_frac+wh_fa_fric_bra
ke_frac;
```

```
if any(temp_total_braking>1)
    disp('Warning: Driveline and Front Friction
Braking need to add to less than or equal to 1 for')
    disp('         all speeds.  Please edit either
wh_fa_dl_brake_frac or wh_fa_fric_brake_frac');
    disp('         in WH_*.m.  See Chapter 3.2.4,
Braking of the documentation for more info.');
end
clear temp_total_braking

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% REVISION HISTORY
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%9/17/98-ss added wh_mass=0;
%01/21/99:mc updated wh_slip and wh_slip_force_coeff
per DB's suggestion
% 3/15/99:ss updated *_version to 2.1 from 2.0
% 11/03/99:ss updated version from 2.2 to 2.21
%01/10/01: vhj added error checking (warning to user
about incorrect braking numbers)
% 4/4/02: mpo added rolling resistance coefficient
data to this file (from vehicle wh_1st_rrc
wh_2nd_rrc)
```

6. **Kode *M File*** “ACC_HYBRID.

```
% ADVISOR data file:  WH_SMCAR.m
%
% Data source:
%
% Data confirmation:
%
% Notes:
% Defines tire, wheel, and axle assembly parameters
for use with ADVISOR 2, for
% a hypothetical small car.
%
% Created on: 23-Jun-1998
```

```
% By:  MRC, NREL, matthew_cuddy@nrel.gov
%
% Revision history at end of file.
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%


%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% FILE ID INFO
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
wh_description='Wheel/axle assembly for small car';
wh_version=2003; % version of ADVISOR for which the
file was generated
wh_proprietary=0; % 0=> non-proprietary, 1=>
proprietary, do not distribute
wh_validation=0; % 0=> no validation, 1=> data agrees
with source data,
% 2=> data matches source data and data collection
methods have been verified
disp(['Data loaded: WH_SMCAR - ',wh_description])


%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% FORCE AND MASS RANGES over which data is defined
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% vehicle test mass vector used in tandem with
"wh_axle_loss_trq" to estimate
% wheel and axle bearing and brake drag
wh_axle_loss_mass=[0 2000];   % (kg)
% (tractive force on the front tires)/(weight on
front axle), used in tandem
% with "wh_slip" to estimate tire slip at any time
wh_slip_force_coeff=[0 0.3913 0.6715 0.8540 0.9616
1.0212];  % (--)

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% LOSS parameters
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
% drag torque applied at the front (drive) axle, used
with "wh_axle_loss_mass"
wh_axle_loss_trq=[4 24]*.4;   % (Nm)
% slip=(omega * r)/v -1; used with
"wh_slip_force_coeff"
wh_slip=[0.0 0.025 0.050 0.075 0.10 0.125];  % (--)


%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% OTHER DATA
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
wh_radius=0.282;    % (m), rolling radius of
185/70R14 tire from a
                    % ~1990 Mazda 626
% rotational inertia of all wheels, tires, and axles
% below uses OTA's '94 estimate of Taurus wheel, tire
& tool mass as mass of
% solid cylinders of radius wh_radius, rotating at
wheel speed in this vehicle
wh_inertia=181/2.205*wh_radius^2/2;  % (kg*m^2)
% fraction of braking done by driveline, indexed by
wh_fa_dl_brake_mph
wh_fa_dl_brake_frac=[0 0 0.5 0.8 0.8];  % (--)
% (--), fraction of braking done by front friction
brakes,
% indexed by wh_fa_fric_brake_mph
wh_fa_fric_brake_frac=[0.8 0.8 0.4 0.1 0.1];  % (--)
wh_fa_dl_brake_mph=[-1 0 10 60 1000];   % (mph)
wh_fa_fric_brake_mph=wh_fa_dl_brake_mph; % (mph)

wh_1st_rrc=0.009; % (--), rolling resistance
coefficient
wh_2nd_rrc=0; % (s/m)

wh_mass=0;

% front or rear or both axles driving?
wh_front_active_bool=1; % 0==> inactive; 1==> active
```

```
wh_rear_active_bool=0; % 0==> inactive; 1==> active

% braking force limits
wh_max_front_brake_force=-inf;% (N)
wh_max_rear_brake_force=-inf;% (N)

%%%%%%%%%%%%%%%%
% Error checking
%%%%%%%%%%%%%%%%
% dl+fa_fric must add up to <= 1 for all speeds.
Give user warning if in error
temp_total_braking=wh_fa_dl_brake_frac+wh_fa_fric_bra
ke_frac;
if any(temp_total_braking>1)
    disp('Warning: Driveline and Front Friction
Braking need to add to less than or equal to 1 for')
    disp('         all speeds.  Please edit either
wh_fa_dl_brake_frac or wh_fa_fric_brake_frac');
    disp('         in WH_*.m.  See Chapter 3.2.4,
Braking of the documentation for more info.');
end
clear temp_total_braking

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% REVISION HISTORY
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%9/17/98-ss added wh_mass=0;
%01/21/99:mc updated wh_slip and wh_slip_force_coeff
per DB's suggestion
% 3/15/99:ss updated *_version to 2.1 from 2.0
% 11/03/99:ss updated version from 2.2 to 2.21
%01/10/01: vhj added error checking (warning to user
about incorrect braking numbers)
% 4/4/02: mpo added rolling resistance coefficient
data to this file (from vehicle wh_1st_rrc
wh_2nd_rrc)
```

7. **Kode *M File*** “PTC_EV”.

```
% ADVISOR data file:  PTC_EV.m
%
% Data source:
%
% Data confirmation:
%
% Notes:
% Defines all powertrain control parameters,
including gearbox, clutch for a
% electric vehicle in ADVISOR 2.
%
% Created on: 28-Aug-1998
% By:  VH, NREL, valerie_hovland@nrel.gov
%
% Revision history at end of file.
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% FILE ID INFO
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
ptc_description='Powertrain control for electric
vehicle ';
ptc_version=2003; % version of ADVISOR for which the
file was generated
ptc_proprietary=0; % 0=> non-proprietary, 1=>
proprietary, do not distribute
ptc_validation=0; % 1=> no validation, 1=> data
agrees with source data,
% 2=> data matches source data and data collection
methods have been verified
disp(['Data loaded: PTC_EV - ',ptc_description])


%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% CLUTCH & ENGINE CONTROL
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
vc_idle_spd=0;  % (rad/s), engine's idle speed


%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% GEARBOX CONTROL
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% fractional engine load {=(torque)/(max torque at
speed)} above which a
% downshift is called for, indexed by
gb_gearN_dnshift_spd
gb_gear1_dnshift_load=[2 2];  % (--)
gb_gear2_dnshift_load=[2 2];  % (--)
% fractional engine load {=(torque)/(max torque at
speed)} below which an
% upshift is called for, indexed by
gb_gearN_upshift_spd
gb_gear1_upshift_load=[-1 -1];  % (--)
gb_gear2_upshift_load=[-1 -1];  % (--)
gb_gear1_dnshift_spd=[0 1000];  % (rad/s)
gb_gear2_dnshift_spd=[0 1000];  % (rad/s)
gb_gear1_upshift_spd=[0 1000];  % (rad/s)
gb_gear2_upshift_spd=[0 1000];  % (rad/s)

% convert old shift commands to new shift commands
gb_upshift_spd={gb_gear1_upshift_spd; ...
      gb_gear2_upshift_spd};  % (rad/s)
gb_upshift_load={gb_gear1_upshift_load; ...
      gb_gear2_upshift_load};  % (--)
gb_dnshift_spd={gb_gear1_dnshift_spd; ...
      gb_gear2_dnshift_spd};  % (rad/s)
gb_dnshift_load={gb_gear1_dnshift_load; ...
      gb_gear2_dnshift_load};  % (--)

clear gb_gear*shift* % remove unnecessary data

% fixes the difference between number of shift
vectors and gears in gearbox
```

```
if length(gb_upshift_spd)<length(gb_ratio)
   start_pt=length(gb_upshift_spd);
   for x=1:length(gb_ratio)-length(gb_upshift_spd)
      gb_upshift_spd{x+start_pt}=gb_upshift_spd{1};
      gb_upshift_load{x+start_pt}=gb_upshift_load{1};
      gb_dnshift_spd{x+start_pt}=gb_dnshift_spd{1};
      gb_dnshift_load{x+start_pt}=gb_dnshift_load{1};
   end
end

% duration of shift during which no torque can be
transmitted
gb_shift_delay=0;  % (s), no delay since no shifts;
this is a 1-spd


%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% CONTROL STRATEGY
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%ess_init_soc=1;  % (--), initial SOC for EV is 100%;
this is inputed from the simulation screen now
cs_hi_soc=1;  % (--), highest desired battery state
of charge
cs_lo_soc=0;  % (--), lowest desired battery state of
charge
cs_tstat_init_state=0;  % (--), initial FC state; 1=>
on, 0=> off

%%%%%%%%%%%%%%% START OF SPEED DEPENDENT SHIFTING
INFORMATION %%%%%%%%%%%%%

% Data specific for SPEED DEPENDENT SHIFTING in the
(PRE_TX) GEARBOX CONTROL
% BLOCK in VEHICLE CONTROLS <vc>
% --implemented for all powertrains except CVT
versions and Toyota Prius (JPN)
%
```

```
tx_speed_dep=0;     % Value for the switch in the
gearbox control
%                   If tx_speed_dep=1, the speed
dependent gearbox is chosen
%                   If tx_speed_dep=0, the engine
load dependent gearbox is chosen
%
% Vehicle speed (m/s) where the gearbox has to shift
%tx_1_2_spd=24/3.6; % converting from km/hr to m/s

%tx_2_3_spd=40/3.6;
%tx_3_4_spd=64/3.6;
%tx_4_5_spd=75/3.6;
%tx_5_4_spd=75/3.6;
%tx_4_3_spd=64/3.6;
%tx_3_2_spd=40/3.6;
%tx_2_1_spd=tx_1_2_spd;

% first column is speed in m/s, second column is gear
number
% note: lookup data should be specified as a step
function
% ..... this can be done by repeating values of x
(first column, speed)
% ..... for differing values of y (second column, )
% note: division by 3.6 to change from km/hr to m/s

% speeds to use for upshift transition (shifting
while accelerating)
tx_spd_dep_upshift = [
   0/3.6, 1
   24/3.6, 1
   24/3.6, 2
   40/3.6, 2
   40/3.6, 3
   64/3.6, 3
   64/3.6, 4
   75/3.6, 4
```

```
   75/3.6, 5
   1000/3.6, 5];

% speeds to use for downshift transition (shifting
while decelerating)
tx_spd_dep_dnshift = [
   0/3.6, 1
   24/3.6, 1
   24/3.6, 2
   40/3.6, 2
   40/3.6, 3
   64/3.6, 3
   64/3.6, 4
   75/3.6, 4
   75/3.6, 5
   1000/3.6, 5];
%%%%%%%%%%%%%% END OF SPEED DEPENDENT SHIFTING
%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% REVISION HISTORY
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% 08/28/98:vh new file
% 3/15/99:ss updated *_version to 2.1 from 2.0
% 11/03/99:ss updated version from 2.2 to 2.21
% 7/31/01:mpo added variables for speed dependent
shifting
```

TESLA

2012 TESLA MODEL S

SPECIFICATIONS AND FEATURES

PLEASE NOTE: Items in gray specify variants not yet in production.
Vehicles equipped with the 60 kWh Battery will begin production in Fall 2012, and vehicles equipped with the 40 kWh Battery will begin production in Winter 2012.

EXTERIOR DIMENSIONS		MODEL S	MODEL S PERFORMANCE	MODEL S SIGNATURE	MODEL S SIGNATURE PERFORMANCE
Length		4978 mm (196 in)			
Height		1435 mm (56.5 in)			
Width (with mirrors folded / with mirrors)		1964 mm (77.3 in) / 2189 mm (86.2 in)			
Unladen ground clearance		152.4 mm (6 in)			
Curb weight	40 kWh	Winter 2012	N/A	N/A	N/A
	60 kWh	Fall 2012	N/A	N/A	N/A
	85 kWh	Coming Soon	Coming Soon	2108 kg (4647.3 lbs)	2106 kg (4642.9 lbs)
Weight distribution (%, front/rear)	40 kWh	Winter 2012	N/A	N/A	N/A
	60 kWh	Fall 2012	N/A	N/A	N/A
	85 kWh	48/52	48/52	48/52	48/52

INTERIOR DIMENSIONS	MODEL S	MODEL S PERFORMANCE	MODEL S SIGNATURE	MODEL S SIGNATURE PERFORMANCE
Effective Headroom (front / rear)	986 mm (38.8 in) / 897.2 mm (35.3 in)			
Effective Legroom (front / rear)	1083.7 mm (42.7 in) / 899.9 mm (35.4 in)			
Shoulder room (front / rear)	1465 mm (57.7 in) / 1396.8 mm (55.0 in)			
Hiproom (front / rear)	1397.4 mm (55.0 in) / 1390.4 (54.7 in)			
Total cargo volume	894.8 L (31.6 cu ft)			
Rear cargo volume (seats up / down)	744.7 L (26.3 cu ft) / 1645.2 L (58.1 cu.ft)			
Front cargo volume - Frunk	150.1 L (5.3 cu ft)			
Total Interior Volume	2692.9 L (95.1 cu ft)			
Seating capacity*	5			
EPA Classification	Large			

*Optional rear-facing child seat available (seats up to two children)

POWERTRAIN		MODEL S	MODEL S PERFORMANCE	MODEL S SIGNATURE	MODEL S SIGNATURE PERFORMANCE
Battery type		Liquid-cooled, lithium-ion			
Motor type		Liquid-cooled, 3-phase, 4-pole, AC induction			
Drive inverter		Variable frequency drive with regenerative braking			
High-performance drive inverter		-			-
Energy (storage)		40 kWh, 60 kWh or 85 kWh	85 kWh	85 kWh	85 kWh
Peak motor power	40 kWh	Winter 2012	N/A	N/A	N/A
	60 kWh	Fall 2012	N/A	N/A	N/A
	85 kWh	362 hp (270 kW) @ 6,000-9,500 rpm	416 hp (310 kW) @ 5,000-8,600 rpm	362 hp (270 kW) @ 6,000-9,500 rpm	416 hp (310 kW) @ 5,000-8,600 rpm
Peak motor torque	40 kWh	Winter 2012	N/A	N/A	N/A
	60 kWh	Fall 2012	N/A	N/A	N/A
	85 kWh	325 lb-ft (440 Nm) @ 0-5,800 rpm	443 lb-ft (600 Nm) @ 0-5,100 rpm	325 lb-ft (440 Nm) @ 0-5,800 rpm	443 lb-ft (600 Nm) @ 0-5,100 rpm
Maximum/Redline rpm	40 kWh	Winter 2012	N/A	N/A	N/A
	60 kWh	Fall 2012	N/A	N/A	N/A
	85 kWh	15,400 rpm	16,000 rpm	15,400 rpm	16,000 rpm
Top speed / 0 to 60 mph	40 kWh	110 mph / 6.5 seconds	N/A	N/A	N/A
	60 kWh	120 mph / 5.9 seconds	N/A	N/A	N/A
	85 kWh	125 mph / 5.6 seconds	130 mph / 4.4 seconds	125 mph / 5.6 seconds	130 mph / 4.4 seconds
Quarter mile	40 kWh	Winter 2012	N/A	N/A	N/A
	60 kWh	Fall 2012	N/A	N/A	N/A
	85 kWh	13.7 seconds	12.6 seconds	13.7 seconds	12.6 seconds
Maximum phase current	40 kWh	Winter 2012	N/A	TBA	N/A
	60 kWh	Fall 2012	N/A	TBA	N/A
	85 kWh	900 A	1200 A	900 A	1200 A

TESLA

POWERTRAIN cont'd		MODEL S	MODEL S PERFORMANCE	MODEL S SIGNATURE	MODEL S SIGNATURE PERFORMANCE
Supercharging (90 kW DC peak)	40 kWh	N/A	N/A	N/A	N/A
	60 kWh	Optional	N/A	N/A	N/A
	85 kWh	•	•	•	•
Drivetrain		Transverse rear motor, Rear Wheel Drive			
Gearbox type		Single ratio transaxle			
Reduction ratio		9.73 : 1			
Battery warranty	40 kWh	8 years / 100,000 miles	N/A	N/A	N/A
	60 kWh	8 years / 125,000 miles	N/A	N/A	N/A
	85 kWh	8 years / unlimited miles	8 years / unlimited miles	8 years / unlimited miles	8 years / unlimited miles

AC CHARGING (Household Current)	MODEL S	MODEL S PERFORMANCE	MODEL S SIGNATURE	MODEL S SIGNATURE PERFORMANCE
Charger type	Isolated, unity power factor			
Input compatibility*	85-265 V, 45-65 Hz, 1-80 A			
Mobile Connector	120 V and 240 V outlet adapters included, up to 240 V, 40 A			
High Power Wall Connector (Optional)	240 V hard-wired, up to 80 A			
J1772 Adapter	Public charging station adapter, up to 80 A (most public stations are 24 A)			
Peak charger efficiency	92%			
Single Charger - 10 kW on-board charger	•	•		
Twin Chargers - 20 kW on-board charger	Optional	Optional	•	•
Charge rate** (miles of range per hour of charge)***	62			

* When equipped with the Twin Chargers option

**When using Twin Chargers combined with a High Power Wall Connector drawing 80 A

***When driving constant at 55mph, 19" tires, windows up, average ambient temperature

DC CHARGING (Tesla Superchargers)		MODEL S	MODEL S PERFORMANCE	MODEL S SIGNATURE	MODEL S SIGNATURE PERFORMANCE
Charge rate* (Superchargers provide up to 90 kW DC)	40 kWh	N/A	N/A	N/A	N/A
(miles of range per hour of charge)	60 kWh	Fall 2012	N/A	N/A	N/A
	85 kWh	Up to 300	Up to 300	Up to 300	Up to 300
Supercharger Hardware		Standard on 85 kWh and 60 kWh models	•	•	•
Maximum charge recovery in 30 minutes	40 kWh	N/A	N/A	N/A	N/A
	60 kWh	Fall 2012	N/A	N/A	N/A
	85 kWh	50%	50%	50%	50%

*When driving constantly at 55mph, 19" tires, windows up, average ambient temperature

CHASSIS	MODEL S	MODEL S PERFORMANCE	MODEL S SIGNATURE	MODEL S SIGNATURE PERFORMANCE
Track (front / rear)	1662 mm (65.4 in) / 1700 mm (66.9 in)			
Wheelbase	2960 mm (116.5 in)			
19" aluminum alloy wheels with Goodyear Eagle RS-A2-245/45R19 all-season tires	•	Optional	Optional	Optional
21" sonic silver aluminum alloy wheels with Continental Extreme Contact DW-245/35R21 high-performance tires	Optional	Optional	•	Optional
21" performance carbon gray aluminum alloy wheels with Continental Extreme Contact DW-245/35R21 high-performance tires		•		•
Front suspension	Double wishbone, virtual steer axis independent front suspension fitted with coil-over monotube shock absorbers, hollow aluminum steering knuckles, aluminum lower control arms and solid stabilizer bar			
Rear suspension	Multi-link independent all-aluminum rear suspension fitted with coil-over monotube shock absorbers, and solid stabilizer bar mounted to isolated hollow aluminum subframe			
Active Air Suspension	Optional	•	•	•
Steering system	Rack and pinion variable ratio, speed sensitive electronic power steering			
Steering column	Power tilt & telescopic			

TESLA

CHASSIS cont'd	MODEL S	MODEL S PERFORMANCE	MODEL S SIGNATURE	MODEL S SIGNATURE PERFORMANCE
Steering wheel turns, lock-to-lock	2.45			
Steering ratio (Overall ratio)	13:1			
Turning diameter, curb-to-curb	37 ft			
Braking system	Anti-lock disc brakes (ABS) with electronic brake force distribution and secondary caliper electronically actuated parking brake			
Front brakes	Aluminum 4 piston fixed caliper with 355 mm x 32 mm ventilated rotor			
Rear brakes	Aluminum 4 piston fixed caliper with 365 mm x 28 mm ventilated rotor			
Electronic stability control	•	•	•	•
Traction control	•	•	•	•
Sport-tuned traction and stability control		•		•

RANGE*		MODEL S	MODEL S PERFORMANCE	MODEL S SIGNATURE	MODEL S SIGNATURE PERFORMANCE
EPA Range*	40 kWh	Winter 2012	N/A	N/A	N/A
	60 kWh	Fall 2012	N/A	N/A	N/A
	85 kWh	265 miles	265 miles	265 miles	265 miles
MPGe*(city / highway / combined)	40 kWh	Winter 2012	N/A	N/A	N/A
	60 kWh	Fall 2012	N/A	N/A	N/A
	85 kWh	88 / 90 / 89	88 / 90 / 89	88 / 90 / 89	88 / 90 / 89
EPA emissions rating			ZEV		
Estimated Range at 55 mph	40 kWh	160 miles	N/A	N/A	N/A
	60 kWh	230 miles	N/A	N/A	N/A
	85 kWh	300 miles	300 miles	300 miles	300 miles

*Based on 2012 EPA fuel economy methods with 5-cycle test. Actual mileage will vary for many reasons, including driving conditions and how the vehicle is driven and maintained.

Link to Tesla's blog about efficiency & range: http://www.teslamotors.com/blog/model-s-efficiency-and-range

BODY	MODEL S	MODEL S PERFORMANCE	MODEL S SIGNATURE	MODEL S SIGNATURE PERFORMANCE
Lightweight aluminum body reinforced with high-strength, boron steel elements	•	•	•	•
UV and infrared blocking safety glass windshield	•	•	•	•
Rain-sensing, adjustable-speed windshield wipers	•	•	•	•
Frameless, tempered safety glass front windows	•	•	•	•
Solar-absorbing, laminated safety glass rear window with defroster	•	•	•	•
Flush-mounted door handles	•	•	•	•
Manual-folding side mirrors	•	•	•	•
Exterior carbon fiber accents		•		•
Aluminum roof	Black or Body Colored	Black or Body Colored	Black or Body Colored	Black or Body Colored
All Glass Panoramic Roof	Optional	Optional	Optional	Optional
Bi-functional halogen headlights with automatic on/off, LED front turn, park and LED daytime running lights (DRLs)	•	•		
Bi- functional high intensity Xenon headlamps	Optional (Tech Package)	Optional (Tech Package)	•	•
LED front fog lamps, with steering-activated LED cornering lights	Optional (Tech Package)	Optional (Tech Package)	•	•
Feature backlit, turn side-repeator lamps, LED front and rear side-marker lights, fascia- mounted rear reflex reflectors	•	•	•	•
Electrochromatic side mirrors	Optional (Tech Package)	Optional (Tech Package)	•	•
LED rear taillights (stop/turn/ tail) and high-mounted LED stop lamp	•	•	•	•
Liftgate mounted LED tail and LED back up lamps	•	•	•	•

TESLA

INTERIOR	MODEL S	MODEL S PERFORMANCE	MODEL S SIGNATURE	MODEL S SIGNATURE PERFORMANCE
8-way, power adjustable front seats	•			
12-way, power adjustable, heated front seats driver's side memory		•	•	•
Surfaces and seating	Finely appointed interior features hand-wrapped surfaces of cloth and synthetic leather materials.	Nappa leather seats with contrast piping and Alcantara bolsters. Extensive leather throughout.	Perforated Nappa leather seats. Extensive leather throughout.	Nappa leather seats with contrast piping and Alcantara bolsters. Extensive leather throughout.
Piano black décor accents	•	•	•	•
Center armrest with two cup holders	•	•	•	•
Open center console storage area	•	•	•	•
Metal interior door handles	•	•	•	•
60/40 split fold-down rear seatback	•	•	•	•
Parcel shelf	Optional	Optional	•	•
Built-in rear-facing child seats*	Optional	Optional	Optional	Optional

*With 5 point seatbelt harnesses. Seats fold and tumble.

COMFORT & CONVENIENCE	MODEL S	MODEL S PERFORMANCE	MODEL S SIGNATURE	MODEL S SIGNATURE PERFORMANCE
Keyless entry	•	•		
Automatic keyless entry	Optional (Tech package)	Optional (Tech package)	•	•
Driver seat detection sensor for start-stop functionality	•	•	•	•
Cruise control	•	•	•	•
Standard-definition back-up camera	•	•		
High-definition back-up camera	Optional (Tech package)	Optional (Tech package)	•	•
Manual rear liftgate	•	•		
Power rear liftgate	Optional (Tech package)	Optional (Tech package)	•	•
Power windows featuring one-touch up/down with resistance reversing to protect against pinched fingers	•	•	•	•
Micro-filter ventilation system with replaceable filters	•	•	•	•
Front LED map lights	•	•	•	•
Front sun visors with mirrors	•	•	•	•
Fully trimmed frunk and rear cargo area with keyless open	•	•	•	•
12V power outlet	•	•	•	•
Automatic climate control with dual-zone temperature settings, air distribution controls and recirculation	•	•	•	•
Glove compartment	•	•	•	•
Dual-front USB ports for media and power	•	•	•	•
Homelink	Optional (Tech package)	Optional (Tech package)	•	•

TESLA

AUDIO, INSTRUMENTATION & INFOTAINMENT	MODEL S	MODEL S PERFORMANCE	MODEL S SIGNATURE	MODEL S SIGNATURE PERFORMANCE
17" capacitive touchscreen with media, communication, cabin and vehicle controls	•	•	•	•
200-watt, 7-speaker stereo system	•	•		
AM/FM/HD radio	•	•	•	•
MP3, AAC, and MP4 music format support	•	•	•	•
Flash memory storage for up to 500 songs	•			
580-watt, 12-speaker, Dolby Pro Logic IIx 7.1 enhanced surround sound	Optional (Sound Studio package)	Optional (Sound Studio package)	•	•
Flash memory storage for up to 3,000 songs	Optional (Sound Studio package)	Optional (Sound Studio package)	•	•
Bluetooth wireless technology for hands-free calling and streaming music	•	•	•	•
Streaming audio	•	•	•	•
Satellite radio ready	Optional (Sound Studio package)	Optional (Sound Studio package)	•	•
Wi-Fi ready	•	•	•	•
Wireless connectivity (capability)	Optional (Tech package)	Optional (Tech package)	•	•
Navigation with 7 years of free map updates	Optional (Tech package)	Optional (Tech package)	•	•
Three-spoke, multi-function steering wheel with tactile controls	•	•	•	•
Tire pressure monitoring system	•	•	•	•

SAFETY	MODEL S	MODEL S PERFORMANCE	MODEL S SIGNATURE	MODEL S SIGNATURE PERFORMANCE
NHTSA rating	**Not Yet Rated (Anticipated 5-Star Overall Safety Rating)**			
Driver and passenger front air bags	•	•	•	•
Advanced side curtain air bags	•	•	•	•
Driver and front passenger knee air bags	•	•	•	•
Driver and front passenger seat side air bags	•	•	•	•
Driver and front passenger advanced seat sensors	•	•	•	•
Driver seat position sensor	•	•	•	•
Three point driver and front passenger safety belts with retractor pretensioner and load limiter and secondary lap anchor pretensioners	•	•	•	•
Three point second row safety belts for all seats	•	•	•	•
Front row acoustic safety belt warning	•	•	•	•
Rollover crash sensor	•	•	•	•
Crash sensor for high voltage disconnect	•	•	•	•
Three second row LATCH attchments*	•	•	•	•
Rear door child safety locks	•	•	•	•
Interior, emergency manual release mechanism for all doors, frunk and rear cargo area	•	•	•	•
Anti-theft alarm and immobilizer system	•	•	•	•

*To seat three children, one of the seats must be a non-LATCH type seat

Panasonic

Lithium Ion NCR18650B

Features & Benefits

- High energy density
- Long stable power and long run time
- Ideal for notebook PCs, boosters, portable devices, etc.

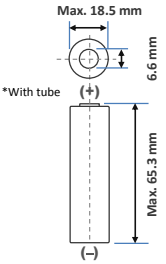
* At temperatures below 10°C, charge at a 0.25C rate.

Specifications

Rated capacity(1)	Min. 3200mAh
Capacity(2)	Min. 3250mAh Typ. 3350mAh
Nominal voltage	3.6V
Charging	CC-CV, Std. 1625mA, 4.20V, 4.0 hrs
Weight (max.)	48.5 g
Temperature	Charge*: 0 to +45°C Discharge: -20 to +60°C Storage: -20 to +50°C
Energy density(3)	Volumetric: 676 Wh/l Gravimetric: 243 Wh/kg

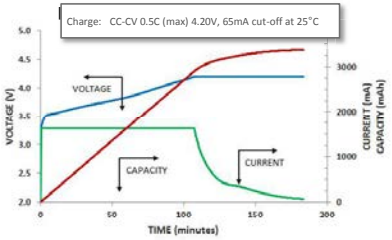
(1) At 20°C (2) At 25°C (3) Energy density based on bare cell dimensions

Dimensions

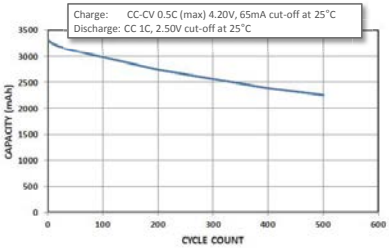


For Reference Only

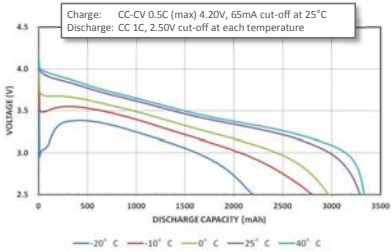
Charge Characteristics



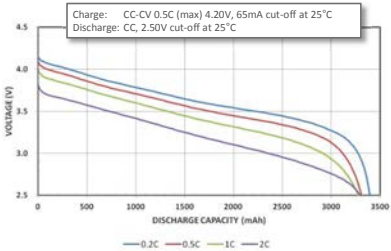
Cycle Life Characteristics



Discharge Characteristics (by temperature)



Discharge Characteristics (by rate of discharge)



The data in this document is for descriptive purposes only and is not intended to make or imply any guarantee or warranty.

For more information on how Panasonic can assist you with your battery power solution needs, visit us at www.panasonic.com/industrial/batteries-oem, e-mail secsales@us.panasonic.com, or call (469) 362-5600.

VERSION 13.11 R1 | Copyright© 2012 SANYO Energy (U.S.A.) Corporation. All Rights Reserved.

UCK42V6800C

1 Summary

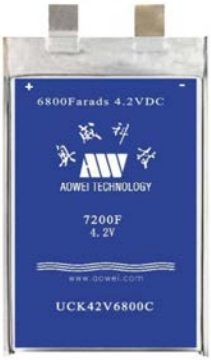
Characteristics

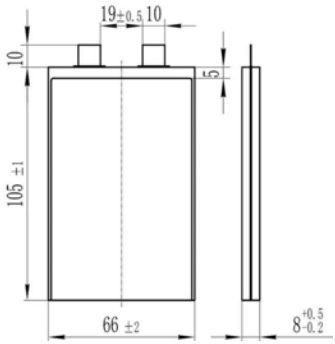
- CE、UL、RoHS certified
- Up to 100Wh/kg energy density
- Working temperature window :-25 ~ 55℃
- Up to 50,000 cycles under 5C rate current（2.8 ~ 4.0V）
- Up to 3195kWh/kg discharged specific energy over whole life span （2.8 ~ 4.0V）
- High power density and energy density
- Accurate CMS regulation and control with good linear charge and discharge behavior

Applications

- Fast-charging electric bicycle
- AGV logistics vehicle
- 3C digital product
- Drone
- Emergency UPS
- Energy storage of renewable energy sources such as wind and solar power
- Replacement of lead-acid battery

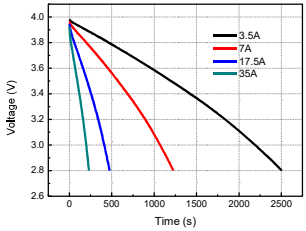
2 Dimension

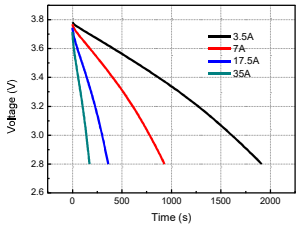




ADD: NO.188,Guoshoujing Road, Shanghai Free Trade Zone, China
TEL: +86 21 50802888 FAX: +86 21 38953296
WEB: http://www.aowei.com EMAIL : aowei@aowei.com

3 Product Specification





Discharge curves under 2.8 ~ 4.0V (left) and 2.8 ~ 3.8V (right) of UCK42V6800C

Part Number	UCK42V6800C
Operating Voltage Window (V)	2.8 ~ 4.0
	2.8 ~ 3.8
Nominal Capacitance (F)	7200
DC Resistance (mΩ)	3.5
Stored Energy (Wh)	12 (2.5 ~ 4.2V) §
	8.5 (2.8 ~ 4.0V)
	5.5 (2.8 ~ 3.8V)
Energy Density (Wh/kg)	100 (2.5 ~ 4.2V) §
	71 (2.8 ~ 4.0V)
	46 (2.8 ~ 3.8V)
Standard Charge/Discharge Current (A)	20
Maximum Charge/Discharge Current(<20s) (A)	45
Cycle Life (cycles)	50000 (2.8 ~ 4.0V)
	500,000 (2.8 ~ 3.8V)
Weight (g)	120
Dimensions (L×W×H) (mm)	105×66×8
Operating Temperature (°C)	-25 ~ +55
Storage Temperature (°C)	-30 ~ +60
§Remark: Stored Energy and energy density are tested according to article 6.2.5 in QC/T 741-2014 Ultra-capacitor for electric vehicles	

4 Test method

Test conditions

- Ambient temperature: 25±5°C
- Relative humidity: 25% ~ 85%
- Ambient pressure: 86 ~ 106kPa

Standards and conformity

- IEC 62576-2009 Electric double-layer capacitors for use in hybrid electric vehicles-Test methods for electrical characteristics
- QC/T 741-2014 Ultra-capacitor for electric vehicles
- Q/TFDQ 11-2012 UCK Series Ultra capacitor

5 Announcements

Operating requirements

- Operating exceeding the upper or lower operating temperature limit is strictly prohibited.
- Operating exceeding the maximum or minimum operating voltage is strictly prohibited.
- Short-circuit and reverse connection of the unit is strictly prohibited.
- Crush, collision, penetration or disassembly of the capacitor is strictly prohibited.
- Operating after cell swollen is strictly prohibited.
- Abandoning used capacitor is strictly prohibited, please discharge capacitor to 0V before recycling
- Please keep away from all heat sources
- Please avoid contacting water, oil, acid, alkali and other corrosive matters
- Juveniles should operate the unit accompanied by parents

Storage and transportation requirements

- Ambient temperature: -30 ~ 60°C
- Relative humidity: 0~95%
- Ambient pressure: 86 ~ 106kPa
- Storage or transportation of cell voltage below 2.5V is strictly prohibited. Please recharge the unit before long time storage, and recharge interval should be no longer than 6 months
- Please keep the unit protected, and prevent from short circuit
- Prevent exposing in the sun, keep away from heat sources and keep dry and ventilated
- Avoid contact of liquid or corrosive matters
- Please handle gently during handling process, prevent inversion, collision, crush or vibration during the process of transportation
- The unit can be transported by cars, trains, ships, etc

6 Product liability

- Aowei shall not be held responsible for the accident which caused by the violation of this specification
- Improvements of the product or upgrading of related technologies may change without further notice
- Please deal with the used ultra capacitor according to local environmental protection regulations. The used capacitor shall be treated as general industrial waste. Considering the recycling classification and resource reutilization of trashed or used chemical power units, used capacitor should be submitted to the company with professional qualifications. For the matters of disposal and recycle, GB/T 33598-2017 Recycling of traction battery used in electric vehicle-Dismantling specification can be the reference. Aowei could provide part of technical support depending on mutual agreements.
- To learn about the new products, welcome to contact us.

ADD: NO.188,Guoshoujing Road, Shanghai Free Trade Zone, China
TEL: +86 21 50802888 FAX: +86 21 38953296
WEB: http://www.aowei.com EMAIL : aowei@aowei.com

BDC546 – Bidirectional 750 V DC/DC-Converter

The global benchmark in high power FC applications

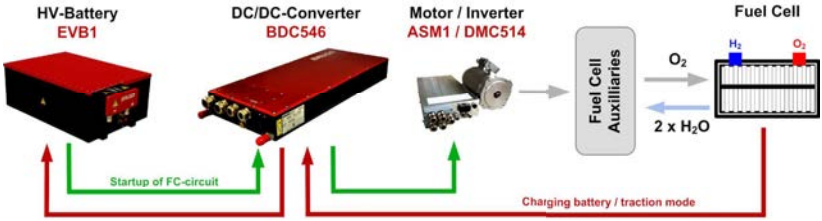
Features at a glance

- Patented ZVS topology ensures very low switching losses and excellent EMC behavior
- Very high efficiency (up to 99 %)
- High power density (6.4 kW / kg)
- Patented Liquid Pin cooling system for optimal temperature behavior and performance
- Very dynamic control loop

Unreached versatility

- Bidirectional capability allows wide applications including Fuel Cell, Drivetrain or DC charging applications
- Adjustable controllers facilitate the implementation in a wide variety of applications
- Easy to integrate due to high power density and single sided connection location
- Wide input and output voltage range allows installation in 400V and 700V applications

Application example



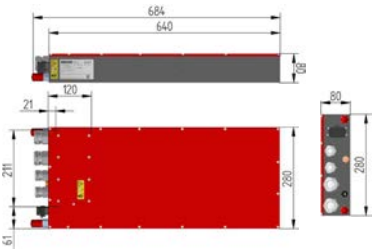
www.brusa.biz

BRUSA Elektronik AG
Neudorf 14
CH-9466 Sennwald
+41 81 758 19 00
sales@brusa.biz

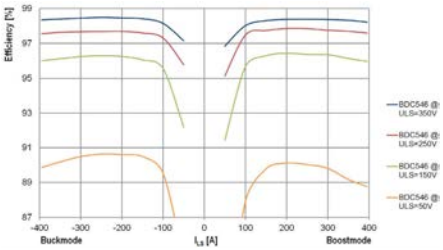
Specifications BDC546

	BDC546	
Highside		
Voltage range @ Max ILS current (condition: ULS / UHS = 0.15 - 0.8)	150 - 750	VDC
Overvoltage (shut down of power stage)	755	VDC
Absolute maximum voltage rating (temporary)	800	VDC
Lowside		
Min. voltage (startup)	0	VDC
Voltage range @ Max ILS current (condition: ULS / UHS = 0.15 - 0.8)	50 - 600	VDC
Overvoltage (shut down of power stage)	600	VDC
Absolute maximum voltage rating (temporary)	800	VDC
Performance		
Continuous low side current @ $T_{coolant}$ = 60°C (typical)	300	ADC
Max. low side current (current derating point @ $T_{coolant}$ = 40°C typical)	400	ADC
Continuous output power (@ ULS = 600 V)	180	kW
Efficiency typical (in buck mode @ UHS = 600 V, ULS = 400 V, ILS = 300 A)	98.9	%
Switching Frequency	41	kHz
Control circuit		
Voltage range for signals of control connector (AUX/clamp 30, Interlock, Enable/clamp 15)	9 - 16	V
High side voltage signal range	0 - 1'024	V
Low side voltage signal range	0 - 1'024	V
High side and low side voltage signal accuracy (1V or 1% of measured value, whatever is bigger) @ 25deg	+/- 1	V / %
High side and low side current signal range	+/- 512	A
High side and low side current signal accuracy (1.5A or 1% of measured value, whatever is bigger) @ 25deg	+/- 1.5	A / %
Mechanical data / Cooling system		
Weight	25.2	kg
IP - protection	IP6K6, IP6K7	
Ambient temperature range (operation)	- 40 to + 85	°C
Coolant temperature range	- 40 to + 65	°C
Coolant flow rate	15	l / min
Pressure drop (@ 15 l/min, $T_{coolant}$ = 25°C)	< 250	mbar
Galvanic insulation between high voltage circuit and user interface		
Test voltage (2s)	3'000	VDC

Dimensions



Efficiency



BRUSA 27-10-2020 / BDC546

BRUSA Elektronik AG
Neudorf 14
CH-9466 Sennwald
+41 81 758 19 00
sales@brusa.biz

BIODATA PENULIS

Sabri Ilma Khaidir adalah pemuda yang lahir di Wamena pada tanggal 18 Januari 1999. Ia merupakan anak kedua dari sepasang suami istri M Djalaludin dan Iriama Jakad. Berpindah pindah sekolah dasar dari Jakarta hingga Jayapura. Hingga pada akhirnya lulus di SD Muhammadiyah Abepura pada tahun 2011. Setelah itu melanjutkan pendidikan di SMP IT Abu Bakar Yk sampai pada jenjang SMA N 5 Yk dan lulus pada tahun 2017. Kemudian melanjutkan pendidikan S1 ke perguruan tinggi Institut Teknologi Sepuluh Nopember Departemen Teknik Elektro prodi Sistem Tenaga. Semasa bersekolah pada jenjang menengah pertama dan menengah atas, penulis aktif dalam organisasi pramuka dan OSIS. Penulis menjabat sebagai Ketua OSIS SMP IT Abu Bakar masa bakti 2012/2013. Dan juga menjabat sebagai Ketua OSIS SMA N 5 Yk masa bakti 2015/2016. Penulis dapat dihubungi melewati e-mail: sabrilma.khaidir@gmail.com