TUGAS AKHIR – EE 184801

DESAIN SISTEM IDENTIFIKASI PARAMETER MODEL *SUPERCAPACITOR* MENGGUNAKAN METODE *RECURSIVE LEAST SQUARE* UNTUK KARAKTERISASI *ONLINE*

Hafizh Azra Pribadi
NRP 07111540000157

Dosen Pembimbing
Vita Lystianingrum, S.T., M.Sc., Ph. D.
Feby Agung Pamuji, S.T., M.T., Ph. D.

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

Surabaya 2020

TUGAS AKHIR – EE 184801

DESAIN SISTEM IDENTIFIKASI PARAMETER MODEL *SUPERCAPACITOR* MENGGUNAKAN METODE *RECURSIVE LEAST SQUARE* UNTUK KARAKTERISASI *ONLINE*

Hafizh Azra Pribadi
NRP 07111540000157

Dosen Pembimbing
Vita Lystianingrum, S.T., M.Sc., Ph. D.
Feby Agung Pamuji, S.T., M.T., Ph.D.

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

Surabaya 2020

FINAL PROJECT – EE 184801

DESIGN OF PARAMETER IDENTIFICATION SYSTEM FOR SUPERCAPACITOR MODEL USING RECURSIVE LEAST SQUARES METHOD FOR ONLINE CHARACTERIZATION

Hafizh Azra Pribadi
NRP 07111540000157

Supervisors
Vita Lystianingrum, S.T., M.Sc., Ph. D.
Feby Agung Pamuji, S.T., M.T., Ph.D.

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

Surabaya 2020

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi keseluruhan Tugas akhir saya dengan judul "**DESAIN SISTEM IDENTIFIKASI PARAMETER MODEL *SUPERCAPACITOR* MENGGUNAKAN METODE *RECURSIVE LEAST SQUARE* UNTUK KARAKTERISASI *ONLINE***" adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

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

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

Surabaya, Juni 2020

Hafizh Azra Pribadi
07111540000157

DESAIN SISTEM IDENTIFIKASI PARAMETER MODEL *SUPERCAPACITOR* MENGGUNAKAN METODE *RECURSIVE LEAST SQUARE* UNTUK KARAKTERISASI *ONLINE*

TUGAS AKHIR

Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Departemen Teknik Elektro
Fakultas Teknologi Elektro dan Informatika Cerdas
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Menyetujui :

Dosen Pembimbing I

14-Jul-2020

Vita Lystianingrum, S. T., M. Sc., Ph. D.
NIP. 198208292006042001

SURABAYA
Juni, 2020

DESAIN SISTEM IDENTIFIKASI PARAMETER MODEL *SUPERCAPACITOR* MENGGUNAKAN METODE *RECURSIVE LEAST SQUARE* UNTUK KARAKTERISASI *ONLINE*

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

Feby Agung Pamuji, S.T., M.T., Ph. D.
NIP. 198702062012121002

SURABAYA
Juni, 2020

DESAIN SISTEM IDENTIFIKASI PARAMETER MODEL *SUPERCAPACITOR* MENGGUNAKAN METODE RECURSIVE LEAST SQUARE UNTUK KARAKTERISASI *ONLINE*

Nama mahasiswa : Hafizh Azra Pribadi
Dosen Pembimbing I : Vita Lystianingrum, S.T., M.Sc., Ph. D.
Dosen Pembimbing II : Feby Agung Pamuji, S.T., M.T., Ph.D.

ABSTRAK

Pada zaman sekarang, di mana kebutuhan akan listrik semakin hari semakin meningkat, dan juga diikuti oleh perkembangan teknologi yang semakin hari juga semakin meningkat pula, maka dibutuhkan sebuah pengembangan teknologi dalam bidang media penyimpanan energi. Salah satu teknologi media penyimpanan energi adalah *supercapacitor*. Performa *supercapacitor* yang memiliki keuntungan seperti siklus *charge-discharge* yang relatif cepat serta siklus hidup yang panjang merupakan keuntungan yang membuat *supercapacitor* dirasa cocok untuk memenuhi kebutuhan dalam hal media penyimpan energi di masa mendatang. Sebelum menggunakan *supercapacitor* dalam sistem terintegrasi, dibutuhkan sebuah pemodelan pada *supercapacitor*. Pemodelan *supercapacitor* menjadi hal yang utama dilakukan agar dapat mengetahui karakteristik dan parameter internal sebuah *supercapacitor* yang dipakai. Parameter internal *supercapacitor* dapat diestimasi secara *online* bersamaan dengan proses pengujian *supercapacitor*. Salah satu cara pengujian *supercapacitor* yaitu menggunakan metode *High Pulse Power Characterization* atau HPPC. Dengan metode karakterisasi HPPC, maka parameter internal *supercapacitor* dapat diketahui dan dimodelkan menjadi rangkaian RC sederhana yang terdiri atas resistansi dan kapasitansi yang disusun secara seri. Berdasarkan Tugas Akhir ini dapat ditarik kesimpulan bahwa besar kapasitansi dari sebuah *supercapacitor* meningkatkan akurasi estimasi parameter *supercapacitor*. Selain itu, pemodelan rangkaian ekivalen RC sederhana lebih akurat untuk memodelkan superkapasitor 650 F dan 2000 F dibandingkan 100 F.

Kata kunci: HPPC, Rangkaian Ekivalen, *Recursive Least Square*, Estimasi *Online*, *Supercapacitor*

Halaman ini sengaja dikosongkan

DESIGN OF PARAMETER IDENTIFICATION SYSTEM FOR SUPERCAPACITOR MODEL USING RECURSIVE LEAST SQUARES METHOD FOR ONLINE CHARACTERICATION

Student Name : Hafizh Azra Pribadi
Supervisor I : Vita Lystianingrum, S.T., M.Sc., Ph. D.
Supervisor II : Feby Agung Pamuji, S.T., M.T., Ph.D.

ABSTRACT

In this day, where the need for electricity is increasing, and also followed by technological developments that are increasing as well, it requires a technological development in tne field of energy storage media. One of the energy storage media is supercapacitor. Supercapacitor performance that has advantages such as relatively fast charge-discharge cycles and long-life cycles is an advantage that makes supercapacitor suitable to fulfill needs in terms of energy storage media in the future. Before using a supercapacitor in an integrated system, a modeling of the supercapacitor is needed. Supercapacitor modeling is the main thing to do to know the characteristics and internal parameters of a supercapacitor we used. The internal parameters of the supercapacitor can be estimated online together with the supercapacitor testing process. One way to test supercapacitor is to use the method of High Pulse Power Characterization or HPPC. With the HPPC characterization method, the supercapacitor internal parameters can be identified and modeled into a simple RC circuit consisting of resistance and capacitance arranged in series. Based on this final project, it can be concluded that the large capacitance of a supercapacitor increases the accuracy of the estimated parameters of the supercapcitor. In addition, simple RC equivalent circuit modeling is more accurate to model 650 F and 2000 F supercapacitor than 100 F.

Key words: HPPC, Equivalent Circuit, Recursive Least Square, Online Estimation, Supercapacitor

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Tiada kata yang mampu menggambarkan seberapa banyak syukur yang harus penulis panjatkan kepada Allah Subhanahu Wata'ala, atas segala Rahmat, Karunia, dan Petunjuk yang telah dilimpahkan-Nya, walaupun baragam tantangan menghadang, pada akhirnya penulis mampu menyelesaikan Tugas Akhir ini yang berjudul "**DESAIN SISTEM IDENTIFIKASI PARAMETER MODEL *SUPERCAPACITOR* MENGGUNAKAN METODE RECURSIVE LEAST SQUARE UNTUK KARAKTERISASI ONLINE**".

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

1. Ibunda Lissalmi dan Ayahanda Rosihan Pribadi atas segala doa dan cinta yang tak henti pada penulis dalam keadaan apapun. Semoga Allah SWT senantiasa melindungi dan memberi mereka tempat terbaik kelak di surgaNya.
2. Ibu Vita Lystianingrum, ST., M.Sc., Ph. D. dan Bapak Prof. Feby Agung Pamuji, ST., MT., Ph.D. selaku dosen pembimbing yang telah memberikan arahan, bimbingan dan perhatiannya selama proses penyelesaian Tugas Akhir ini.
3. M. Nafis Ismail dan Audie Rahmani yang telah memberikan pelatihan *supercapacitor* serta memberikan saran dan tempat untuk bertanya.
4. Tim *Supercapacitor*, Sultanto Hermawan Putra yang menjadi teman seperjuangan dalam menyelesaikan Tugas Akhir dengan topik *supercapacitor*.
5. Fachrudin Ari, Fitra Alghifari Suhardi, Adrian Aryaputra, dan M Dzikri Qomaruzzaman yang setia menjadi teman diskusi perihal Matlab dan Simulink
6. Shintia Nurulita yang selalu menyemangati dan menghibur penulis di kala penat.
7. Teman-teman seperjuangan e55 yang telah menemani dan menorehkan cerita selama masa kuliah sampai penyusunan Tugas Akhir ini.

8. Seluruh dosen dan karyawan Departemen Teknik Elektro ITS yang telah memberikan banyak ilmu dan menciptakan suasana belajar yang luar biasa.

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

Surabaya, Juni 2020

Hafizh Azra Pribadi
07111540000157

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL
LEMBAR PENYATAAN
LEMBAR PENGESAHAN
ABSTRAK…… i
ABSTRACT……... iii
KATA PENGANTAR…… v
DAFTAR ISI…… vii
DAFTAR GAMBAR…….. ix
DAFTAR TABEL…… x
DAFTAR SINGKATAN……... xi
BAB I PENDAHULUAN…… 1
1.1 Latar Belakang…… 1
1.2 Permasalahan…….. 2
1.3 Tujuan…… 2
1.4 Batasan Masalah…….. 2
1.5 Metodologi……... 3
1.6 Sistematika Penulisan…….. 4
1.7 Relevansi…… 5
BAB II KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI…….. 7
2.1 Supercapacitor…… 7
2.1.1 Perbandingan *Supercapacitor* dengan Penyimpan Energi Konvensional…… 7
2.1.2 Pemodelan *Supercapacitor*…… 9
2.2 Rangkaian Ekivalen RC Sederhana…….. 12
2.3 Metode Karakterisasi…… 14
2.3.1 Metode HPPC…….. 14
2.4 Online Estimation…….. 15
2.5 Recursive Least Squares…… 15
2.5.1 *Input*…… 16
2.5.2 *Output*…….. 16
2.5.3 *Regressor*…… 16
2.5.4 *Theta*…… 16

BAB III PENGUJIAN DAN PEMODELAN PARAMETER INTERNAL *SUPERCAPACITOR*……. 17
3.1 Diagram Alur Pemodelan Supercapacitor…… 18
3.2 Konfigurasi Pengujian Supercapacitor……. 19
3.2.1 Spesifikasi Peralatan Pengujian…….. 20
3.2.2 Skenario Metode Pengujian…… 26
3.2.3 Skenario Metode *Data Logging*…….. 28
3.3 Simulasi Model Rangkaian Ekivalen RC Sederhana…… 28
3.4 Sistem estimasi Supercapacitor dengan Metode Recursive Least Squares pada Simulink…… 29
3.4.1 Sistem estimasi *Supercapacitor* dengan Metode *Recursive Least Squares* pada Simulink dengan data simulasi….. 31
3.4.2 Sistem estimasi *Supercapacitor* dengan Metode *Recursive Least Squares* pada Simulink dengan data *real*…… 31
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN…… 33
4.1 Metode HPPC…… 33
4.2 Hasil Pengujian Supercapacitor……. 33
4.3 Hasil Estimasi Parameter Supercapacitor dengan Metode Recursive Least Square……. 35
4.3.1 Perbandingan Hasil Pengujian dan Hasil Estimasi Tegangan……. 38
BAB V KESIMPULAN…… 42
5.1 Kesimpulan……... 42
5.2 Saran……. 42
DAFTAR PUSTAKA…… 43
LAMPIRAN…….. 45
Datasheet Spesifikasi Sperkapasitor 650 F BCAP0650……. 45
Datasheet Spesifikasi DC Power Suppl……. 46
Datasheet Spesifikasi DC Electronic Load…… 47
Datasheet Spesifikasi Digital Storage Oscilloscopes……. 48
Datasheet Spesifikasi Hantek Current Clamp Meter……. 50
INDEKS …… 52
BIODATA PENULIS…… 53

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Skema kapasitor konvensional…….. 7
Gambar 2. 2 Skema *supercapacitor*……... 8
Gambar 2. 3 *Ragone plot* …… 19
Gambar 2. 4 Model elektrik *supercapacitor*…… 12
Gambar 2. 5 Model pengganti s*upercapacitor* RC sederhana……. 13
Gambar 2. 6 Charging dan discharging eksperimen dan simulasi….. 13
Gambar 3.1 Diagram Alur Pemodelan *Supercapacitor*……... **Error! Bookmark not defined.**
Gambar 3.2 Konfigurasi Pengujian *Supercapacitor*…… **Error! Bookmark not defined.**
Gambar 3.3 Konfigurasi Peralatan selama Pengujian Berlangsung…. 20
Gambar 3. 5 DC Source Power Supply…… 21
Gambar 3. 6 DC Electronic Load……. 22
Gambar 3. 7 Osiloskop……. 23
Gambar 3.8 Tampilan *Software* LinkVIew……. 25

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Spesifikasi *Supercapacitor* Uji 21
Tabel 3.2 Spesifikasi *DC Power Supply* 22
Tabel 3.3 Spesifikasi *Programmable DC Load* 23
Tabel 3.4 Spesifikasi *Data Logger Digital Storage Oscilloscope*.....23
Tabel 3.5 Spesifikasi DC *Current Clamp Meter* 24
Tabel 3.7 Urutan Pengujian *Supercapacitor* Metode HPPC.....27
Tabel 4. 1 Tabel Estimasi Parameter Metode HPPC.....41

DAFTAR SINGKATAN

AC	*Alternating Current*
DC	*Direct Current*
DSO	*Digital Storage Oscilloscope*
EDLC	*Electric Double Layer Capacitor*
EPR	*Equivalent Parallel Resistance*
ESR	*Equivalent Series Resistance*
HPPC	*High Pulse Power Characterization*
RC	*Resistor-Capacitor*
RLS	*Recursive Least Square*

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 *Latar Belakang*

Teknologi penyimpanan energi hingga saat ini memainkan peran yang penting dalam pengaplikasiannya di dalam dunia industri, terutama energi baru-terbarukan. *Lifetime*, keandalan, dan juga keamanan adalah beberapa faktor yang diperhatikan dalam pemilihan teknologi penyimpan energi. Penyimpan energi konvensional seperti baterai yang selama ini populer karena tingkat kerapatan energinya yang tinggi kekurangan di sisi siklus *lifetime*. Di sisi lain, *supercapacitor* atau yang juga dikenal sebagai *ultracapacitor* dipertimbangkan menjadi penyimpan enrgi yang menjanjikan. Hal ini disebabkan *supercapacitor* memiliki kelebihan berupa siklus pemakaian yang tinggi, kerapatan daya yang besar, dan efisiensi yang tinggi daripada baterai[1].

Supercapacitor yang disebut juga dengan ultrakapasitor atau *electric double layer capacitor* (EDLC) memiliki karakter unik dapat menjadi penyimpan energi pada berbagai aplikasi. Berbagai macam area pengembangan dari sistem penyimpanan energi seperti pembangkitan energi baru-terbarukan, kendaraan listrik, dan peralatan telekomunikasi[2]. Sebagai contoh pengaplikasiannya, *supercapacitor* bisa digunakan sebagai penyimpan daya tambahan di sistem *pv* dan *wind hybrid*, dengan konfigurasi parallel dengan baterai. Melakukan *charging* saat cuaca panas/angin kencang, dan *discharging* saat tidak ada matahari/angin. *Supercapacitor* juga bisa dipakai di kendaraan listrik atau *hybrid* untuk menghasilkan daya puncak pada akselerasi kendaraan dan sebagai energi cadangan. Dapat dipasang paralel dengan baterai selama *startup* pada mesin kendaraan dengan tujuan mengurangi ukuran dan daya dari baterai[3]. Dengan keunggulan tersebut, kebutuhan sistem penyimpanan energi terhadap *supercapacitor* juga semakin meningkat.

Agar supaya penggunaan dan pengaplikasian *supercapacitor* lebih efektif dan efisien, maka diperlukan parameterisasi pada sebuah rangkaian ekivalen. Parameteriasasi adalah proses perkiraan untuk menentukan nilai dari parameter dalam sebuah model. Proses parameterisasi secara *online* tentunya memiliki kelebihan dibandingkan proses parameterisasi secara *offline*. Di antaranya, nilai-nilai parameter

model dapat diketahui secara langsung saat *supercapacitor* beroperasi, di mana proses parameterisasi dapat dilakukan setiap waktu.

1.2 *Permasalahan*

Perumusan masalah dari tugas akhir ini adalah :

1. Bagaimana cara menentukan nilai parameter internal *supercapacitor* menggunakan metode *Recursive Least Square*.
2. Seberapa akurat metode *Recursive Least Square* dalam menentukan nilai parameter internal terhadap *supercapacitor* yang diuji.

1.3 *Tujuan*

Tugas akhir ini bertujuan untuk :

1. Menentukan nilai parameter internal *supercapacitor* pada pemodelan rangkaian ekivalen RC sederhana menggunakan metode *Recursive Least Square*.
2. Mengetahui berapa tingkat *error* dari metode *Recursive Least Square* dalam estimasi nilai parameter internal terhadap *supercapacitor* yang diuji.

1.4 *Batasan Masalah*

Batasan masalah dalam tugas akhir ini adalah:

1. Pemodelan dan simulasi menggunakan PSIM dan MATLAB/Simulink R2019b.
2. Blok-blok yang digunakan adalah blok *generic* dan *Simscape* pada MATLAB/Simulink R2019b.
3. Proses karakterisasi pada pengujian dan simulasi model *supercapacitor* tidak mempertimbangkan temperatur.
4. Estimasi yang dilakukan hanya mengestimasikan parameter intenal *supercapacitor* tanpa mengestimasikan *State of Charge*.
5. Rangkaian ekivalen yang digunakan adalah rangkaian RC sederhana.

1.5 *Metodologi*

Metodologi yang digunakan dalam menyusun penelitian Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Studi Literatur

   Mengumpulkan referensi-referensi dan literatur yang berhubungan dengan kapasitor dan *supercapacitor* yang meliputi konstruksi, bahan, cara pemodelan menggunakan rangkaian ekivalen, metode karakterisasi *online*, dan cara pengujiannya.

2. Pengumpulan Data dan Pengujian

   Pada tahap ini dilakukan pengambilan data-data yang diperlukan untuk mendukung Tugas Akhir ini, diantaranya adalah data spesifikasi *supercapacitor* Maxwell dengan kapasitas 100F, 650 F dan 2000 F. Data yang diambil berupa data kapasitansi dan ESR atau *Equivalent Series Resistance* dari *supercapacitor* tersebut. Selain itu data spesifikasi peralatan pengukuran juga diperlukan pada proses ini sebagai panduan dalam pengoperasiannya ketika proses pengujian. Data manual yang dibutuhkan yaitu dari peralatan *Programmable Multi Range DC Power Supply*, *Programmable DC Electronic Load*, dan *Digital Storage Oscilloscope*. Kemudian melakukan pengujian *supercapacitor* dengan menggunakan metode arus dinamis *High Pulse Power Characterization* (HPPC).

3. Simulasi dan Pemodelan

   Tahap ini berisi proses pengolahan data-data yang diperoleh dari proses sebelumnya untuk mendapatkan hasil yang diinginkan dan digunakan sebagai pembanding dengan hasil dari proses pengujian secara ekesperimen. *Software* yang digunakan dalam tahap ini adalah PSIM untuk mensimulasikan pemodelan RC sederhana dengan hasil keluaran kurva karakteristik tegangan hasil dari proses simulasi.

4. Desain Sistem Estimasi Recursive Least Square pada Simulink

   Pada tahap ini, nilai parameter yang diperoleh dimasukkan ke dalam sistem estimator yang sudah dirangkai di Simulink.

5. Pengetesan Sistem Simulink

   Pada tahap ini menggunakan 2 jenis data untuk memperoleh hasil estimasi, yang pertama adalah data simulasi

yang sudah didapat dari simulasi dengan program PSIM, dan yang kedua adalah dengan menggunakan data pengukuran.

Langkah ini bertujuan untuk mengetahui kemampuan dari rangkaian ekivalen untuk dapat merepresentasikan karakteristik dari *supercapacitor* berdasarkan grafik perubahan tegangan terminal *supercapacitor* ketika proses pengujian menggunakan metode HPPC.

6. Analisis Hasil Pengujian dan Hasil Simulasi

   Menganalisis hasil yang diperoleh dari proses pengujian dan hasil yang diperoleh dari simulasi. Grafik tegangan *supercapacitor* hasil estimasi menggunakan metode HPPC dibandingkan dengan bentuk grafik tegangan *supercapacitor* hasil pengujian. Tujuannya untuk mengetahui akurasi dari rangkaian ekivalen dalam merepresentasikan karakter dari *supercapacitor*.

7. Penyelesaian Laporan Tugas Akhir

   Tahap ini dilakukan sebagai tahap akhir dari serangkaian pengerjaan Tugas Akhir ini. Di samping itu penyelesaian laporan ini dilakukan guna memenuhi persyaratan kelulusan mata kuliah Tugas Akhir.

1.6 *Sistematika Penulisan*

Sistematika penulisan dalam tugas akhir ini terdiri dari lima BAB dengan uraian sebagai berikut :

1. BAB 1 merupakan pendahuluan yang berisikan latar belakang, permasalahan, tujuan, batasan masalah, metodologi, sistematika penulisan, dan relevansi.
2. BAB 2 berisikan kajian pustaka dan dasar teori yang membahas mengenai teori-teori penunjang yang berkaitan dengan kapasitor, estimasi parameter, dan metode yang digunakan.
3. BAB 3 berisikan perancangan dan metode karakterisasi *supercapacitor* hingga penjelasan sistem estimasi yang akan dipakai.
4. BAB 4 berisikan simulasi dan analisis data, yang membahas tentang analisis data hasil estimasi parameter *supercapacitor* dengan rangkaian ekivalen RC sederhana
5. BAB 5 berisikan kesimpulan dan saran.

1.7 Relevansi

Tugas Akhir ini diharapkan mampu memberikan manfaat terhadap proses estimasi parameter *supercapacitor*, terlebih secara online yang mana menggunakan rangkaian ekivalen sebagai bentuk pemodelan parameter internal *supercapacitor* dengan mempertimbangkan akurasi rangkaian pemodelan dalam prosesnya. Diharapkan Tugas Akhir ini mampu memberikan pertimbangan dalam proses perancangan sebuah sistem yang membutuhkan karakter internal *supercapacitor* yang dimodelkan oleh rangkaian ekivalen dalam meningkatkan akurasi hasil pengujian.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB II
KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

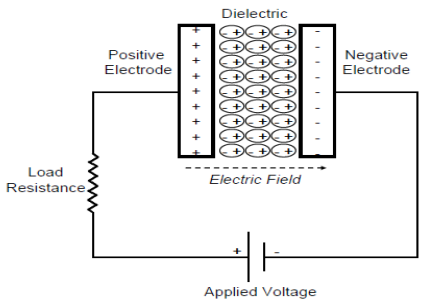
Dalam bab ini terdiri dari beberapa sub-bab yang berisikan teori penunjang dalam Tugas Akhir ini, diantaranya mengenai *supercapacitor*, estimasi online, pemodelan rangkaian R-C sederhana, dan metode *Recursive Least Square*. Dasar teori yang digunakan dalam menunjang Tugas Akhir ini akan disajikan di sub-bab 2.1 sampai 2.5

2.1 *Supercapacitor*

Supercapacitor, atau yang juga dikenal sebagai *ultracapacitors* atau *electrochemical capacitors*, menggunakan bahan elektroda dengan luas permukaan yang besar dan menggunakan dielektrik elektrolit yang tipis untuk mencapai nilai kapasitansi yang lebih besar daripada kapasitor konvensional. Dengan demikian, *supercapacitor* dapat mencapai kepadatan energi yang lebih besar, dengan tidak lupa juga mempertahankan karakteristik kapasitor konvensional di mana memiliki kerapatan daya yang tinggi[3].

2.1.1 Perbandingan *Supercapacitor* dengan Penyimpan Energi Konvensional

Kapasitor konvensional pada dasarnya tersusun atas dua elektroda yang dipisahkan oleh bahan dielektrik isolasi. Ketika tegangan diberikan kepada kapasitor muatan-muatan berlawanan muncul pada masing-masing elektroda. Muatan yang muncul tetap terpisah dikarenakan adanya bahan dielektrik, sehingga menghasilkan medan listrik yang yang mana menjadikan kapasitor untuk dapat menyimpan energi[4].



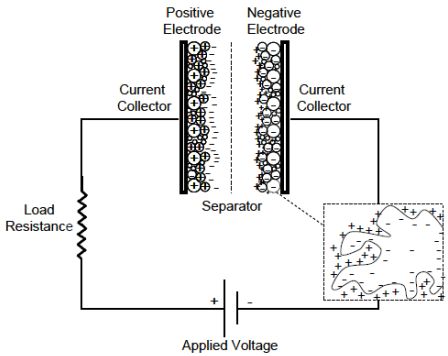
Gambar 2. 1 Skema kapasitor konvensional[4]

Pada kapasitor konvensional, seperti yang dapat dilihat di gambar 2.1 kapasitansi (C) berbanding lurus dengan luas penampang dari tiap elektroda, namun berbanding terbalik dengan jarak antara elektroda. Dirumuskan sebagai berikut:

$$C=\varepsilon_o\varepsilon_r\frac{A}{D} \tag{2.1}$$

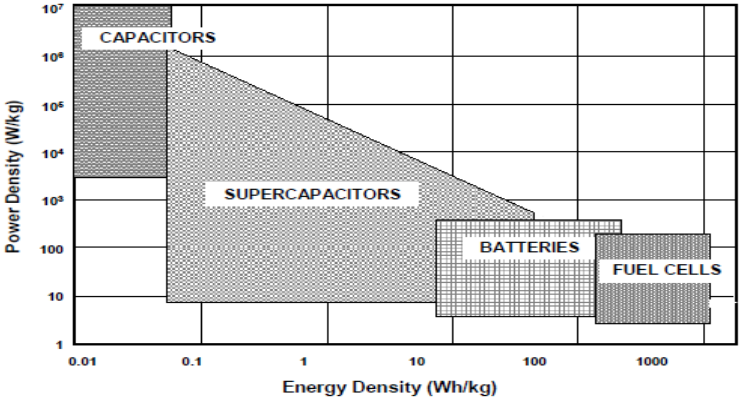
Kapasitor konvensional memiliki kerapatan daya yang relatif tinggi, tetapi kerapatan energi yang relatif rendah jika dibandingkan dengan baterai. Dengan kata lain, baterai dapat menyimpan total energi yang lebih banyak daripada kapasitor, tetapi tidak dapat menyalurkan dengan waktu yang cepat. Dengan begitu memiliki kerapatan daya yang rendah. Di sisi lain, kapasitor menyimpan energi per volume lebih sedikit namun dapat melakukan *discharge* dengan sangat cepat untuk menghasilkan daya yang banyak, sehingga kapasitor memiliki kerapatan daya yang tinggi[4].

Supercapacitor menerapkan prinsip yang sama dengan kapasitor konvensional. Perbedaannya adalah pada *supercapacitor* menggunakan elektroda dengan dengan luas permukaan yang lebih besar, dan juga dielektrik yang lebih tipis yang menyebabkan jarak antar elektroda lebih kecil[4].



Gambar 2. 2 Skema *supercapacitor*[4]

Keuntungan *supercapacitor* dibandingkan dengan media penyimpan energi konvensional, yaitu kerapatan daya yang tinggi, waktu pengisian yang relatif lebih cepat, dan siklus hidup yang lama.



Gambar 2. 3 *Ragone plot* [4]

Gambar 2.3 di atas merupakan "Ragone Plot" yang mana memperlihatkan perbandingan tingkatan kerapatan daya dari beberapa media penyimpan energi sebagai sumbu vertical, dan kerapatan energi sebagai sumbu horizontal. Terlihat bahwa *supercapacitor* berada di antara kapasitor konvensional dan baterai. Walaupun memiliki nilai kapasitansi yang leih besar daripada kapasitor konvensional, *supercapacitor* masih dirasa kurang dari segi kerapatan energinya bila dibandingkan dengan baterai dan *fuel cell*[4].

2.1.2 Pemodelan *Supercapacitor*

Pemodelan *supercapacitor* sangat penting untuk proses perkiraan awal pada desain sistem, monitoring kondisi selama sistem berjalan, dan untuk keperluan pengaturan penempatan pada sistem terintegrasi[5]. Tujuan pemodelan *supercapacitor* dilakukan untuk mengetahui model yang tepat untuk merepresentasikan konstruksi internal *supercapacitor*. Sehingga dalam pemodelan internal *supercapacitor* memiliki beberapa

kebutuhan utama sebelum merancang model rangkaian ekivalennya, yakni:

a. Struktur model rangkaian ekivalen seharusnya berhubungan dengan konstruksi fisik *supercapacitor*, namun sesederhana mungkin agar lebih mudah dirancang
b. Model rangkaian ekivalen seharusnya mendeskripsikan kondisi optimum *supercapacitor* dengan akurasi yang sangat baik
c. Nilai parameter model rangkaian ekivalen didapatkan dari pengujian terminal *supercapacitor*

Dengan konstruksi fisik *supercapacitor* yang menjadi acuan utama dalam pemodelan rangkaian ekivalennya, maka komponen penyusun rangkaian ekivalen mendeskripsikan setiap parameter internal yang didapat terlebih dahulu dari proses karakterisasi *supercapacitor*.

Berdasarkan pada teori *double layer* bahwa *supercapacitor* dapat direpresentasikan sebagai rangkaian ekivalen yang terdiri dari resistor (R) dan non-linear kapasitor (C) sehingga dikenal juga sebagai rangkaian ekivalen RC [6].

Dengan begitu, rangkaian ekivalen dari *supercapacitor* merupakan representasi dari dua sifat, yaitu sifat resistansi yang digambarkan dengan resistor (R) dan kapasitansi (C).

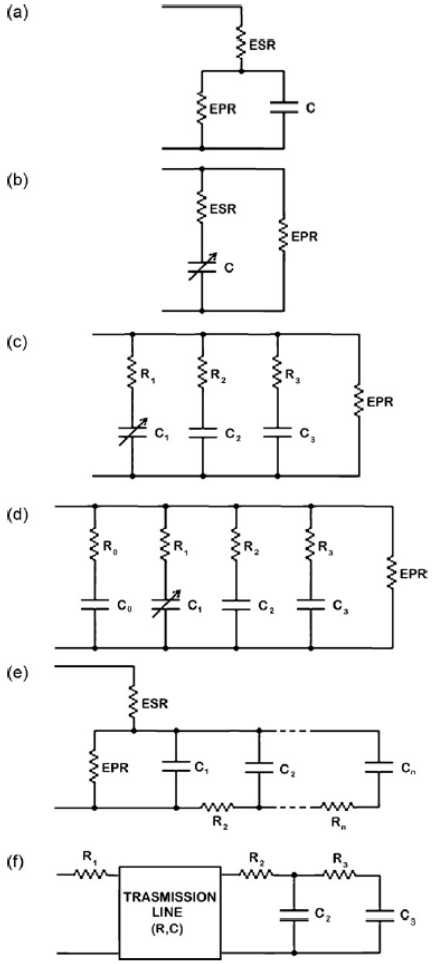
Nilai resistansi pada rangkaian ekivalen bergantung kepada beberapa parameter [6], yaitu:

a. Resistansi material elektroda
b. Resistansi material elektrolit
c. Ukuran pori-pori
d. Porositas/ukuran membran
e. Kualitas penampan elektroda

Berdasarkan aplikasinya, *supercapacitor* dapat dimodelkan pada beberapa rangkaian ekivalen dengan berbagai tingkat kompleksitas. Yang paling sederhana adalah terdiri dari satu buah kapasitor dan satu buah resistor yang biasa disebut ESR (*Equivalent Series Resistance*).

Seperti yang dijelaskan [6], model paling sederhana dan paling umum dijumpai adalah model klasik atau *classical model* seperti ditunjukkan di gambar 2.4a. Model klasik terdiri atas kapasitor C, *equivalent series resistor* (ESR), dan *Equivalent Parallel Resistor* (EPR). Model ini sangat mudah untuk digunakan namun hasilnya sering tidak memadai untuk digunakan dalam karakterisasi perilaku *supercapacitor*.

Selanjutnya terdapat model dengan kapasitansi non-lnier seperti pada gambar 2.4b. Model ini juga dengan mudah digunakan namun lagi-lagi tidak cukup untuk menjadi hasil karakterisasi *supercapacitor* dalam jangka panjang. Model selanjutnya yang lebih kompleks adalah model tiga cabang dan empat cabang yang berturut-turut ditunjukkan pada gambar 2.4c dan 2.4d. Meskipun perilaku *supercapacitor* direpresentasikan secara akurat, kedua model tersebut tidak dengan mudah diemplementasikan. Dua model terakhir adalah *ladder model* seperti ditunjukkan gambar 2.4e dan *transmission line model* seperti pada gambar 2.4f.

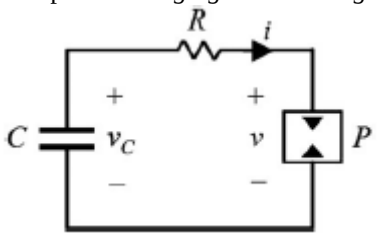


Gambar 2. 4 Model elektrik *supercapacitor*[6]

2.2 *Rangkaian Ekivalen RC Sederhana*

Model rangkaian pengganti *supercapacitor* salah satunya adalah rangkaian RC sederhana, yaitu rangkaian yang terdiri dari hanya satu

cabang RC seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.5. Model ini terdiri dari resistor R, yang mana merupakan hambatan dalam dari *supercapacitor* dan kapasitor C, yang merupakan nilai kapasitansi dari *supercapacitor* selama proses *charging* dan *discharging*[7].



Gambar 2. 5 Model pengganti s*upercapacitor* RC sederhana[8]

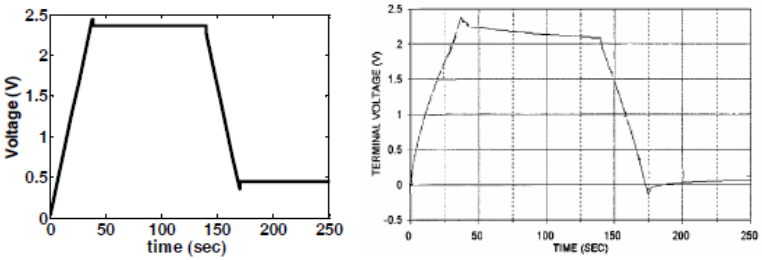
Di mana persamaan dari rangkaian ekivalen RC sederhana adalah sebagai berikut

$$V(t) = \frac{1}{C}\int i\,dt + iR \qquad (2.2)$$

Nilai dari komponen RC pada percabangan sederhana ini didapatkan dari spesifikasi *supercapacitor* yang dimodelkan yakni pada *datasheet supercapacitor*

Rangkaian ekivalen model RC sederhana secara umum digunakan dalam pemodelan dari penyimpanan energi secara tertanam, karena model RC sederhana merepresentasikan tingkah laku *supercapacitor* dan penyimpanannya pada kondisi tertentu[7].

Pada gambar 2.6 ditunjukkan contoh hasil proses *charging* dan *discharging* simulasi dan eksperimen.



Gambar 2. 6 Charging dan discharging eksperimen dan simulasi[7]

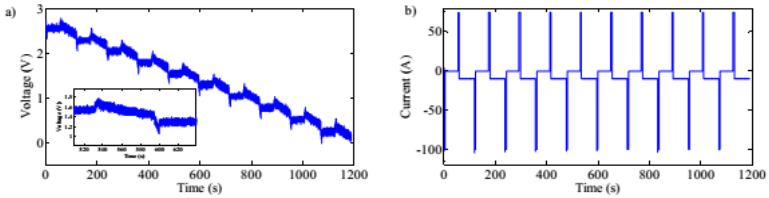
Dengan membandingkan hasil simulasi dengan eksperimen, dapat terlihat bahwa rangkaian RC sederhana memiliki beberapa keuntungan dan kerugian. Keuntungan utama adalah dengan rangkaian yang sederhana, menjadikannya mudah untuk diaplikasikan dengan rangkaian lain. Sedangkan kerugain utamanya yaitu rangkaian RC sederhana tidak mampu menangkap perubahan non linier dari tegangan kapasitor setelah proses *charging* dan *discharging* berhenti[7].

2.3 *Metode Karakterisasi*

Dalam proses karakterisasi *supercapacitor* diperlukan perlakuan khusus untuk mengidentifikasi karakter internal dari *supercapacitor*. Karakterisasi *supercapacitor* bertujuan untuk mendapatkan parameter internal sebagai data perhitungan dalam pemodelannya menjadi rangkaian ekivalen.

2.3.1 Metode HPPC

Pengujian metode ini merupakan salah satu jenis pengujian yang menggunakan arus dinamis. Kondisi beban yang diterima oleh *supercapacitor* pada suatu sistem sesungguhnya sering mengalami perubahan, maka diperlukan proses validasi suatu model rangkaian ekivalen *supercapacitor* sesuai dengan kondisi nyatanya. Metode *Hybrid Pulse Power Characterization* (HPPC) adalah salah satu pengujian yang dapat memprediksi tingkah laku *supercapacitor* pada kondisi arus dinamis dengan profil beban yang berbeda-beda [9]. Dengan menggunakan metode HPPC sebagai proses validasi dari rangkaian ekivalen, maka dapat disimpulkan seberapa besar error model rangkaian ekivalen pada skenario sistem sesungguhnya. Hal ini dikarenakan profil beban metode HPPC bersifat sangat dinamis [9]. Pada gambar 2.7 berikut contoh profil arus dan tegangan yang terukur pada metode HPPC.



Gambar 2. 7 Profil arus dan tegangan HPPC[9]

2.4 *Online Estimation*

Online Estimation, atau metode estimasi online adalah metode yang digunakan untuk memperkirakan parameter dan *state* saat sistem berjalan/beroperasi, dan memperbarui nilai parameter pula selama sistem berjalan[10]. Prinsip kerja metode ini adalah memperbarui parameter dan *state* dari sebuah model ketika data baru tersedia. Hal tersebut menjadi kelebihan metode estimasi *online* dibandingkan dengan metode esitmasi *offline*, yang mana data diambil seluruhnya terlebih dahulu kemudian diolah untuk mendapatkan hasil estimasi. Metode estimasi *online* yang digunakan pada tugas akhir kali ini biasa dikenal dengan istilah *real time*.

Selain metode *Recursive Least Squares*, ada beberapa metode yang dapat digunakan untuk melakukan *online estimation* antara lain metode *Kalman Filter*, *Extended Kalman Filter*, *Particle Filter*, *Recursive Polynomial Model Estimator*, dan *Unscented Kalman Filter* [10].

2.5 *Recursive Least Squares*

Recursive Least Square adalah salah satu metode yang umum dipakai untuk identifikasi parameter sistem. Bentuk umum persamaan Recursiv Least Square adalah sebagai berikut:

$$y(t) = H(t)\ \theta(t) \tag{2.3}$$

Keterangan:

$y(t)$ = *Output*
$H(t)$ = *Regressor*
$\theta(t)$ = *Theta*

Pada metode estimasi menggunakan *Recursive Least Squares*, terdapat beberapa parameter yang dibutuhkan untuk pengolahan data yang nantinya menjadi hasil estimasi yang diinginkan. Beberapa parameter yang ada dalam metode ini adalah:

a. *Input*
b. *Output*
c. *Regressor*
d. *Theta*

2.5.1 *Input*

Input merupakan salah satu parameter/data yang harus ada sebagai masukan sistem estimasi. Pada metode estimasi *supercapacitor* kali ini, data input didapat dari hasil simulasi yang dijalankan. Data *input* yang menjadi masukan di MatLab merupakan matriks dari arus yang didapat dari data pengukuran.

2.5.2 *Output*

Output merupakan salah satu parameter/data yang harus ada sebagai pembanding dengan keluaran sistem estimasi. Pada metode estimasi *supercapacitor* kali ini, data *output* didapat dari hasil simulasi yang dijalankan.

2.5.3 *Regressor*

Regressor dilambangkan dengan simbol “H”, yang mana merupakan matriks yang menyebabkan perubahan nilai parameter hasil estimasi berubah setiap waktu. Dalam metode estimasi kali ini, *regressor* berupa jumlah arus dari tiap data masukan, dan juga arus arus tiap waktu.

2.5.4 *Theta*

Theta merupakan parameter yang akan didapat dari hasil estimasi menggunakan metode *Recursive Least Square*. Jumlah parameter yang akan diestimasi mengikuti jumlah dimensi matriks *regressor* yang dipakai.

BAB III
PENGUJIAN DAN PEMODELAN PARAMETER INTERNAL *SUPERCAPACITOR*

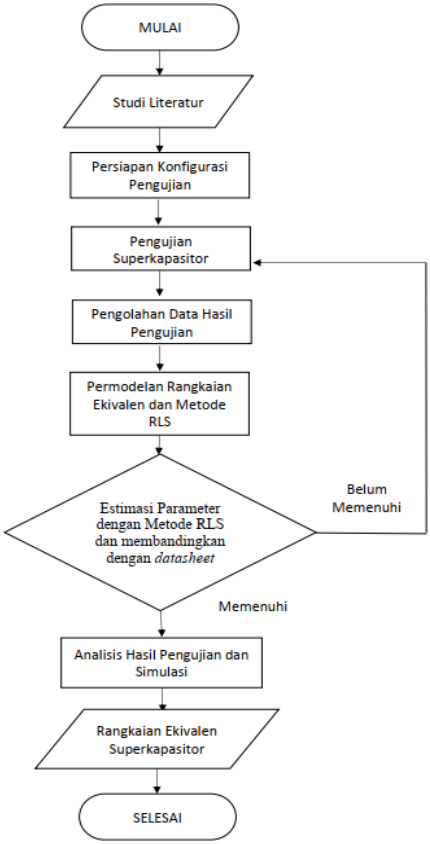
Dalam bab ini akan dijelaskan tentang proses pengujian *supercapacitor*. Pengujian *supercapacitor* yang dilakukan menggunakan *Multi-Range DC Power Supply*, *DC Electronic Load*, dan *Digital Storage Oscilloscope*. Hasil pengujian yang telah dilakukan akan mendapatkan besaran arus yang akan digunakan sebagai input sistem dan besaran tegangan yang merupakan hasil output system. Pada proses ini, digunakan MATLAB/Simulink untuk mendesain sistem identifikasi parameter online *supercapacitor* yang mana akan mengolah kembali data hasil pengujian menjadi nilai setiap komponen penyusun rangkaian ekivalennya. Hasil yang didapat dari sistem estimasi yaitu berupa grafik yang terdiri dari grafik tegangan output hasil pengukuran dan grafik tegangan hasil estimasi dan parameter hasil estimasi. Setelah itu dibandingkan dan dianalisis lebih jauh di bab 4.

Dalam serangkaian pemaparan pada bab ini, terdapat beberapa sub-bab yang menjelaskan detail dari proses pengujian hingga pemodelan *supercapacitor*. Diagram alur keseluruhan proses karakterisasi *supercapacitor* dari pengujian hingga pemodelannya akan dijelaskan pada sub-bab 3.1. Pada sub-bab 3.2 konfigurasi pengujian *supercapacitor* akan dipaparkan mengenai peralatan pengujian yang digunakan hingga skenario metode pengujian. Pemodelan dan simulasi rangkaian ekivalen *supercapacitor* akan dijelaskan di sub-bab 3.3. Selanjutnya pada sub-bab 3.4 akan dijelaskan sistem estimasi parameter *supercapacitor* dengan menggunakan Simulink.

Pada proses pemodelan, simulasi dilakukan menggunakan *software* MATLAB/Simulink untuk mendemonstrasikan kinerja dan RC sederhana sebagai rangkaian pembanding sesuai dengan metode pengujian yang dilakukan. Blok-blok bagian dalam simulasi pengujian rangkaian ekivalen RC dimodelkan dengan menggunakan blok *generic* dan *simscape* dari *software* MATLAB/Simulink.

3.1 *Diagram Alur Pemodelan Supercapacitor*

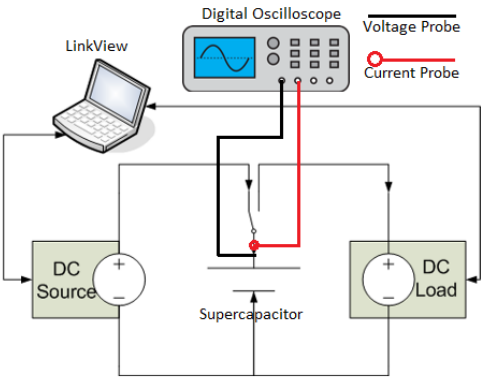
Pemodelan *supercapacitor* dengan hasil akhir berupa rangkaian ekivalen RC dan nilai setiap komponen penyusunnya yang sesuai dengan hasil pengujiannya melalui proses tahapan panjang. Dengan hasil pemodelan *supercapacitor* yang didapatkan dari pengolahan hasil pengujian terlebih dahulu, maka proses pengujian dengan proses pemodelan harus dilakukan secara bertahap. Gambar 3.1 berikut merupakan diagram alur dari tahapan panjang dalam proses pemodelan *supercapacitor*.



Gambar 3. 1 Diagram alur pemodelan *supercapacitor*

3.2 *Konfigurasi Pengujian Supercapacitor*

Keseluruhan metode pengujian *supercapacitor* pada Tugas Akhir ini terdiri dari beberapa peralatan, diantaranya *supercapacitor*, DC *power supply* dengan DC *electronic load* yang diatur skenario pengujiannya dengan *linkVIew*, dan *oscilloscope* dengan *probe* tegangan dan *clamp* arus. Keseluruhan konfigurasi pengujian parameter *supercapacitor* digambarkan pada **Error! Reference source not found.**.

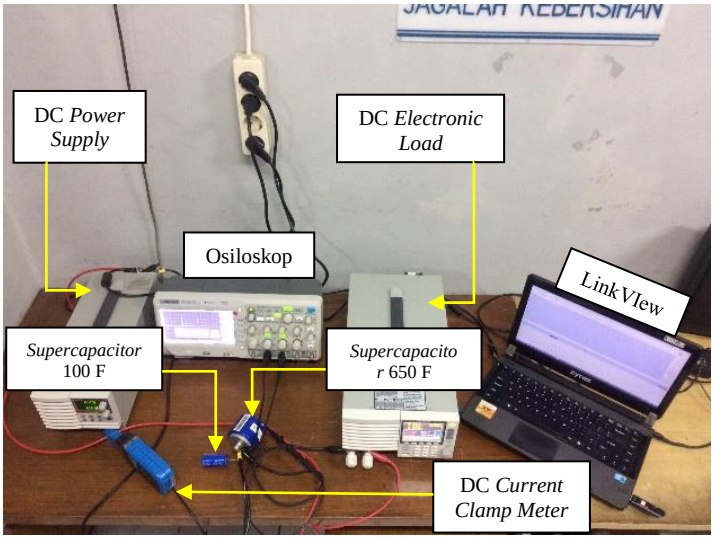


Gambar 3. 2 Konfigurasi pengujian *supercapacitor*

Supercapacitor bersifat sebagai beban sementara terlebih dahulu saat memasuki fase *charging* dengan diberi muatan berupa arus konstan oleh *Programmable DC power supply* hingga tegangannya mencapai tegangan nominal. Setelah tegangan nominal tercapai maka rangkaian suplai bersifat terbuka dan *supercapacitor* memasuki fase *sleep* dimana *supercapacitor* tidak terhubung beban selama periode yang telah ditentukan, atau bisa diibaratkan seperti rangkaian terbuka. Saat fase *discharging*, *supercapacitor* berubah menjadi sumber tegangan DC yang terhubung dengan *programmable DC electronic load*. *Supercapacitor* akan menyuplai arus pada beban sehingga dapat diketahui karakteristik dari parameter tegangan dan arus selama pelepasan muatan. Berikut ini jenis peralatan yang digunakan selama proses pengujian *supercapacitor* berlangsung.

3.2.1 Spesifikasi Peralatan Pengujian

Peralatan pengujian yang terangkai seperti pada Gambar 3.1 memiliki peranan tersendiri sesuai dengan spesifikasi peralatan. Spesifikasi peralatan perlu dipahami agar dalam proses pengujian berlangsung dapat menggunakan peralatan secara optimal. Selain itu, penentuan skenario metode pengujian juga disesuaikan dengan spesifikasi yang ada agar peralatan yang digunakan tidak mengalami kerusakan saat digunakan, sehingga tidak mengganggu jalannya proses pengujian *supercapacitor*.



Gambar 3.1 Konfigurasi peralatan selama pengujian berlangsung

3.2.1.1 Supercapacitor

Pada Tugas Akhir ini, objek yang diuji dan dimodelkan menjadi rangkaian ekivalennya adalah *supercapacitor*. *Supercapacitor* yang digunakan merupakan produk *supercapacitor* dari pabrikan *Maxwell Technologies* dengan 3 jenis *supercapacitor* yang berbeda pada nilai kapasitansinya. Selama proses pengujian, *supercapacitor* diuji kemampuannya berdasarkan metode HPPC (*High Pulse Power Characterization*). Karakteristik tegangan *supercapacitor* yang dihasilkan dari proses pengujian akan digunakan kembali sebagai

pembanding dengan hasil tegangan yang didapat dari system estimasi berupa grafik. Berikut tabel dari spesifikasi *supercapacitor* 100F (Sc-100), 650F (Sc-650), dan *supercapacitor* 2000F (Sc-2000) yang digunakan selama pengujian.

Tabel 3.1 Spesifikasi *supercapacitor* uji [11]

Parameter	Sc-100	Sc-650	Sc-2000
Jenis	BCAP0100	BCAP650	BCAP2000
Kapasitansi *Rating*	100F	650 F	2000 F
Tegangan *Rating*	2,7 V	2,7 V	2,7 V
Tegangan Maksimal	2,85 V	2,85 V	2,85 V
Arus Maksimal	61 A	680 A	1500 A
ESR	15 mΩ	0,8 mΩ	0,35 mΩ

3.2.1.2 DC Source

Sumber DC pada proses karakterisasi parameter internal *supercapacitor* menggunakan *DC power supply* yang berperan sebagai sumber daya dari *supercapacitor* saat fase *charging*. Seperti yang ditunjukkan di gambar 3.5 jenis DC *power supply* yang digunakan merupakan jenis yang dapat mensuplai daya dengan beberapa opsi yaitu *constant current* sesuai kebutuhan saat fase *charging*. DC *power supply* seperti yang ditunjukkan di gambar 3.5 yakni Gw Instek *Multi-Range DC Power Supply* dengan seri PSW 30-72 dengan spesifikasi yakni dapat dilihat di table 3.2.

Gambar 3. 2 DC source power supply

Tabel 3.2 Spesifikasi *DC power supply* [12]

Nama Model	PSW 30-72
Tipe	Tipe II
Rating Tegangan	0 – 30 V
Rating Arus	0 – 72 A
Daya	720 W

3.2.1.3 DC Load

Beban DC pada proses karakterisasi parameter internal *supercapacitor* berperan sebagai beban yang mampu menyerap daya dari *supercapacitor* sehingga *supercapacitor* mampu melepas muatan kepada beban yang telah disimpan sebelumnya seesuai dengan kebutuhan fase *discharging* pengujian. Gambar 3.6 merupakan beban DC yang diperlukan merupakan jenis beban untuk arus DC yang dapat diatur model pembebanannya dengan profil *constant current*, *constant resistance*, *constant voltage*, atau *constant power* menggunakan *software* operasional peralatan. Beban DC yang digunakan dalam proses karakterisasi adalah GW Instek DC *Programmable Electronic Load* dengan spesifikasi sebagaimana tertera di tabel 3.3.

Gambar 3. 3 DC electronic load

Tabel 3.3 Spesifikasi *programmable DC load* [13]

Nama Model	PEL-3031E
Tegangan operasi	1 V – 150 V
Rating Arus	0 – 60 V
Daya	300 W

3.2.1.4 Data Logger

Pada saat melakukan proses pengujian *supercapacitor* diperlukan pengolah data hasil pengukuran parameter *supercapacitor*, yakni dengan peralatan yang disebut *data logger*. Parameter pengukuran yang perlu direkam antara lain tegangan, arus, dan waktu pengujian selama proses berlangsung. *Data logger* sebagaimana terlihat di gambar 3.7 yang digunakan dalam proses akuisisi data pengujian berupa osilloskop yang dilengkapi dengan *voltage probe* sebagai alat pengukur tegangan. Osilloskop yang digunakan yakni Siglent *Digital Storage Oscilloscope* seri SDS1204CFL dengan spesifisikasi pada Tabel 3.4.

Gambar 3. 4 Osiloskop

Tabel 3.4 Spesifikasi *Data Logger Digital Storage Oscilloscope*[14]

Nama Model	Siglent SDS1204CFL
Tegangan Input Maksimal	400 V (DC+AC PK-PK, 1MΩ *input impedance*

Range Frekuensi	45Hz – 440Hz
Daya	50VA Max
Probe Tegangan	Siglent 300 MHz 600 VDC

3.2.1.5 Current Probe

Pada proses pengujian berlangsung, arus yang digunakan pada proses *charge-discharge* diukur menggunakan *current clamp meter* yang berfungsi sebagai probe pengukuran arus. Sehingga *current clamp meter* dihubungkan dengan osiloskop sebagai *data logger* utama pengujian. Jenis *current clamp meter* yang digunakan mampu mengukur arus DC dengan kapasitas diatas 10 A, yang merupakan arus konstan pengujian. *Current clamp meter* yang digunakan yakni Hantek AC/DC *Current clamp* seri CC-65 dengan spesifisikasi pada tabel 3.5 berikut.ng

Tabel 3.5 Spesifikasi DC *Current Clamp Meter* [15]

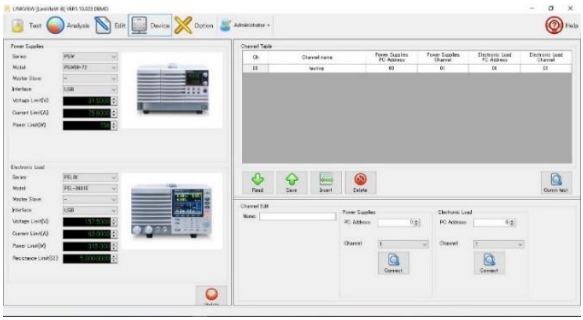
Nama Model	Hantek AC/DC *Current Clamp* CC-65
Tegangan Ukur Maksimal	300 VDC atau 240 Vrms AC
Range Pengukuran	1mV/10mA dan 1mV/100mA
Output Connector	BNC Connector

3.2.1.6 Software Pengaturan

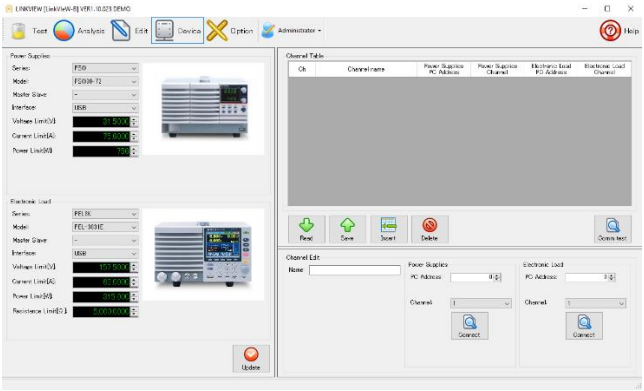
Pengujian *supercapacitor* dengan perlakuan metode HPPC membutuhkan profil khusus yang mampu mengatur DC *electronic power supply* dan DC *electronic load* untuk menjalankan metode dalam satu waktu. Kedua alat tersebut bersifat *programmable* menggunakan *software* LinkVIeW yang disediakan pabrikan GWInstek yang mana merupakan *software* pengatur profil pengujian yang terpasang pada *personal computer* mampu mengintegrasikan kedua alat tersebut. LinkVIeW mampu mengoperasikan DC *power supply* dan DC *electronic load* untuk menjalankan suatu rangkaian dengan metode HPPC yang terdiri dari satu *channel* DC *power supply* dan satu *channel* dari DC *electronic load* menjadi satu pada LinkVIeW [15].

Selain fungsinya yang mampu mengintegrasikan peralatan DC *source* dan DC *load* untuk menjalankan proses pengujian, LinkVIeW dapat berfungsi untuk merekam proses pengujian *supercapacitor* terhadap DC *power suppy* dan DC *electronic load*. Grafik dan data yang

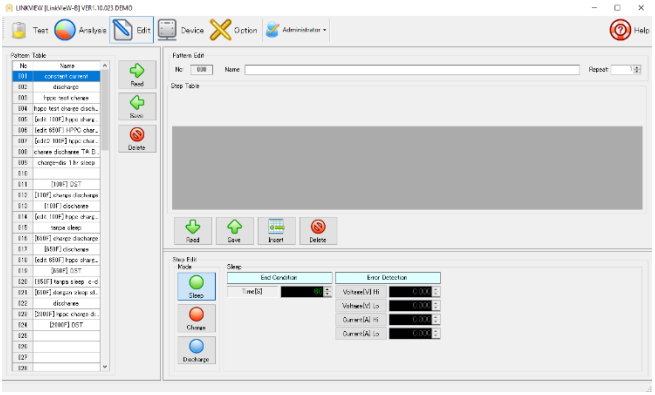
dihasilkan dari LinkVIeW digunakan sebagai referensi terhadap grafik yang dihasilkan oleh *oscilloscope* dan dianalisis lebih lanjut.



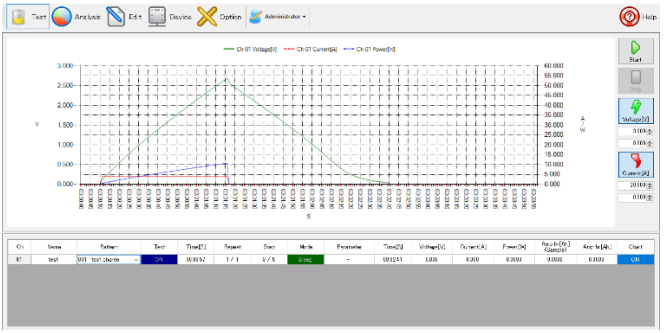
Gambar 3.5 Tampilan *software* LinkVIew



Gambar 3.9 Tampilan window LinkVIew: pengaturan peralatan uji DC *power supply* dan DC *electronic load*



Gambar 3.10 Tampilan window LinkVIew: pengaturan skenario pengujian



(c)

Gambar 3.11 Tampilan window LinkVIew: *data logging* dan *Monitoring* parameter pengujian

3.2.2 Skenario Metode Pengujian

Pengujian yang dilakukan dalam karakterisasi *supercapacitor* sebagai penentuan parameter internalnya menggunakan metode arus dinamik *HPPC* untuk mengetahui kapabilitas pemodelan parameter *supercapacitor* dalam bentuk rangkaian ekivalen RC pada kondisi nyata, yakni dengan beban yang berubah-ubah dalam waktu yang singkat

3.2.2.1 Metode High Pulse Power Characterization (HPPC)

Pengujian metode arus dinamik *supercapacitor* pada sub-bab ini dilakukan dengan terlebih dahulu memastikan kondisi awal *supercapacitor* tidak bermuatan penuh dengan melakukan proses *discharge* hingga 0 V. Selanjutnya menguji *supercapacitor* pada kondisi muatan penuh sebelum dengan metode siklus *discharge-charge* secara berulang-ulang berdasarkan konstanta waktu yang dibatasi sebagai bentuk representasi beban pada kondisi nyata. *Supercapacitor* pada fase *charging* terlebih dahulu dimuati hingga mencapai tegangan nominalnya dengan arus konstan yang ditentukan. Setelah itu diberlakukan proses *discharge-charge* dengan waktu setiap fasenya sebesar 10 detik atau kurang dari waktu yang dibutuhkan *supercapacitor* pada proses *charging* untuk mencapai tegangan nominalnya dan proses *discharging* untuk mencapai tegangan rendah yang aman yaitu kurang dari 0,1 V. Proses keseluruhan pengujian *supercapacitor* metode HPPC dengan siklus *discharge-charge* saat *supercapacitor* bermuatan penuh dilakukan berulang-ulang. Berikut tabel urutan pengujian *supercapacitor* metode HPPC.

Tabel 3.6 Urutan pengujian *supercapacitor* metode HPPC

No	Fase	Parameter	Waktu (S)	Kondisi Akhir	
				Tegangan (V)	Arus (A)
1	Sleep	-	5	-	-
2	Charge	2,7 V ; 10A	-	2,67	-
3	Sleep	-	10	-	-
4	Discharge	10A	10	-	-
5	Sleep	-	10	-	-
6	Charge	2,7 V ; 10A	10	-	-
7	Sleep	-	20	-	-
8	Discharge	10A	10	-	-
9	Sleep	-	10	-	-

3.2.3 Skenario Metode *Data Logging*

Selama proses pengujian berlangsung, diperlukan proses akusisi data untuk merekam parameter-parameter yang dibutuhkan untuk proses perhitungan dan pengolahan data primer pada proses pemodelan rangkaian ekivalen.

Selama proses pengujian berlangsung, perekaman parameter diatas yang akan digunakan untuk proses pengukuran akan dilakukan oleh Siglent *digital storage oscilloscope (DSO).* DSO merupakan salah satu jenis osiloskop yang dapat menyimpan nilai-nilai parameter selama proses pengujian pada alat penyimpanan digital. Selama proses pengujian, pengaturan osiloskop yang digunakan seperti pada tabel dibawah ini.

Tabel 3.8 profil pengaturan osiloskop pengujian *supercapacitor*

Mode Osiloskop (Output file)	*Recorder* (.csv)
Channel 1	*Voltage probe*
Channel 2	*Current clamp meter* (*current probe*)
Volt/div (*channel* 1)	500 mV
Volt/div (*channel* 2)	500 mV
Time/div	50 s

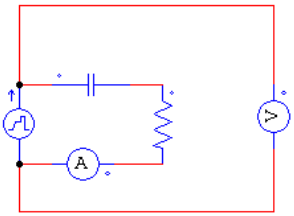
Selain itu terdapat *software* linkVIew sebagai *software* pengatur skenario pengujian yang dapat berfungsi untuk mengamati sekaligus merekam proses *charge-discharge* dari *supercapacitor*. Grafik dan data yang dihasilkan dari osilloskop dan linkVIew akan digunakan sebagai input pada sistem di Matlab.

3.3 *Simulasi Model Rangkaian Ekivalen RC Sederhana*

Pemodelan *supercapacitor* yang digunakan dalam Tugas Akhir ini berupa rangkaian ekivalen RC sederhana. Pemodelan simulasi ini dilakukan untuk menguji tingkat akurasi estimasi parameter rangkaian ekivalen yang kemudian menggunakan data pengukuran yang sesungguhnya. Pemodelan dilakukan dengan tiga macam *supercapacitor* dengan kapasitansi yang berbeda, yakni 100F, 650F, dan 2000F.

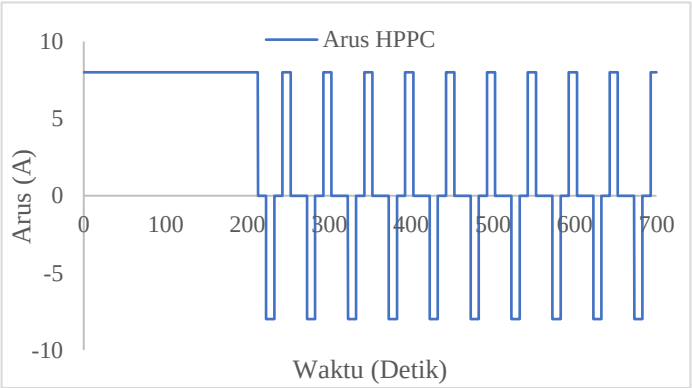
Pada model RC sederhana yang disimulasikan di program PSIM, seperti ditunjukkan pada gambar 3.10, bagian sisi *input* menggunakan sumber arus Picewise Linear. Rangkaian ekivalen ini hanya terdiri atas satu percabangan rangkaian R dan C yang tersusun secara seri. Komponen penyusun resistansi R merupakan representasi dari *equivalent serial*

resistance (ESR) dari *supercapacitor*. Sedangkan komponen kapasitansi C merupakan representasi dari kapasitansi *rating* dari *supercapacitor*. Sehingga nilai ESR dan kapasitansi rating dari percabangan rangkaian RC sederhana didapatkan dari *datasheet* yang berisi informasi detil spesifikasi *supercapacitor*



Gambar 3. 10 Model simulasi rangkaian RC sederhana

Pada gambar 3.11 berikut merupakan contoh hasil simulasi dari rangkaian model RC sederhana.



Gambar 3. 11 Simulasi grafik arus HPPC

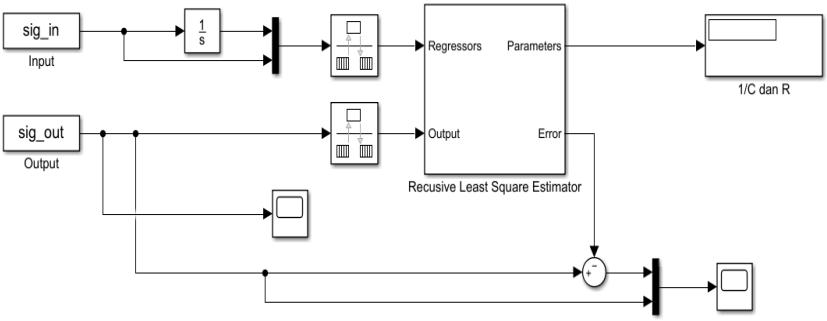
3.4 *Sistem estimasi Supercapacitor dengan Metode Recursive Least Squares pada Simulink*

Pada sub bab ini akan dijelaskan pemodelan estimasi pada Simulink dengan membuat sistem dengan estimator RLS. Seperti yang dijelaskan [8], bahwa dalam metode estimasi ini menggunakan rangkaian

RC sederhana seperti gambar 2.5. Parameter yang akan diestimasi adalah sebagai berikut:

1. *Tegangan output* hasil estimasi
2. $\theta 1$ sebagai $\frac{1}{C}$
3. $\theta 2$ sebagai R

Blok-blok yang digunakan adalah blok *generic* dan *Simscape* pada Simulink. Blok-blok tersebut dirangkai sedemeikian rupa seperti pada gambar 3.12 berikut:



Gambar 3. 12 Sistem *estimator recursive least square*

Gambar 3.12 merupakan rangkaian yang terdiri dari 2 masukan *block estimator*, yakni sig_in dan sig_out. Kedua masukan tersebut merupakan data yang terdapat dalam *workspace* matlab yang dipanggil menggunakan *block from workspace*. Sig_in merupakan arus input rangkaian ekivalen RC sederhana, sedangkan sig_out merupakan tegangan output dari rangkaian ekivalen RC sederhana.

Berdasarkan persamaan 2.2 dan 2.3, maka bentuk persamaan dari rangkaian ekivalen RC sederhana menjadi seperti berikut:

$$V(t) = \frac{1}{C}\int i\,dt + iR \tag{3.1}$$

$$y(t) = H(t)\,\theta(t) \tag{3.2}$$

$$y(t) = [\int i\,dt \quad i] \begin{bmatrix} \frac{1}{C} \\ R \end{bmatrix} \tag{3.3}$$

Persamaan 3.3 di atas merupakan persamaan Recursive Least Square dengan rangkaian ekivalen *supercapacitor* berupa rangkaian RC sederhana. Dari rangkaain tersebut dapat diketahui bahwa *regressor* yang menjadi masukan *block estimator* terdiri dari integral arus dan arus pada saat waktu sampling. Sedangkan theta/parameter yang didapat dari estimasi adalah berupa $\frac{1}{C}$ dan R.

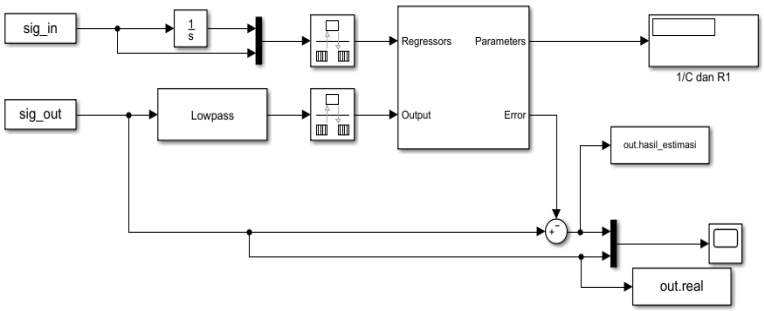
Kemudian dari hasil estimasi dengan *Recursive Least Square*¸ didapat pula estimasi tegangan sistem yang merupakan tegangan keluaran sistem yang tekena *error* perhitungan estimasi. Kemudian tegangan estimasi dibandingkan dengan tegangan keluaran sistem yang tidak terkena *error* di dalam satu *scope* yang sama.

3.4.1 Sistem estimasi *Supercapacitor* dengan Metode *Recursive Least Squares* pada Simulink dengan data simulasi

Seperti yang sudah dijelaskan di pada sub bab 3.3, data hasil simulasi dipakai untuk melihat seberapa baik tingkat akurasi hasil estimasi rangkaian ekivalen RC sederhana. Di sini data simulasi didapat dari mensimulasikan rangkaian ekivalen pada program PSIM, berupa grafik arus dan tengan rangkaian yang kemudian dijadikan input dan output dari sistem estimasi. Gambar rangkaian Simulink dapat dilihat pada gambar 3.12.

3.4.2 Sistem estimasi *Supercapacitor* dengan Metode *Recursive Least Squares* pada Simulink dengan data *real*

Setelah melakukan estimasi dengan data simulasi dan dirasa hasil estimasi sudah baik, kemudian melakukan estimasi dengan data *real*. Data *real* di sini adalah data pengukuran. Rangkaian simulink kali ini dapat dilihat pada gambar 3.13 berikut:



Gambar 3. 13 Sistem e*stimator recursive least square* dengan *filter*

Dari gambar rangkaian di atas, terdapat penambahan satu *block* yaitu *block lowpass filter*. Penambahan terserbut bertujuan untuk memperhalus sinyal keluaran rangkaian ekivalen RC sederhana.

BAB IV
HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini dibahas hasil pengujian *supercapacitor* dan hasil simulasi dari estimasi parameter *supercapacitor* dengan metode *Recursive Least Square* pada Simulink. Proses pengujian dan simulasi estimasi menggunakan metode HPPC pada tiga *supercapacitor* yang masing-masing memiliki nilai sebesar 100F, 650 F, dan 2000 F. Kemudian ketiga hasil tersebut dianalisis dengan membandingkan grafik hasil estimasi dengan grafik perubahan tegangan terminal pada *supercapacitor*.

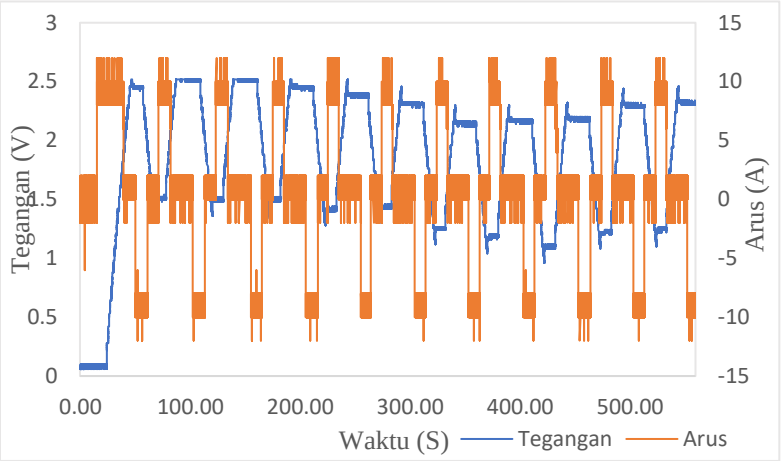
4.1 *Metode HPPC*

Pada sub-bab ini akan dibahas mengenai hasil karakterisasi dari *supercapacitor* Sc-100, Sc-650, dan Sc-2000 dengan menggunakan metode *hybrid pulse power characterization* (HPPC). Proses karakterisasi ini dilakukan untuk mengetahui kemampuan dan ketahanan model rangkaian ekivalen dalam memodelkan *supercapacitor* sesungguhnya pada kondisi beban berubah-ubah.

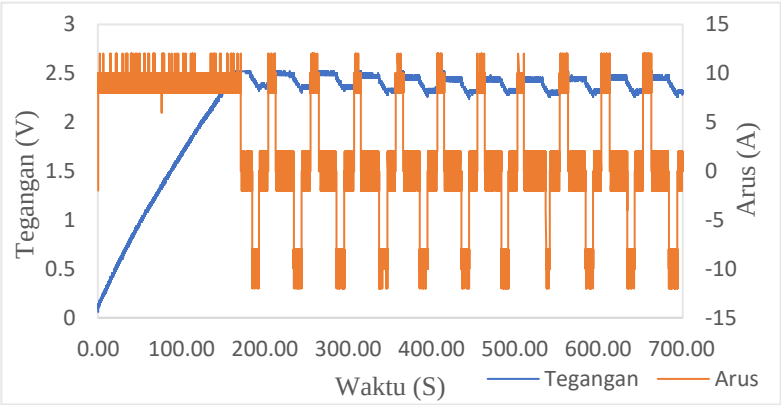
Sebelum melakukan pengujian, peralatan elektronik pendukung proses pengujian disusun seperti yang telah dijelaskan pada sub bab 3.2. Bentuk grafik tegangan *supercapacitor* selama proses pengujian telah terekam pada osiloskop dan dapat dipindahkan ke Microsoft Excel agar dapat dengan mudah dilakukan proses analisis yang berikutnya akan dimasukkan ke dalam metode *Recursive Least Square*.

4.2 *Hasil Pengujian Supercapacitor*

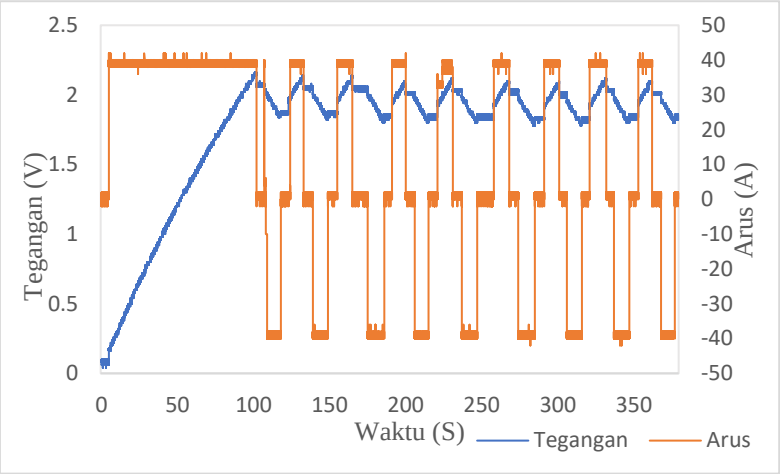
Gambar 4.1 merupakan grafik arus masukan dan tegangan terminal *supercapacitor* hasil pengujian mengguanakan metode *Hybrid Pulse Power Characterization* (HPPC) yang direkam oleh osiloskop dan ditampilkan kembali pada Microsoft Excel. Dari grafik hasil pengujian *supercapacitor* apabila dilihat sekilas dengan visual terlihat bahwa grafik hasil pengujian *supercapacitor* metode HPPC dari ketiga *supercapacitor* menunjukkan hasil yang sama. Di mana *supercapacitor* dicharge terlebih dahulu sampai tegangan *rating* setelah itu baru divariasi *charge-dischare* dengan profil HPPC.



Gambar 4.1 Grafik tegangan-arus pengujian metode HPPC *supercapacitor* 100 F



Gambar 4.2 Grafik tegangan-arus pengujian metode HPPC *supercapacitor* 650 F



Gambar 4.3 Grafik tegangan-arus pengujian metode HPPC *supercapacitor* 2000 F

4.3 *Hasil Estimasi Parameter Supercapacitor dengan Metode Recursive Least Square*

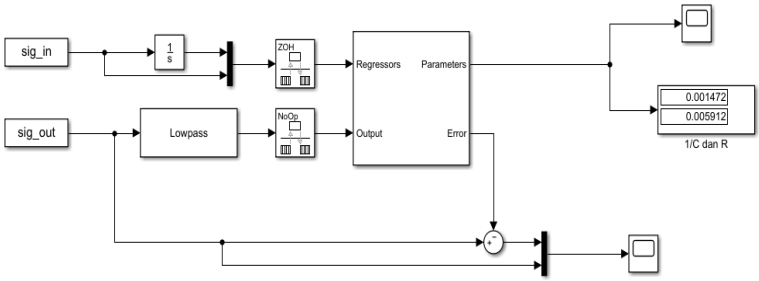
Setelah diolah menggunakan Microsoft Excel, maka diperoleh tabel arus masukan dan tegangan keluaran sistem yang berikutnya akan digunakan dalam estimasi parameter superkapsitor dengan metode *Recursive Least Square* pada Simulink. Tabel 4.1 dibawah merupakan parameter yang didapatkan dari hasil pengujian HPPC *supercapacitor*.

Tabel 4.1 Parameter pengujian metode HPPC

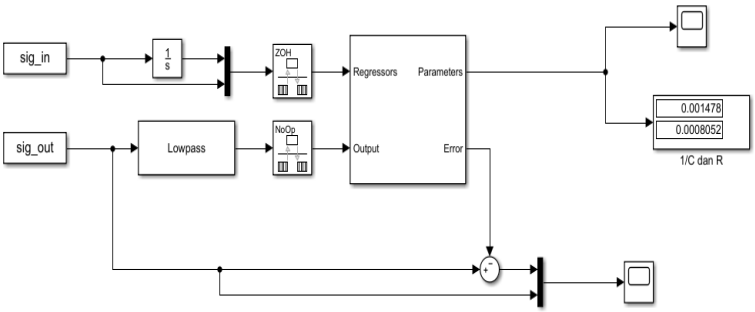
Parameter	*Supercapacitor* 100F	*Supercapacitor* 650F	*Supercapacitor* 2000F
Time Sampling	0,02 s	0,02 s	0,02 s
Total Time Step	559,98 s	701,52 s	379,96 s
Jumlah Data	28.005	35.082	34.000

Kemudian jika data arus dan tegangan sudah diolah dan diaplikasikan ke dalam sistem estimasi *Recursive Least Square* seperti ditunjukkan gambar 3.13, akan diperoleh beberapa keluaran yaitu tegangan output hasil estimasi, theta 1, dan juga theta 2.

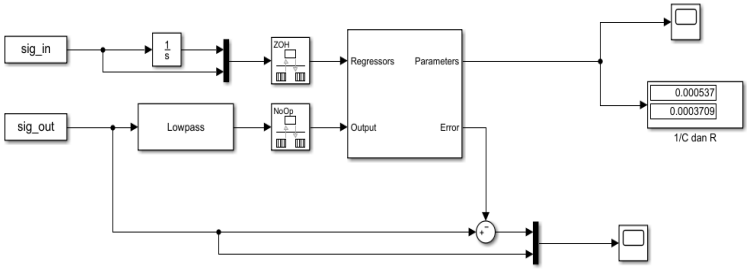
Gambar 4.2, 4.3, dan 4.4 berturut-turut menampilkan hasil estimasi parameter dari *supercapacitor* dengan rangkaian ekivalen RC sederhana.



Gambar 4.2 Hasil estimasi parameter *supercapacitor* 100F



Gambar 4.3 Hasil estimasi parameter *supercapacitor* 650F



Gambar 4.4 Hasil estimasi parameter *supercapacitor*

Dari 3 gambar di atas, didapatkan hasil estimasi dari 3 *supercapacitor* yang berbeda. Jika berdasarkan *rating supercapacitor* yang sudah disebutkan pada sub bab 3.2.1.1, *theta*/parameter hasil estimasi dapat dirangkum pada tabel berikut.

Tabel 4.1 Parameter pengujian metode HPPC

Parameter	Sc-100	Sc-650	Sc-2000
R *Rated*	15 mΩ	0,8 mΩ	0,35 mΩ
C *Rated*	100 F	650 F	2000 F
R Estimasi	5,912 mΩ	0,8052 mΩ	0,3709 mΩ
C Estimasi	679 F	676,59 F	1.859,3 F

Dari tabel 4.1 di atas, terlihat bahwa sistem estimasi menggunakan metode *Recursive Least Square* dapat mengestimasi dengan cukup baik pada *supercapacitor* 650 Farad dan 2000 Farad. Lain halnya di *supercapacitor* 100 Farad, hasil estimasi parameter *supercapacitor* terlampau cukup jauh.

Hal ini bisa jadi disebabkan karena beberapa faktor, jika dilihat dari visual hasil estimasi, dengan *rating supercapacitor* 100 Farad terlampau relatif kecil jika dibandingkan dengan dua kapasitor yang lain.

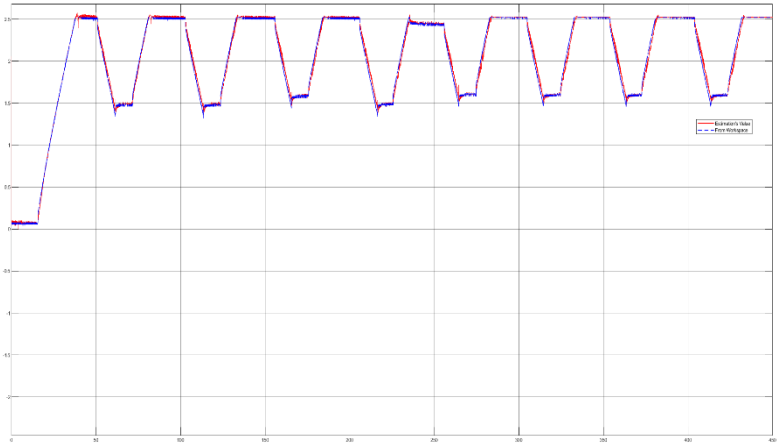
Faktor lain yang mungkin bisa mempengaruhi hasil estimasi parameter adalah dikarenakan rangkaian ekivalen yang digunakan adalah rangkaian RC sederhana di mana seperti dijelaskan [6] tingkat kompleksitas rangkaian ekivalen mempengaruhi kemampuan karakterisasi *supercapacitor*.

4.3.1 Perbandingan Hasil Pengujian dan Hasil Estimasi Tegangan

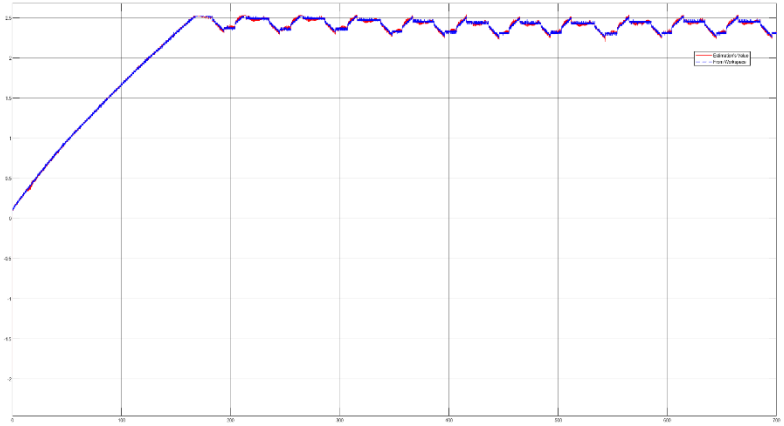
Untuk lebih mengetahui tingkat akurasi estimasi parameter pada *supercapacitor* dengan metode *Recursive Least Square*, maka selain parameter *theta* 1 dan *theta* 2, maka didapat juga grafik tegangan keluaran sistem.

Pada saat proses estimasi menggunakan *block Recursive Least Square*, terdapat *error* perhitungan estimasi yang mana merupakan salah satu keluaran dari *block Recursive Least Square*.

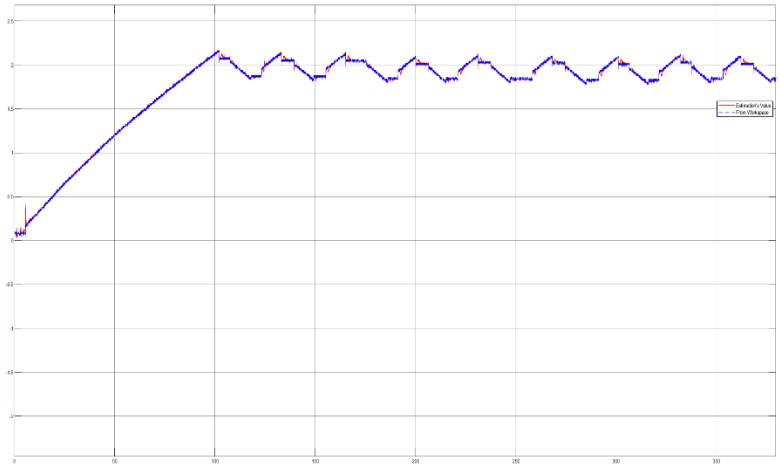
Dari nilai *error* tersebut, kemudian bisa dibandingkan antara tegangan keluaran sistem pengukuran asli dan tegangan keluaran sistem estimasi. Perbandingan grafik tegangan tersebut dapat dilihat pada gambar 4.5 hingga 4.7 berikut.



Gambar 4.5 Grafik tegangan hasil pengukuran dan estimasi *supercapacitor* 100 Farad



Gambar 4.6 Grafik tegangan hasil pengukuran dan estimasi *supercapacitor* 650 Farad



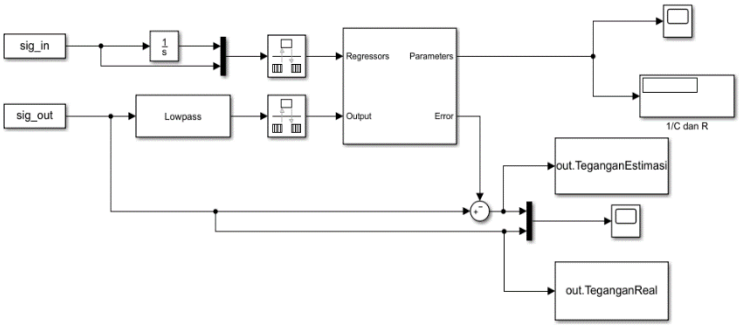
Gambar 4.7 Grafik tegangan hasil pengukuran dan estimasi *supercapacitor* 2000 Farad

Dari 3 plot grafik di atas menampilkan perbandingan tegangan pengukuran dengan tegangan hasil estimasi. Tiap plot grafik terdiri dari 2 garis grafik yang masing-masing menunjukkan hasil estimasi (warna merah) dan hasil pengukuran (warna biru). Tegangan *supercapacitor* 100 Farad, 650 Farad, dan 2000 Farad hasil estimasi dan pengujian bila diamati secara keseluruhan, hasil simulasi tegangan telah mendekati grafik tegangan *supercapacitor* yang sebenarnya. Dibuktikan dengan grafik hasil estimasi dan grafik pengukuran saling berhimpitan.

Setelah memperoleh grafik tegangan *supercapacitor* dari proses pengujian dan simulasi, maka kedua grafik tersebut akan dibandingkan untuk dianalisis tingkat *error* grafik menggunakan perhitungan *mean square error* (*MSE*).

4.3.1.1 Perbandingan Error Grafik Tegangan Estimasi dengan Grafik Pengukuran

Pada perhitungan *error* kali ini dilakukan di Matlab 2019b. Perhitungannya sendiri menggunakan data yang diambil dari Simulink dengan *block To Workspace*. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat di gambar 4.8 berikut.



Gambar 4.8 Rangkaian pengolah *error*

Terdapat dua *block To Workspace* yang masing-masing menyimpan data tegangan hasil estimasi dan tegangan pengukuran yang kemudian diolah di MatLab untuk dicari *error* nya.

Diperoleh nilai MSE masing-masing *supercapacitor* dapat dilihat di tabel berikut.

Tabel 4. 1 Tabel estimasi parameter metode HPPC

Supercapacitor	*Mean Square Error*
100 Farad	0,18%
650 Farad	0,02517%
2000 Farad	0,033942%

Dari tabel di atas dapat dilihat bahwa *error* dari estimasi parameter dengan metode HPPC terlihat bahwa *supercapacitor* 650 Farad memiliki tingkat *error* yang paling kecil dengan 0,02517%.

BAB V
KESIMPULAN

5.1 *Kesimpulan*

Dari hasil pengujian dan simulasi hasil estimasi parameter dengan metode *Recursive Least Square* menggunakan metode *hybrid pulse power characterization* (HPPC), didapatkan beberapa kesimpulan, diantaranya :

1. Parameter internal *supercapacitor* Sc-100, Sc-650, dan Sc-2000 dapat dimodelkan menjadi rangkaian ekivalen RC sederhana yang tersusun atas kapasitor (C) dan Resistor (R).
2. Penentuan rangkaian ekivalen *supercapacitor* dapat menggunakan rangkaian RC sederhana tetapi mengakibatkan kurang kompleks nya dalam memberikan karakter *supercapacitor* itu sendiri.
3. Tingkat *error* perhitungan estimasi cenderung kecil pengaruhnya terhadap estimasi parameter *supercapacitor*.
4. Kapasitansi variabel meningkatkan akurasi estimasi parameter *supercapacitor* dengan rangkaian ekivalen RC sederhana dan menggunakan metode HPPC.
5. *Online estimation* dilakukan dengan tujuan dapat mengetahui nilai parameter yang belum diketahui secara *real time* pada saat kapanpun.
6. Tingkat *error* hasil estimasi dari superkapasitor 100 F, 650 F, dan 2000 F berturut turut sebesar 0,18%, 0,02517%, dan 0,033942%.

5.2 *Saran*

Pada penelitian selanjutnya, diharapkan untuk mencoba menggunakan rangkaian ekivalen *supercapacitor* yang lebih kompleks dari rangkaian RC sederhana sehingga saat proses karakterisasi dapat menghasilkan hasil yang lebih detail. Selanjutnya alangkah lebih baik jika lebih memperhatikan rangkaian saat melakukan proses pengukuran, agar tidak terdapat noise pengukuran yang relatif besar.

DAFTAR PUSTAKA

[1] L. Zhang, Z. Wang, F. Sun, and D. G. Dorrell, "Online Parameter Identification of Ultracapacitor Models Using the Extended Kalman Filter," *Energies*, vol. 7, pp. 3204–3217, May 2004, doi: 10.3390/en7053204.

[2] P. Johansson and B. Andersson, "Comparison of Simulation Programs for Supercapacitor Modelling," *Electr. Eng.*, p. 131, 2008.

[3] A. B. Cultura and Z. M. Salameh, "Modeling, Evaluation and Simulation of a Supercapacitor Module for Energy Storage Application," in *Proceedings of the International Conference on Computer Information Systems and Industrial Applications*, Bangkok, Thailand, 2015, doi: 10.2991/cisia-15.2015.235.

[4] Marin S. Halper James C. Ellenbogen, "Supercapacitors: A Brief Overview," *Biosens. Bioelectron.*, vol. 25, no. 7, pp. 1629–1634, 2010.

[5] Sejin Noh, Jaeho Choi, Hyung-Cheol Kim, and Eun-Kyu Lee, "PSiM based electric modeling of supercapacitors for line voltage regulation of electric train system," in *2008 IEEE 2nd International Power and Energy Conference*, Johor Bahru, Malaysia, Dec. 2008, pp. 855–859, doi: 10.1109/PECON.2008.4762593.

[6] R. Faranda, "A new parameters identification procedure for simplified double layer capacitor two-branch model," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 80, no. 4, pp. 363–371, Apr. 2010, doi: 10.1016/j.epsr.2009.10.024.

[7] L. Shi and M. L. Crow, "Comparison of ultracapacitor electric circuit models," in *2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*, Pittsburgh, PA, USA, Jul. 2008, pp. 1–6, doi: 10.1109/PES.2008.4596576.

[8] N. Reichbach and A. Kuperman, "Recursive-Least-Squares-Based Real-Time Estimation of Supercapacitor Parameters," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 31, no. 2, pp. 810–812, Jun. 2016, doi: 10.1109/TEC.2016.2521324.

[9] L. Zhang, Z. Wang, F. Sun, and D. Dorrell, "Online Parameter Identification of Ultracapacitor Models Using the Extended

Kalman Filter," *Energies*, vol. 7, no. 5, pp. 3204–3217, May 2014, doi: 10.3390/en7053204.

[10] Matlab R2019b, "System Identification Toolbox", Mathworks, 2007

[11] "Datasheet K2 Ultracapacitors - 2.7V Series." Maxwell Technologies, 2014.

[12] "USER MANUAL : Multi-Range DC Power Supply PSW Series." Good Will Instrument Co., Ltd.

[13] "USER MANUAL : DC Electronic Load PEL-3000E Series." Good Will Instrument Co., Ltd.

[14] "USER MANUAL : SDS1000CFL Series Digital Storage Oscilloscope." Siglent Technologies Co., Ltd.

[15] "CC-65 AC/DC CURRENT CLAMP OPERATOR'S MANUAL." Qingdao Hantek Electronic Co., Ltd.

LAMPIRAN

Datasheet Spesifikasi Sperkapasitor 650 F BCAP0650

DATASHEET | **K2 ULTRACAPACITORS - 2.7V SERIES**

FEATURES AND BENEFITS*

- Up to 1,000,000 duty cycles or 10 year DC life
- High power density
- 650F to 3,000F capacitance range
- Threaded terminals or laser-weldable posts

TYPICAL APPLICATIONS

- Automotive subsystems
- Wind turbine pitch control
- Hybrid vehicles
- Rail
- Heavy industrial equipment
- UPS & telecom systems

PRODUCT SPECIFICATIONS

ELECTRICAL	BCAP0650	BCAP1200	BCAP1500	BCAP2000	BCAP3000
Rated Capacitance[1]	650 F	1,200 F	1,500 F	2,000 F	3,000 F
Minimum Capacitance, initial[1]	650 F	1,200 F	1,500 F	2,000 F	3,000 F
Maximum Capacitance, initial[1]	780 F	1,440 F	1,800 F	2,400 F	3,600 F
Maximum ESR_{DC}, initial[1]	0.8 mΩ	0.58 mΩ	0.47 mΩ	0.35 mΩ	0.29 mΩ
Test Current for Capacitance and ESR_{DC}[1]	65 A	75 A	100 A	100 A	100 A
Rated Voltage	2.70 V	2.70 V	2.70 V	2.70 V	2.70 V
Absolute Maximum Voltage[2]	2.85 V	2.85 V	2.85 V	2.85 V	2.85 V
Absolute Maximum Current	680 A	930 A	1150 A	1500 A	1900 A
Leakage Current at 25˚C, maximum[3]	1.5 mA	2.7 mA	3.0 mA	4.2 mA	5.2 mA
TEMPERATURE					
Operating temperature (Cell case temperature)					
Minimum	-40˚C	-40˚C	-40˚C	-40˚C	-40˚C
Maximum	65˚C	65˚C	65˚C	65˚C	65˚C
Storage temperature (Stored uncharged)					
Minimum	-40˚C	-40˚C	-40˚C	-40˚C	-40˚C
Maximum	70˚C	70˚C	70˚C	70˚C	70˚C
PHYSICAL					
Mass, typical	160 g	260 g	280 g	360 g	510 g
Terminals	Threaded or Weldable	Threaded or Weldable	Threaded or Weldable	Threaded or Weldable	Threaded or Weldable
Maximum Terminal Torque (K04)	14 Nm	14 Nm	14 Nm	14 Nm	14 Nm
Vibration Specification	ISO 16750, Table 14	ISO 16750, Table 14	ISO 16750, Table 14	ISO 16750, Table 14	ISO 16750, Table 14
Shock Specification	SAE J2464	SAE J2464	SAE J2464	SAE J2464	SAE J2464

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

Page 1 ▷ Document number: 1015370.4 ▷ maxwell.com

Maxwell TECHNOLOGIES
Enabling Energy's Future™

PSW 720W

PSW 30-72, PSW 80-27, PSW 160-14.4, PSW 250-9, 800-2.88

Model	Unit	PSW 30-72	PSW 80-27	PSW 160-14.4	PSW 250-9	PSW 800-2.88
Rated Output Voltage	V	30	80	160	250	800
Rated Output Current	A	72	27	14.4	9	2.88
Rated Output Power	W	720	720	720	720	720
Power Ratio	--	3	3	3.2	3.125	3.2
Constant Voltage Mode						
Line Regulation (*1)	mV	18	43	83	128	403
Load Regulation (*2)	mV	20	45	85	130	405
Ripple and Noise (*3)						
p-p (*4)	mV	80	80	80	100	200
r.m.s (*5)	mV	11	11	15	15	30
Temperature coefficient	ppm /°C	100ppm/°C of rated output voltage, after a 30 minute warm-up.				
Remote sense compensation voltage (single wire)	V	0.6	0.6	0.6	1	1
Rise Time (*6)						
Rated Load	ms	50	50	100	100	150
No Load	ms	50	50	100	100	150
Fall Time (*7)						
Rated Load	ms	50	50	100	150	300
No Load	ms	500	500	1000	1200	2000
Transient response time (*8)	ms	1	1	2	2	2
Constant Current Mode						
Line regulation (*1)	mA	77	32	19.4	14	7.88
Load regulation (*9)	mA	77	32	19.4	14	7.88
Ripple and noise						
r.m.s (*5)	mA	144	54	30	20	10
Temperature coefficient	ppm /°C	200ppm/°C of rated output current, after a 30 minute warm-up.				

PEL-3000E Specifications

The specifications apply when the PEL-3000E is powered on for at least 30 minutes to warm-up to a temperature of 20˚C to 30˚C, unless specified otherwise.

If operating with long cables, remote sense must be connected to the terminals.

Overall

Model	PEL-3031E		PEL-3032E	
Power	300W			
Range	Low	High	Low	High
Voltage	1-150V	1-150V	2.5-500V	2.5-500V
Current	0-6A	0-60A	0-1.5A	0-15A
Min. Operating Voltage(dc)	1V-6A	1V-60A	2.5V-1.5A	2.5V-15A

Static Mode

Model	PEL-3031E		PEL-3032E	
Range	Low	High	Low	High
Constant Current Mode				
Range	0-6A	0-60A	0-1.5A	0-15A
Setting Range	0-6.12A	0-61.2A	0-1.53A	0-15.3A
Resolution	0.2mA	2mA	0.05mA	0.5mA
Accuracy	(T*1) ± (0.1% of set + 0.1% of F.S) + Vin/500kΩ (Full scale of High range)	(T*1) ± (0.1% of set + 0.2% of F.S) + Vin/500kΩ (Full scale of High range)	(T*1) ± (0.1% of set + 0.1% of F.S) + Vin/500kΩ (Full scale of High range)	(T*1) ± (0.1% of set + 0.2% of F.S) + Vin/500kΩ (Full scale of High range)
Constant Resistance Mode				
Range	60S-0.002S(0.01666Ω-500Ω)(300W/15V)		6S-0.0002S(0.16666Ω-5kΩ)(300W/50V)	
	6S-0.0002S(0.1666Ω-5kΩ)(300W/150V)		0.6S-0.00002S(1.6666Ω-50kΩ)(300W/500V)	
Setting Range	60S-0.002S(0.01666Ω-500Ω)(300W/15V)		6S-0.0002S(0.16666Ω-5kΩ)(300W/50V)	

Appendix A: Specifications

All specification applies to 10X probe and All the SDS1000CFL Series Digital Storage Oscilloscopes.

To verify that the oscilloscope meets specifications, the oscilloscope must first meet the following conditions:

- The oscilloscope must have been operating continuously for thirty minutes within the specified operating temperature.
- You must perform the Do Self Cal operation, accessible through the Utility menu, if the operating temperature changes by more than 5° C.
- The oscilloscope must be within the factory calibration interval

All specifications are guaranteed unless noted "typical."

Specifications

Inputs	
Input Coupling	AC, DC, GND
Input Impedance	1MΩ±2% || 18Pf±3Pf, 50Ω+/-2%(SDS1304CFL/SDS1302CFL, SDS1204CFL/SDS1202CFL contain this function)
Maximum input voltage	400V （DC+AC PK-PK，1MΩ input impedance，X10），CAT I
Ch to Ch Isolation (Both channels in same V/div setting)	>100:1 at 150MHz (SDS1304CFL,SDS1302CFL) >100:1 at 100MHz (SDS1204CFL,SDS1202CFL) >100:1 at 50MHz (SDS1104CFL,SDS1102CFL) >100:1 at 35MHz (SDS1074CFL,SDS1072CFL)
Probe attenuator	1X,10X
Probe attenuator Factors Set	1X,5X,10X,50X,100X,500X,1000X

Vertical System	
Vertical Sensitivity	2mV/div -5V/div(1-2-5 order)
Channel voltage	2mV-100mV: ±800MV

offset range	102mV-5V: ±40V)
Vertical Resolution	8 bit
Channels	2
Analog Bandwidth	300MHz(SDS1304CFL, SDS1302CFL) 200MHz(SDS1204CFL, SDS1202CFL) 100MHz(SDS1104CFL, SDS1102CFL) 70MHz(SDS1074CFL, SDS1072CFL)
Single-shot Bandwidth	300MHz(SDS1304CFL, SDS1302CFL) 200MHz(SDS1204CFL, SDS1202CFL) 100MHz(SDS1104CFL, SDS1102CFL) 70MHz(SDS1074CFL, SDS1072CFL)
BW Flatness at BNC input	DC -10% of rated BW: +/- 1dB 10% - 50% of rated BW: +/- 2dB 50% - 100% of rated BW: + 2dB/-3dB
Lower frequency limit (AC -3dB)	≤10Hz(at input BNC)
Noise: Pk-Pk for 3K record	≤0.6 Div for average of 10 Pk-Pk readings, Fixed gain settings ≤0.7 Div for average of 10 Pk-Pk readings, Variable gain settings
SFDR including harmonics (measured with FFT)	>=35dB
DC Gain Accuracy	＜±3.0%: 5mv/div to 5V/div in Fixed Gain Ranges ＜±4.0%: 2mv/div Variable Gain Ranges
DC Measurement Accuracy: All Gain settings ≤ 100mv/div	± [3%* （ |reading|+|offset| ） +1% *of |offset| +0.2div+2mv]
DC Measurement Accuracy: All Gain settings ＞ 100mv/div	± [3%* （ |reading|+|offset| ） +1%* of |offset| +0.2div+100mv]
Rise time	<1.2ns (SDS1304CFL, SDS1302CFL) <1.8ns (SDS1204CFL, SDS1202CFL) <3.5ns (SDS1104CFL, SDS1102CFL) <5.0ns (SDS1074CFL, SDS1072CFL)
Overshoot, Typical (using 500ps pulse)	<10% with probe or BNC input w/ 50 Ohm feed thru
Ch to Ch Skew (both channels in same V/div setting)	<1ns: SDS1304CFL,SDS1302CFL SDS1204CFL,SDS1202CFL SDS1104CFL,SDS1102CFL <2ns: SDS1074CFL,SDS1072CFL (Equivalent to 2 minor divisions in smallest t/div)
Math operation	+, -, *, /, FFT
FFT	Window mode: Hanning, Hamming, Blackman, Rectangular

Datasheet Spesifikasi Hantek Current Clamp Meter

INTRODUCTION

When measuring the AC/DC Current with the Current Clamp, a multimeter or scope can directly measure the current up to 65 A , with a frequency up to 20KHz. In this method, there is no need to break a circuit or to affect the isolation to measure the current.

The Current Clamp is not only available for the detection or monitor of the possibly existing creepage, but for the measurement with little gap using its extended jaws. However, it is necessary to turn the zero adjustment knobs on the clamp until the multimeter or scope reads zero.

APPLICATION PROCEDURE

1. When connected with any multi-meter whose input impedance is 10k ohms minimum,insert the black banana plug into the COM jack and the red banana plug into the V-Ω jack.When connected with a scope,connect the BNC connector of the clamp to a scope BNC connector.
2. Set the power switch form “Off” to “ON” position, that is to set the multimeter range to 1mV/10mA or 1mV/100mA. Then, the green LED will be lighting, indicating that the clamp is switched on..
3. when the current is not greater than 2 ampere ,please set the current clamp range to 1mV/10mA and set the multi-meter range to 200mV AC or 200 mV DC, which depends on the type of the current.
4. Before measuring the DC current, it is needed to turn the zero adjustment knobs on the clamp until the multimeter reads zero. That means pushing down the zero adjustment knobs on the clamp until the multimeter reads zero. Then let go hold of the zero adjustment knobs.When using a scope,set DC coupled mode to measure DC current.
5. Clamp the jaws around the current-carrying conductor and operate as above.
6. When the current clamp range is set to 1mV/10mA, the actual current is ten times of the measured current whose unit is mA. For example, the measured current is 10 mV and The actual current of the current-carrying conductor is 10×10=100mA.
7. When the current clamp range is set to 1mV/100mA, the actual current is one hundred times of the measured current whose unit is mA. For example, the measured current is 5 mV and The actual current of the current-carrying conductor is 5×100=500mA.

APPLICATION NOTES

1. In the case of DC current, the output is positive when the current flows from the upside to the underside of the clamp. The red banana plug is positive.

2. In the case of DC current measurement, the current clamp can not possibly zero properly, due to the hysteresis effect. To eliminate this, open and close the jaws several times and then zero again.

APPLICATION SAFETY

1. The voltage of the conductor measured with the current clamp should be little than 300V DC or 240V rms AC,

2. We are forbidden to measure the conductor whose insulation has break down or wear down, in order to avoid doing harm to us.

SPECIFICATIONS GENERAL

Captured Conductor diameter Size: 9mm maximum

Low Battery Indicator: Red LED lighting

Operating Temperature: 0℃ to 50℃, 70% R.H.

Storage Temperature: -20℃~+70℃, 80% R.H.

Battery type: 9V DC, NEDA 1604, 6F22, 006P

Battery Life: 100 hours typical with carbon-zinc

Weight: 250 gram typical

Dimensions: 195 mm (H) x 70 mm (W) x 33 mm (D)

Output: wire with a straight banana plug or BNC connector

ELECTRICAL (At 23±5℃, 70% R.H. maximum)

Efficient Measure Range:

1mV/10mA: 10mA to 2 A, multimeter range is set to DC or rms AC 200mV

1mV/100mA: 100mA to 20 A, multimeter range is set to DC or rms AC 200mV

20A to 65 A, multimeter range is set to DC or rms AC 2V

Precision:

System Accuracy: The Precision of the current clamp add the Precision of the digital multimeter or scope.

For example, if the conductor carries 100 mA current, the current clamp range will be set

INDEKS

Akurasi, i, 5, 10, 28, 31, 38, 42
Charge-Discharge, i, iii, 24, 28
Charging, 1, 13, 19, 27
Discharging, 13, 19, 27
Electronic load, 3, 17, 19, 22, 24, 25
Error, 2, 14, 31, 38, 41, 43
ESR, 3, 10, 22, 30
Estimasi online, 7, 15
HPPC, i, iii, vii, viii, x, 3, 4, 14, 15, 21, 25, 27, 28, 30, 34, 35, 36, 38, 42, 42
Kapasitansi, i, 3, 7, 8, 9, 10, 11, 13, 21, 22, 29, 30, 44
Karakterisasi, i, v, 2, 3, 4, 10, 11, 14, 17, 22, 23, 27, 34, 38, 42
Online, i, iii, 1, 3, 5, 7, 15, 17, 42
Parameter, 1, 2, 3, 4, 5, 10, 14, 15, 16, 17, 19, 21, 22, 23, 26, 27, 28, 30, 31, 33, 35, 36, 37 38, 41, 42
Pemodelan, 2, 3, 5, 7, 9, 10, 13, 14, 17, 18, 19, 26, 28, 29
Pengujian, 2, 3, 4, 5, 10, 14, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 26, 27, 28, 33, 34, 35, 37, 38, 40, 42
Rangkaian Ekivalen, 1, 2, 3, 4, 5, 12, 13, 14, 17, 18, 26, 28, 30, 31, 32, 33, 36, 38, 42
Recursive Least Square, 2, 3, 7, 15, 16, 29, 31, 33, 35, 37, 38, 42
RC Sederhana, 3, 4, 12, 13, 14, 17, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 36, 38, 42
Resistansi, i, 3, 10, 28

BIODATA PENULIS

Hafizh Azra Pribadi dilahirkan di Jakarta, 14 Februai 1997. Penulis adalah putra dari pasangan M Rosihan Pribadi dan Lissalmi. Penulis memulai jenjang pendidikan SD Muhammadiyah Condongcatur Yogyakarta, SMPN 1 Yogyakarta, dan SMAN 1 Yogyakarta hingga lulus tahun 2015. Pada tahun yang sama penulis melanjutkan pendidikan ke jenjang perguruan tinggi dan diterima di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya di Departemen Teknik Elektro. Penulis dapat dihubungi melalui email : azra.pribadi@gmail.com