



**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - EE 184801

## KARAKTERISASI SUPERKAPASITOR DENGAN PEMODELAN RANGKAIAN R-C TIGA CABANG

Muhammad Nafis Ismail  
NRP 0711154000001

Dosen Pembimbing  
Vita Lystianingrum, ST., M.Sc., Ph. D.  
Prof. Dr. Ir. Imam Robandi, MT.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO  
Fakultas Teknologi Elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2019





**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - EE 184801

## KARAKTERISASI SUPERKAPASITOR DENGAN PEMODELAN RANGKAIAN R-C TIGA CABANG

Muhammad Nafis Ismail  
NRP 0711154000001

Dosen Pembimbing  
Vita Lystianingrum, ST., M.Sc., Ph. D.  
Prof. Dr. Ir. Imam Robandi, MT.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO  
Fakultas Teknologi Elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2019





**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

FINAL PROJECT - EE 184801

## SUPERCAPACITOR CHARACTERIZATION BY R-C THREE BRANCH CIRCUIT MODELLING

Muhammad Nafis Ismail  
NRP 0711154000001

Supervisors

Vita Lystianingrum, ST., M.Sc., Ph. D.  
Prof. Dr. Ir. Imam Robandi, MT.

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



## **PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR**

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul **“KARAKTERISASI SUPERKAPASITOR DENGAN PEMODELAN RANGKAIAN R-C TIGA CABANG”** adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

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

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

Surabaya, Juli 2019



Muhammad Nafis Ismail

0711154000001



*Halaman ini sengaja dikosongkan*



# KARAKTERISASI SUPERKAPASITOR DENGAN PEMODELAN RANGKAIAN R-C TIGA CABANG

## TUGAS AKHIR

Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan  
untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
pada  
Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga  
Departemen Teknik Elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Menyetujui :

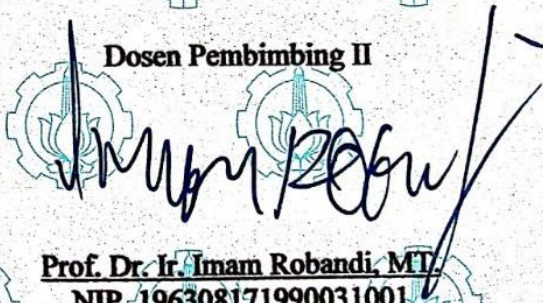
Dosen Pembimbing I



4/7/19

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

Dosen Pembimbing II



Prof. Dr. Ir. Imam Robandi, MT.  
NIP. 196308171990031001





# KARAKTERISASI SUPERKAPASITOR DENGAN PEMODELAN RANGKAIAN R-C TIGA CABANG

Nama mahasiswa : Muhammad Nafis Ismail

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

Dosen Pembimbing II : Prof. Dr. Ir. Imam Robandi, MT.

## Abstrak:

Perkembangan sistem penyimpanan energi secara masif turut berkontribusi pada pengembangan aplikasi energi baru-terbarukan secara luas. Performa unik superkapasitor yang unggul dalam hal kerapatan energi dan kemampuan *charge-discharge* secara instan membutuhkan suatu pemodelan yang akurat melalui metode karakterisasi superkapasitor. Pemodelan superkapasitor menjadi rangkaian ekivalen R-C tiga cabang memiliki keunggulan tingkat akurasi yang tinggi dan prosesnya yang lebih sederhana. Dengan metode karakterisasi *charge-discharge* menggunakan arus konstan 8 A, maka parameter internal superkapasitor Maxwell 100 F dan 650 F dapat dimodelkan menjadi komponen penyusun rangkaian R-C tiga cabang yang terdiri atas resistansi dan kapasitansi serial yang terdiri dari tiga pasang dan dirangkai secara paralel. Serta dilakukan pengujian *hybrid pulse power characterization* (HPPC) sebagai validasi tingkat akurasi rangkaian pemodelan terhadap profil arus dinamis. Maka berdasarkan dari hasil Tugas Akhir ini dapat disimpulkan bahwa rangkaian R-C tiga cabang memiliki akurasi pemodelan yang tinggi terhadap hasil pengujian superkapasitor sesungguhnya. Selain itu, rangkaian R-C tiga cabang juga memiliki akurasi yang lebih tinggi daripada rangkaian R-C sederhana sebagai rangkaian pembanding baik pada metode pengujian *charge-discharge* maupun HPPC. Sehingga rangkaian R-C tiga cabang sebagai rangkaian pemodelan superkapasitor memiliki akurasi yang lebih tinggi daripada R-C sederhana.

**Kata kunci:** *Charge-Discharge*, HPPC, Rangkaian Ekivalen, R-C Tiga Cabang, Superkapasitor

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# **SUPERCAPACITOR CHARACTERIZATION BY R-C THREE BRANCH CIRCUIT MODELLING**

Student Name : Muhammad Nafis Ismail  
First Supervisor : Vita Lystianingrum, ST., M.Sc., Ph. D.  
Second Supervisor : Prof. Dr. Ir. Imam Robandi, MT.

## **Abstract:**

The massive development of energy storage systems has contributed to the development of renewable energy applications widely. The unique performance of supercapacitors that are superior in terms of energy density and the ability of instant charge-discharge characteristic requires an accurate modeling through the supercapacitor characterization method. Supercapacitor modeling by R-C three-branch model equivalent circuit has the advantage of high accuracy and a simpler process. With the charge-discharge characterization method using a constant current of 8 A, the internal parameters of the Maxwell 100 F and 650 F supercapacitors can be modeled into a R-C three-branch circuit component that consist of three pairs serial resistance and capacitance. As well as hybrid pulse power characterization (HPPC) testing as a validation of the accuracy of the modeling circuit with dynamic current profiles. Based on the results of this Final Assignment it can be concluded that the R-C three-branch model has high modeling accuracy on the results of the actual supercapacitor testing. In addition, the R-C three-branches model also has a higher accuracy than the R-C standard model as a comparison circuit in both the charge-discharge and HPPC testing methods. So that the RC three-branch model as a series of supercapacitor modeling with higher accuracy than R-C standard model.

**Key Word:** *Charge-discharge, Equivalent Circuit, HPPC, R-C Three Branch, Supercapacitors*

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## KATA PENGANTAR

Tiada kata yang mampu menggambarkan seberapa banyak syukur yang harus penulis panjatkan kepada Allah Subhanahu Wata'ala, atas segala rahmat, karunia, dan petunjuk yang telah dilimpahkan-Nya, walaupun beragam tantangan menghadang, pada akhirnya penulis mampu menyelesaikan Tugas Akhir ini yang berjudul "**KARAKTERISASI SUPERKAPASITOR DENGAN PEMODELAN RANGKAIAN R-C TIGA CABANG**".

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

1. Allah SWT atas limpahan rahmat, karunia dan petunjuk-Nya.
2. Ibunda Lailil Mufarrihah dan Ayahanda (Alm.) H. Kadar Isman atas segala doa dan cinta yang tak henti pada penulis dalam keadaan apapun. Semoga Allah SWT senantiasa melindungi dan memberi mereka tempat terbaik kelak di surgaNya.
3. Ibu Vita Lystianingrum, ST., M.Sc., Ph. D. dan Bapak Prof. Dr. Ir. Imam Robandi, MT. selaku dosen pembimbing yang telah memberikan arahan, bimbingan dan perhatiannya selama proses penyelesaian Tugas Akhir ini.
4. Seluruh dosen dan karyawan Departemen Teknik Elektro ITS yang telah memberikan banyak ilmu dan menciptakan suasana belajar yang luar biasa.
5. Para asisten Laboratorium Instrumentasi, Pengukuran, dan Identifikasi Sistem Tenaga (LIPIST) yang menjadi teman seperjuangan dalam proses menyelesaikan Tugas Akhir, dan telah memberikan pengalaman yang berharga kepada penulis baik bidang akademik dan non akademik.
6. Tim Superkapasitor, Audie Rahmani Awali yang telah menjadi teman diskusi selama proses penyelesaian Tugas Akhir pada topik superkapasitor.
7. Muhammad Farih dan Muhammad Arie Salam yang telah menjadi teman diskusi penulis dalam topik seputar pemodelan rangkaian ekivalen superkapasitor pada Simulink.

8. Tri Adi Kresna dan Rakaditra Astungkara yang senantiasa menjadi teman penulis dalam mengerjakan Tugas Akhir di malam hari dan ketika akhir pekan.
9. Teman-teman Kontrakan Barokah yang telah memberikan motivasi baik secara langsung maupun tidak langsung.
10. Kabinet dan fungsionaris HIMATEKTRO ITS SIGAP 16/17 dan HIMATEKTRO ITS SERASI 17/18 yang telah mengajarkan makna kegigihan dan pengalaman berorganisasi dengan baik.
11. Teman-teman e55 SMANISDA yang memberikan dukungan dalam menjalani ujian Tugas Akhir.
12. Teman-teman seperjuangan e55 yang telah menemani dan menorehkan cerita selama masa kuliah sampai penyusunan Tugas Akhir ini
13. Teman-teman 16+ yang selalu memberikan dukungan dan motivasi kepada penulis sejak awal perkuliahan hingga akhir proses pengerjaan Tugas Akhir.
14. Yayasan/Lembaga pemberi beasiswa PPA (Program Percepatan Akademik) pada tahun 2018 yang telah membantu penulis dari sisi finansial sehingga dapat menunjang penulis dalam melaksanakan kegiatan akademik dengan baik.

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

Surabaya, Juli 2019

Muhammad Nafis Ismail  
0711154000001



## DAFTAR ISI

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR .....	v
KATA PENGANTAR .....	xiii
DAFTAR ISI .....	xv
DAFTAR GAMBAR .....	xvii
DAFTAR TABEL .....	xxi
BAB 1 PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Permasalahan .....	2
1.3 Tujuan .....	2
1.4 Batasan Masalah .....	2
1.5 Metodologi .....	2
1.6 Sistematika Penulisan .....	4
1.7 Relevansi .....	4
BAB 2 KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI .....	5
2.1 Kajian Pustaka .....	5
2.2 Superkapasitor .....	8
2.2.1 Struktur dan Konstruksi Superkapasitor .....	8
2.2.2 Perbandingan dengan Kapasitor Konvensional dan Baterai ..	11
2.3 Pemodelan dan Rangkaian Ekuivalen .....	12
2.4 Pengujian dan Karakterisasi .....	14
2.5 Prosedur Ekstraksi .....	14
2.6 Perhitungan Parameter Rangkaian Ekuivalen .....	18
2.6.1 Perhitungan Nilai $R_f$ .....	18
2.6.2 Perhitungan Nilai $C_f$ .....	19
2.6.3 Perhitungan Nilai $R_m$ .....	21
2.6.4 Perhitungan Nilai $C_m$ .....	22
2.6.5 Perhitungan Nilai $R_s$ .....	24
2.6.6 Perhitungan Nilai $C_s$ .....	26
BAB 3 PENGUJIAN DAN PEMODELAN SUPERKAPASITOR .....	29
3.1 Diagram Alir Pemodelan Superkapasitor .....	30
3.2 Konfigurasi Pengujian Superkapasitor .....	31
3.2.1 Rangkaian Pengujian Superkapasitor .....	31
3.2.2 Komponen Pengujian Superkapasitor .....	32
3.2.3 Skenario Metode Pengujian .....	36
3.2.4 Skenario Metode <i>Data Logging</i> .....	39
3.3 Pemodelan Rangkaian Ekuivalen R-C pada Simulink .....	42
3.3.1 Rangkaian Ekuivalen R-C Tiga Cabang .....	42

3.3.2	Rangkaian Ekuivalen R-C Sederhana.....	43
3.3.3	Simulasi Metode Pengujian .....	44
<b>BAB 4</b>	<b>HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>49</b>
4.1	Metode <i>Charge-Discharge</i> .....	49
4.1.1	Hasil Pengujian Superkapasitor.....	49
4.1.2	Perbandingan Hasil Pengujian dan Hasil Simulasi Rangkaian R-C Tiga Cabang.....	56
4.1.3	Perbandingan Hasil Pengujian dan Hasil Simulasi Rangkaian R-C Sederhana.....	58
4.1.4	Perbandingan Hasil Pengujian dan Semua Hasil Simulasi ....	60
4.2	Metode HPPC.....	64
4.2.1	Hasil Pengujian Superkapasitor.....	64
4.2.2	Perbandingan Hasil Pengujian dan Hasil Simulasi R-C Tiga Cabang .....	66
4.2.3	Perbandingan Hasil Pengujian dan Hasil Simulasi R-C Sederhana .....	69
4.2.4	Perbandingan Hasil Pengujian dan Semua Hasil Simulasi ....	72
<b>BAB 5</b>	<b>KESIMPULAN .....</b>	<b>77</b>
5.1	Kesimpulan .....	77
5.2	Saran.....	78
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>		<b>79</b>
<b>LAMPIRAN .....</b>		<b>81</b>
<b>INDEKS .....</b>		<b>93</b>
<b>BIODATA PENULIS .....</b>		<b>95</b>

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2. 1</b>	Rangkaian Ekivalen R-C Bercabang [2].....	6
<b>Gambar 2. 2</b>	Kurva Tegangan Terminal dari Superkapasitor [3] .....	7
<b>Gambar 2. 3</b>	Kurva Tegangan Terminal Superkapasitor [4].....	8
<b>Gambar 2. 4</b>	Struktur Dasar Superkapasitor [4] .....	9
<b>Gambar 2. 5</b>	Kondisi Muatan Ketika Superkapasitor <i>Charging</i> [5] ....	10
<b>Gambar 2. 6</b>	Kondisi Muatan Ketika Superkapasitor <i>Discharging</i> [5] 10	
<b>Gambar 2. 7</b>	Perbandingan Struktur dari Baterai, Kapasitor, dan Superkapasitor [6].....	12
<b>Gambar 2. 8</b>	Rangkaian Ekivalen R-C Sederhana atau R-C Serial [7] 13	
<b>Gambar 2. 9</b>	Rangkaian Ekivalen R-C Tiga Cabang [4] .....	13
<b>Gambar 2. 10</b>	Rangkaian Ekivalen Ketika ( $t=0^+$ ) [4] .....	15
<b>Gambar 2. 11</b>	Pengisian Muatan pada <i>fast branch</i> [4].....	15
<b>Gambar 2. 12</b>	Pengisian Muatan pada <i>Medium Branch</i> , $t = t^+_{off}$ [4]....	16
<b>Gambar 2. 13</b>	Pengisian Muatan pada <i>Medium Branch</i> , $t > t^+_{off}$ [4] ...	17
<b>Gambar 2. 14</b>	Letak $\Delta V_t$ dan $\Delta V_{t'}$ pada Grafik Tegangan Superkapasitor [4].....	19
<b>Gambar 2. 15</b>	Letak $\Delta I$ pada Grafik Tegangan Superkapasitor [4] .....	20
<b>Gambar 2. 16</b>	Letak $\Delta Q_1$ pada Grafik Tegangan Superkapasitor [4]... 21	
<b>Gambar 2. 17</b>	Letak $t_4$ , $V_4$ , $t_{x1}$ , $V_{x1}$ , $t_5$ , dan $V_5$ pada Grafik Tegangan Superkapasitor [4].....	22
<b>Gambar 2. 18</b>	Letak $t_a$ , $V_a$ , $t_6$ , dan $V_6$ pada Grafik Tegangan Superkapasitor [4].....	24
<b>Gambar 2. 19</b>	Pengisian Muatan pada <i>Slow Branch</i> [4] .....	25
<b>Gambar 2. 20</b>	Letak $t_7$ , $V_7$ , $t_{x2}$ , $V_{x2}$ , $t_8$ , dan $V_8$ pada Grafik Tegangan Superkapasitor [4].....	26
<b>Gambar 2. 21</b>	Pengisian Muatan pada $C_s$ [4] .....	27
<b>Gambar 2. 22</b>	Letak $t_b$ , $V_b$ , $t_9$ , dan $V_9$ pada Grafik Tegangan Superkapasitor [4].....	28
<b>Gambar 3. 1</b>	Diagram Alir Pemodelan Superkapasitor .....	30
<b>Gambar 3. 2</b>	Diagram Pengujian Superkapasitor.....	31
<b>Gambar 3. 3</b>	Rangkaian pengujian superkapasitor .....	32
<b>Gambar 3. 4</b>	Tampilan menu ' <i>Pattern Edit</i> ' pada LinkView .....	35
<b>Gambar 3. 5</b>	Tampilan menu ' <i>Device</i> ' pada LinkView.....	36
<b>Gambar 3. 6</b>	Grafik Arus Metode <i>Charge-Discharge</i> .....	37

<b>Gambar 3. 7</b>	Grafik Arus Metode HPPC [15] .....	38
<b>Gambar 3. 8</b>	Rangkaian R-C Tiga Cabang Metode <i>Charge-Discharge</i> .....	42
<b>Gambar 3. 9</b>	Rangkaian R-C Tiga Cabang Metode HPPC.....	43
<b>Gambar 3. 10</b>	Rangkaian R-C Sederhana Metode <i>Charge-Discharge</i> .....	43
<b>Gambar 3. 11</b>	Rangkaian R-C Sederhana Metode HPPC.....	44
<b>Gambar 3. 12</b>	Simulasi Grafik Arus Metode <i>Charge-Discharge</i> .....	46
<b>Gambar 3. 13</b>	Simulasi Grafik Arus Metode HPPC.....	47
<b>Gambar 4. 1</b>	Tegangan dan Arus Superkapasitor 100 F Hasil Pengujian Metode <i>Charge-Discharge</i> .....	50
<b>Gambar 4. 2</b>	Tegangan dan Arus Superkapasitor 650 F Hasil Pengujian Metode <i>Charge-Discharge</i> .....	50
<b>Gambar 4. 3</b>	Perbandingan Tegangan Superkapasitor 100 F Hasil Pengujian dan Simulasi pada Rangkaian R-C Tiga Cabang Metode <i>Charge-Discharge</i> .....	57
<b>Gambar 4. 4</b>	Perbandingan Tegangan Superkapasitor 650 F Hasil Pengujian dan Simulasi pada Rangkaian R-C Tiga Cabang Metode <i>Charge-Discharge</i> .....	57
<b>Gambar 4. 5</b>	Perbandingan Tegangan Superkapasitor 100 F Hasil Pengujian dan Simulasi pada Rangkaian R-C Sederhana Metode <i>Charge-Discharge</i> .....	59
<b>Gambar 4. 6</b>	Perbandingan Tegangan Superkapasitor 650 F Hasil Pengujian dan Simulasi pada Rangkaian R-C Sederhana Metode <i>Charge-Discharge</i> .....	59
<b>Gambar 4. 7</b>	Perbandingan Tegangan Superkapasitor 100 F Metode <i>Charge-Dishcharge</i> .....	61
<b>Gambar 4. 8</b>	Perbandingan Tegangan Superkapasitor 650 F Metode <i>Charge-Discharge</i> .....	61
<b>Gambar 4. 9</b>	Tegangan Superkapasitor 100 F Hasil Pengujian Metode HPPC.....	65
<b>Gambar 4. 10</b>	Tegangan Superkapasitor 650 F Hasil Pengujian Metode HPPC .....	65
<b>Gambar 4. 11</b>	Perbandingan Tegangan Superkapasitor 100 F Hasil Pengujian dan Simulasi pada Rangkaian R-C Tiga Cabang Metode HPPC.....	67

<b>Gambar 4. 12</b>	Perbandingan Tegangan Superkapasitor 650 F Hasil Pengujian dan Simulasi pada Rangkaian R-C Tiga Cabang Metode HPPC .....	67
<b>Gambar 4. 13</b>	Perbandingan Tegangan Superkapasitor 100 F Hasil Pengujian dan Simulasi pada Rangkaian R-C Sederhana Metode HPPC.....	70
<b>Gambar 4. 14</b>	Perbandingan Tegangan Superkapasitor 650 F Hasil Pengujian dan Simulasi pada Rangkaian R-C Sederhana Metode HPPC.....	70
<b>Gambar 4. 15</b>	Perbandingan Tegangan Superkapasitor 100 F Metode HPPC .....	73
<b>Gambar 4. 16</b>	Perbandingan Tegangan Superkapasitor 650 F Metode HPPC .....	73

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 3. 1</b> Spesifikasi Superkapasitor [8], [9] .....	33
<b>Tabel 3. 2</b> Urutan Pengujian Superkapasitor Metode <i>Charge-Discharge</i> .....	38
<b>Tabel 3. 3</b> Urutan Pengujian Superkapasitor Metode HPPC .....	39
<b>Tabel 3. 4</b> Pengaturan Osiloskop Pengujian Superkapasitor .....	39
<b>Tabel 3. 5</b> Variabel yang Diperoleh dari Grafik Pengujian Superkapasitor .....	40
<b>Tabel 3. 6</b> Masukan Simulasi Pengujian Metode <i>Charge-Discharge</i> ...	45
<b>Tabel 3. 7</b> Masukan Simulasi Pengujian Metode HPPC .....	47
<b>Tabel 4. 1</b> Variabel Hasil Ekstraksi Grafik Tegangan Superkapasitor .	51
<b>Tabel 4. 2</b> Parameter Superkapasitor pada Rangkaian R-C Tiga Cabang dengan Waktu <i>sleep</i> 30 menit.....	54
<b>Tabel 4. 3</b> Parameter Superkapasitor pada Rangkaian R-C Tiga Cabang dengan Waktu <i>sleep</i> 15 menit.....	55
<b>Tabel 4. 4</b> Parameter Superkapasitor pada Rangkaian R-C Tiga Cabang dengan Waktu <i>sleep</i> 60 menit.....	55
<b>Tabel 4. 5</b> Rangkuman Nilai RMSE pada metode <i>charge-discharge</i> ...	62
<b>Tabel 4. 6</b> Efisiensi Energi saat Fase <i>Charging-Discharging</i> Berlangsung pada Metode <i>Charge-Discharge</i> .....	63
<b>Tabel 4. 7</b> Besaran Efisiensi Energi Superkapasitor 100 F pada Rangkaian R-C Tiga Cabang .....	68
<b>Tabel 4. 8</b> Besaran Efisiensi Energi Superkapasitor 650 F pada Rangkaian R-C Tiga Cabang .....	69
<b>Tabel 4. 9</b> Besaran Efisiensi Energi Superkapasitor 100 F pada Rangkaian R-C Sederhana .....	71
<b>Tabel 4. 10</b> Besaran Efisiensi Energi Superkapasitor 650 F pada Rangkaian R-C Sederhana.....	72
<b>Tabel 4. 11</b> Rangkuman Nilai RMSE pada metode HPPC.....	74
<b>Tabel 4. 12</b> Besaran Efisiensi Energi Total dari Energi Lima Siklus Pertama pada Rangkaian Ekuivalen Terhadap Pengujian HPPC.....	75

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Seiring dengan berkembangnya teknologi, sistem penyimpanan energi pada saat ini tidak hanya menggunakan baterai. terdapat opsi untuk menggunakan komponen elektronik yang lain sebagai sistem penyimpanan energi. Salah satunya yaitu superkapasitor. Superkapasitor adalah sebuah alternatif media penyimpanan energi yang dapat digunakan. Superkapasitor dinilai memiliki keunggulan dibanding media penyimpanan energi lainnya, seperti dari segi siklus pemakaian yang tinggi, kerapatan daya yang besar, dan efisiensi yang tinggi daripada baterai. Selain itu superkapasitor juga telah diaplikasikan pada berbagai bidang seperti sistem penyimpanan energi pada *smart grid*, kendaraan listrik (*Electric Vehicle*), peralatan biomedika, *voltage regulation and control* pada turbin angin, dan pengaman berupa *Uninterruptible Power Supply (UPS)* yang digunakan pada jaringan telekomunikasi [1].

Pemanfaatan dan pengaplikasian superkapasitor menjadi tepat guna dan efisien apabila sesuai dengan karakteristik pada sistem yang akan diimplementasikan. Sehingga dibutuhkan sebuah pemodelan pada rangkaian ekivalen agar dapat mencapai kondisi tersebut. Pemodelan pada rangkaian ekivalen bertujuan untuk mengetahui karakter dari superkapasitor. Pemodelan superkapasitor pada rangkaian ekivalen hanya dengan sebuah kapasitor sederhana tidak dapat merepresentasikan karakter dari superkapasitor. Oleh karena itu studi mengenai penambahan komponen-komponen elektronika yang lain pada rangkaian ekivalen sangat dibutuhkan agar fenomena-fenomena yang terjadi pada superkapasitor dapat diamati dan dianalisis. Pada Tugas Akhir ini mengusulkan rangkaian ekivalen superkapasitor dengan model R-C tiga cabang. Rangkaian ini terdiri dari resistansi dan kapasitansi serial yang diparalel sebanyak tiga cabang. Kemudian akan dibandingkan performanya dengan hasil pengujian secara langsung pada superkapasitor. Di samping itu juga dilakukan simulasi pada rangkaian R-C sederhana yang telah sering digunakan juga sebagai tolok ukur perbandingan.

## 1.2 Permasalahan

Perumusan masalah dari Tugas Akhir ini adalah :

1. Bagaimana tingkat akurasi dari model rangkaian ekuivalen R-C tiga cabang dalam merepresentasikan karakteristik superkapasitor yang diuji.
2. Bagaimana cara menentukan nilai komponen pada pemodelan rangkaian ekuivalen R-C tiga cabang.

## 1.3 Tujuan

Tugas Akhir ini bertujuan untuk :

1. Mengetahui tingkat akurasi dari model rangkaian ekuivalen R-C tiga cabang dalam merepresentasikan karakteristik superkapasitor yang diuji.
2. Mengetahui cara menentukan nilai komponen dan mengetahui besar nilai komponen pada pemodelan rangkaian ekuivalen R-C tiga cabang.

## 1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam Tugas Akhir ini adalah :

1. Pemodelan dan simulasi menggunakan MATLAB/Simulink R2018a
2. Blok-blok yang digunakan adalah blok *generic* pada MATLAB/Simulink R2018a
3. Tidak mempertimbangkan pengaruh dari suhu di tempat pengujian
4. Tidak mempertimbangkan *error* yang dimiliki oleh masing-masing peralatan dalam proses pengujian

## 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 superkapasitor yang meliputi konstruksi, bahan, cara pemodelan menggunakan rangkaian ekuivalen, metode karakterisasi, 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 superkapasitor Maxwell dengan kapasitas 100 F dan 650 F. Data yang diambil berupa data kapasitansi dan ekivalen serial resistansi (ESR) dari superkapasitor 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 superkapasitor dengan menggunakan metode *charge-discharge* dan metode arus dinamis *High Pulse Power Characterization* (HPPC). Grafik hasil pengujian pada metode *charge-discharge* akan diekstraksi untuk mendapatkan nilai parameter dari rangkaian ekivalen.

## 3. Simulasi

Pada tahap ini, nilai parameter yang diperoleh dari proses ekstraksi hasil pengujian superkapasitor dimasukkan ke dalam rangkaian ekivalen pada Simulink. Simulasi ini bertujuan untuk mengetahui kemampuan dari rangkaian ekivalen untuk dapat merepresentasikan karakteristik dari superkapasitor berdasarkan grafik perubahan tegangan terminal superkapasitor ketika proses pengujian menggunakan metode *charge-discharge* dan metode HPPC.

## 4. Analisis Hasil Pengujian dan Hasil Simulasi

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

5. 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 masalah, tujuan, metodologi, sistematika penulisan, dan relevansi
2. BAB 2 berisikan kajian pustaka dan dasar teori yang membahas mengenai teori-teori penunjang yang berkaitan dengan superkapasitor, karakteristik dari superkapasitor, dan rangkaian ekuivalen dari superkapasitor.
3. BAB 3 berisikan perancangan untuk pengujian superkapasitor dan simulasi pengujian superkapasitor menggunakan rangkaian ekuivalen.
4. BAB 4 berisikan hasil pengujian, hasil simulasi, dan analisis data, yang membahas tentang perbandingan antara hasil pengujian superkapasitor dengan hasil simulasi superkapasitor.
5. BAB 5 berisikan kesimpulan dan saran.

## **1.7 Relevansi**

Tugas Akhir ini diharapkan mampu memberikan manfaat terhadap karakterisasi superkapasitor, terlebih proses ekstraksi dari hasil pengujian untuk penentuan nilai parameter dari rangkaian R-C tiga cabang. Diharapkan Tugas Akhir ini mampu memberikan pertimbangan dalam proses perancangan suatu sistem yang membutuhkan karakter internal superkapasitor dalam implementasi perancangan awal.

## **BAB 2**

### **KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI**

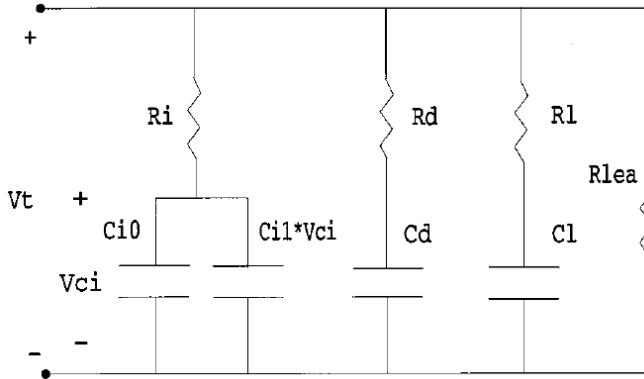
Dalam bab ini akan dijelaskan mengenai penelitian-penelitian tentang pemodelan dan karakterisasi dari superkapasitor yang telah dilakukan sebelumnya beserta teori-teori dasar tentang superkapasitor, rangkaian ekuivalen dari superkapasitor, metode karakterisasi, dan metode pengujian superkapasitor. Kajian mengenai penelitian terkait akan disajikan secara ringkas pada sub-bab 2.1, sedangkan dasar teori yang berkaitan dengan Tugas Akhir ini akan diberikan di sub-bab 2.2 sampai 2.6.

#### **2.1 Kajian Pustaka**

Dalam sub-bab ini akan dibahas mengenai kajian pustaka atau penelitian terkait yang memuat tentang pemodelan dan karakterisasi superkapasitor menggunakan rangkaian ekuivalen.

Berdasarkan penelitian [2], pemodelan dan karakterisasi superkapasitor bertujuan untuk mengetahui dan mempelajari perilaku dan bentuk tegangan pada terminal serta nilai parameter dari superkapasitor. Pada paper ini dijelaskan juga mengenai proses normalisasi yang memiliki tujuan untuk dapat merepresentasikan fenomena *charge redistribution*. Superkapasitor yang digunakan ialah yang memiliki kapasitas sebesar 470 F dan 1500 F. Bentuk rangkaian ekuivalen yang digunakan adalah rangkaian R-C bercabang yang kemudian biasa disebut rangkaian model Zubita-Bonert. Gambar 2.1 Menunjukkan rangkaian R-C bercabang yang biasa juga disebut Rangkaian R-C Zubieta-Bonert.

Metode pengujiannya adalah dengan melakukan *charge test* dan *discharge test* dengan arus sebesar 30 A. Di samping itu nilai resistansi dari rangkaian dan nilai resistansi dari sumber akan berpengaruh selama proses pengujian karena menyulitkan proses pengendalian tegangan superkapasitor dan ketika proses *charge* dan *discharge*. Oleh karena itu penulis membuat sebuah konverter *PWM* yang dilengkapi dengan *switching frequency* 4KHz yang mampu membangkitkan arus sebesar +/- 45 A dan dilengkapi dengan sebuah *PC* untuk *programming* dan *data processing*.



**Gambar 2. 1** Rangkaian Ekuivalen R-C Bercabang [2]

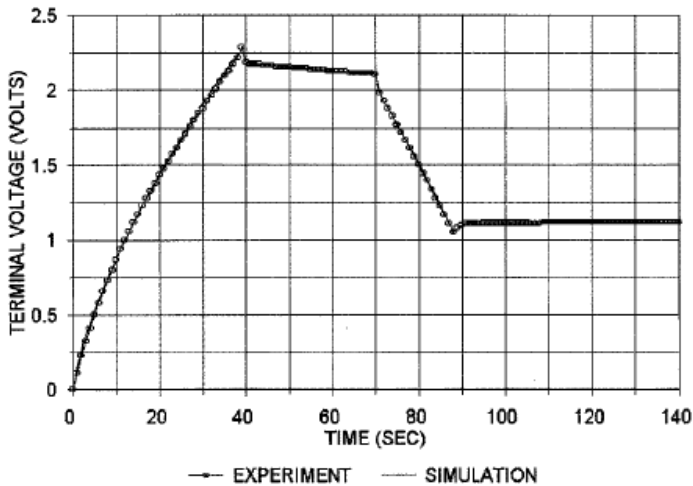
Konklusi dari paper ini adalah dibutuhkan sumber yang dapat membangkitkan *constant current* dan proses normalisasi untuk mendapatkan hasil pengukuran tegangan terminal dan parameter superkapasitor secara tepat dan konsisten. Berikut merupakan nilai parameter yang diperoleh dari superkapasitor yang ditunjukkan pada Tabel 2.1.

**Tabel 2. 1** Nilai Parameter Superkapasitor yang Diperoleh [1], [2]

Parameter	470 F DLC	1500 F DLC
Ri	2,5 mΩ	1,5 mΩ
Ci0	270 F	900 F
Ci1	190 F/V	600F/V
Rd	0,9 Ω	0,4 Ω
Cd	100 F	200 F
Rl	5,2 Ω	3,2 Ω
Cl	220 F	330 F
Rlea	9 kΩ	4 kΩ

Kemudian berdasarkan penelitian [3], pemodelan dan karakterisasi superkapasitor memiliki tujuan untuk mengidentifikasi parameter rangkaian serta perilaku terminal dari superkapasitor. Superkapasitor yang digunakan adalah yang memiliki kapasitas 470 F dan 1500 F.

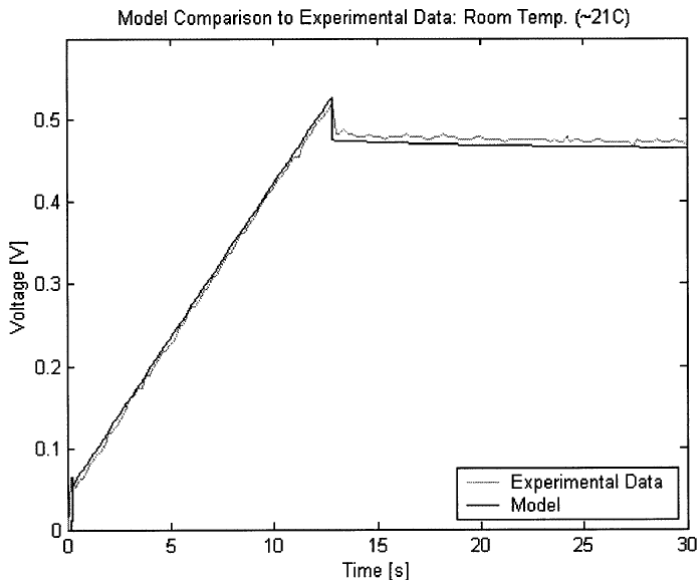
Metode yang digunakan adalah *charging* dan *discharging test* dengan besar arus 5% dari  $I_{sc}$ . Nilai  $I_{sc}$  diperoleh dari tegangan nominal dari superkapasitor yang dibagi dengan *inner resistance* yang sudah ditentukan manufaktur. Sehingga diperoleh parameter dari superkapasitor yang sama dengan tabel 2.1. Kemudian penulis membandingkan grafik hasil pengujian dan hasil simulasi menggunakan rangkaian ekivalen bercabang seperti pada gambar 2.1. Bentuk grafik tegangan terminal dari superkapasitor hasil pengujian dan simulasi ditunjukkan oleh gambar 2.2



**Gambar 2. 2** Kurva Tegangan Terminal dari Superkapasitor [3]

Berdasarkan penelitian [4], penulis melakukan pengujian terhadap superkapasitor dengan berbagai kondisi suhu. Seperti pada suhu ruangan (sekitar 25°C), suhu rendah (dibawah 21°C), dan pada suhu tinggi (sekitar 50°C). Metode yang digunakan yaitu *charge/discharge* dan *charge/hold/discharge* menggunakan nilai arus tetap atau konstan. Superkapasitor yang digunakan ialah sebesar 2500 F dengan nilai arus *charging* dan *discharging* sebesar 100 A. Kemudian juga dilakukan ekstraksi pada grafik hasil pengujian untuk dimodelkan pada rangkaian ekivalen R-C tiga cabang dengan menggunakan Matlab/Simulink.

Gambar 2.3 menunjukkan bentuk grafik ketika pengujian dan simulasi pada rangkaian ekivalen R-C tiga cabang.



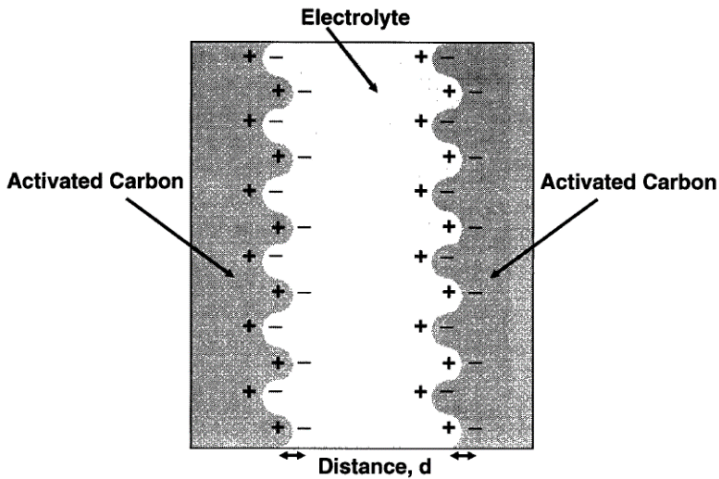
**Gambar 2.3** Kurva Tegangan Terminal Superkapasitor [4]

## 2.2 Superkapasitor

### 2.2.1 Struktur dan Konstruksi Superkapasitor

Banyak jenis komponen elektronik yang berfungsi untuk menyimpan energi dan muatan listrik. Salah satunya adalah superkapasitor. Superkapasitor juga disebut *electric double layers capacitor* (EDLC) karena terdiri dari dua elektroda dipisahkan oleh sebuah separator yang terendam pada elektrolit. Gambar 2.4 menunjukkan struktur dasar dari superkapasitor yang elektrodanya terbuat dari bahan karbon aktif.





**Gambar 2. 4** Struktur Dasar Superkapasitor [4]

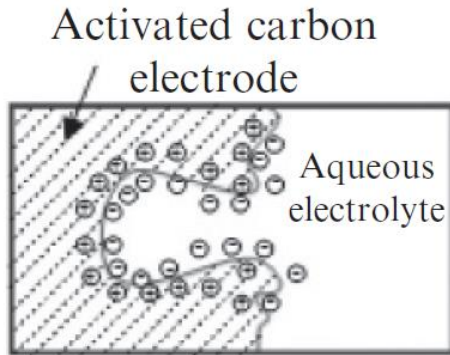
Besar nilai kapasitansi dari superkapasitor ditunjukkan pada persamaan (2.1). Jarak, ( $d$ ) (bernilai 0,01 mikro untuk sebuah elektrolitik kapasitor) ditentukan oleh ketebalan dari dielektrik yang digunakan. Kapasitansi yang disimpan pada superkapasitor sepenuhnya karena proses penyimpanan muatan elektrostatik [4].

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

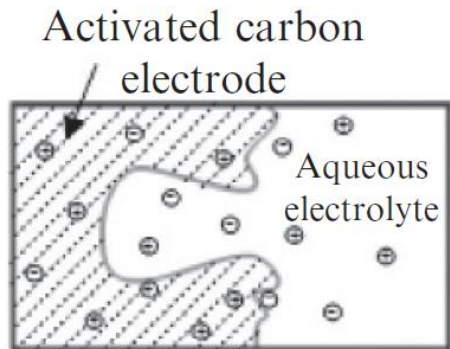
Keterangan:

- C = Nilai kapasitansi
- $\epsilon_r$  = Konstanta relatif dari bahan dielektrik
- $\epsilon_0$  = Permittivitas dari *vacuum (free space)*
- A = Luas permukaan dari bahan dielektrik
- d = Jarak antara positron dengan elektron

Ilustrasi proses *charge* dan *discharge* pada superkapasitor terdapat pada gambar 2.5 dan 2.6. Ketika sumber/catu daya aktif, maka semua muatan akan menempel pada seluruh permukaan dari elektroda. Sedangkan ketika sumber/catu daya dimatikan maka muatan akan terlepas atau terurai dari permukaan elektroda



**Gambar 2. 5** Kondisi Muatan Ketika Superkapasitor *Charging* [5]



**Gambar 2. 6** Kondisi Muatan Ketika Superkapasitor *Discharging* [5]

Disamping itu, berdasarkan penelitian [5] bahan penyusun dari elektroda juga dapat menentukan besarnya nilai kapasitansi dari superkapasitor yang beberapa diantaranya dapat dilihat dari luas permukaan dan jumlah rongga atau pori-pori yang terdapat pada bahan penyusun tersebut. Terdapat tiga jenis bahan penyusun yang umum digunakan yaitu karbon, oksida logam (*metal oxide*), dan *conducting polymer*.

Karbon aktif adalah bahan yang paling sering digunakan dalam pembuatan kapasitor karena mudah diproduksi dalam jumlah banyak, relatif lebih murah, dan memiliki stabilitas siklus yang baik. Awalnya karbon aktif terbuat dari kokas minyak bumi dan batubara. Namun seiring

dengan banyaknya permintaan dan kesadaran akan dampak bahan bakar fosil pada lingkungan saat ini karbon aktif terbuat dari kayu, batok kelapa, sukrosa, selulosa, biji jagung, dan bubuk kopi [5].

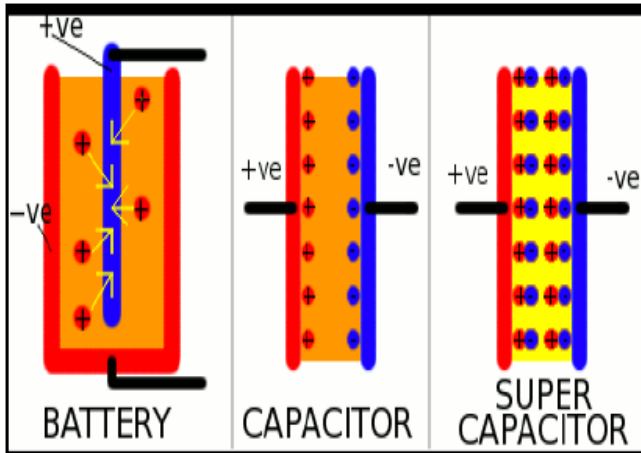
Berdasarkan penelitian [5], Elektrolit yang digunakan pada penyusunan superkapasitor juga memiliki banyak jenis yaitu elektrolit organik, elektrolit berair (*aqueous electrolyte*), dan cairan ionik (*ionic liquid*). Elektrolit organik biasanya stabil pada level tegangan 2,2-2,9 V, elektrolit berair (*aqueous electrolyte*) pada 0,6-1,0 V, dan cairan ionik (*ionic liquid*) pada 2,6-4,0 V.

Superkapasitor memiliki beberapa kelebihan lain yaitu waktu pengisian yang lebih singkat, lebih andal dalam berbagai level suhu, tidak membutuhkan perawatan, memiliki kerapatan daya yang lebih besar daripada baterai dan menerapkan prinsip *green energy* [6]. Superkapasitor juga dikenal dengan istilah ultrakapasitor.

### **2.2.2 Perbandingan dengan Kapasitor Konvensional dan Baterai**

Terdapat perbedaan struktur komponen antara kapasitor konvensional, superkapasitor, dan juga baterai. Pada gambar 2.7 menunjukkan bahwa pada kapasitor konvensional, muatan positif dibentuk di salah satu lempeng elektroda dan muatan negatif pada lempeng yang lain dengan komponen dielektrik yang berada diantara keduanya agar kedua muatan tetap terpisah sehingga masing-masing muatan cenderung diam [6].

Kemudian apabila pada superkapasitor, lempeng yang bermuatan mempolarisasi elektrolit sehingga membuat ion positif dan ion negatif bergerak dan mengakibatkan terbentuknya pasangan muatan yang baru pada masing-masing lempeng. Hal ini yang membuat superkapasitor juga disebut *electrochemical double layer capacitor* yang memungkinkan menyimpan lebih banyak muatan [6]. Berbeda halnya dengan baterai, muatan positif dan negatif dalam superkapasitor diproduksi sepenuhnya oleh listrik statis. Tidak ada reaksi kimia yang terlibat. Baterai menyimpan listrik menggunakan reaksi kimia yang terjadi antara elektrolit [6].

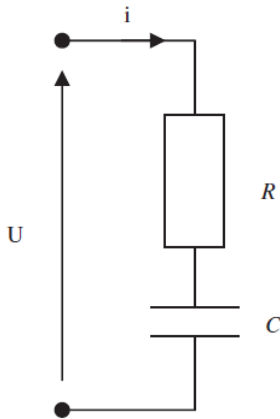


**Gambar 2. 7** Perbandingan Struktur dari Baterai, Kapasitor, dan Superkapasitor [6]

### 2.3 Pemodelan dan Rangkaian Ekuivalen

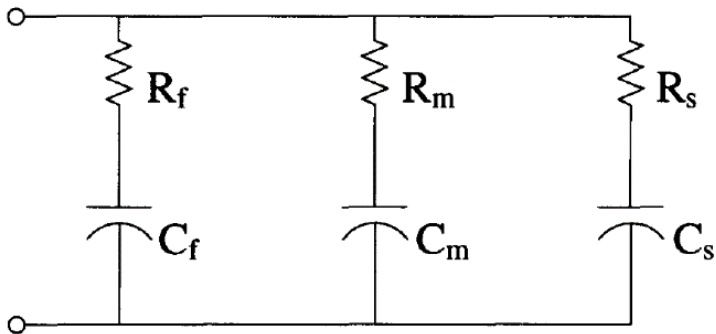
Untuk dapat mempelajari lebih dalam mengenai perilaku dan karakter dari superkapasitor, maka diperlukan pemodelan berupa penggunaan berbagai rangkaian ekuivalen. Tujuan pertama dari karakterisasi adalah untuk membandingkan hasil eksperimen dengan *datasheet* dari manufaktur superkapasitor dan untuk membandingkan kemampuan superkapasitor dari beberapa manufaktur pada keadaan dan kondisi eksperimen yang sama [7]. Tujuan lainnya adalah untuk mendeskripsikan dan memahami secara tepat perilaku dari superkapasitor pada kondisi lingkungan yang berbeda (tegangan, suhu, dan frekuensi) [7].

Berdasarkan aplikasinya, superkapasitor dapat dimodelkan pada beberapa rangkaian ekuivalen dengan berbagai tingkat kompleksitas. Yang paling sederhana adalah terdiri dari satu buah kapasitor dan satu buah resistor yang biasa disebut ESR (*Equivalent Series Resistance*). Akan tetapi pada model ini belum bisa menunjukkan karakteristik dan sifat yang dimiliki oleh superkapasitor dengan baik, beberapa fenomena diantaranya adalah arus bocor dan redistribusi muatan (*charge redistribution*). Gambar 2.8 menunjukkan rangkaian seri kapasitor dan resistor.



**Gambar 2. 8** Rangkaian Ekivalen R-C Sederhana atau R-C Serial [7]

Perkembangan dari model rangkaian ekivalen superkapasitor sangat penting untuk pemanfaatan karakteristik yang dimiliki oleh superkapasitor. Model rangkaian ekivalen memiliki banyak jenis bergantung pada kompleksitas karakteristik dari superkapasitor yang ingin direpresentasikan. Penggunaan superkapasitor sebagai perangkat penyimpanan energi tambahan untuk sistem kelistrikan mobil yang canggih untuk dapat memenuhi beberapa profil sistem salah satunya seperti *charging/discharging* yang cepat (*short-term storage*)[4]. Gambar 2.9 menunjukkan bentuk model rangkaian “*short-term*” dari superkapasitor secara umum.



**Gambar 2. 9** Rangkaian Ekivalen R-C Tiga Cabang [4]

Rangkaian “*Short-term*” di atas juga biasa disebut dengan Rangkaian R-C tiga cabang. Rangkaian R-C tiga cabang adalah sebuah rangkaian elektronika yang terdiri atas tiga cabang komponen R-C. Prosedur ekstraksi dari proses pengujian untuk mendapatkan nilai parameter dari rangkaian ekivalen tersebut memiliki beberapa kesamaan dengan metode yang diusulkan oleh Zubieta pada penelitiannya [4].

## 2.4 Pengujian dan Karakterisasi

Metodologi karakterisasi yang diterapkan pada superkapasitor tidak terstandarisasi dan cukup sulit untuk membandingkan hasil uji laboratorium dengan yang data yang berasal dari manufaktur/pabrik. Saat ini tidak banyak standar internasional, kecuali satu set standar IEC (IEC40/1378/DIN IEC 62391-1, 2004; IEC-40/1379/DIN IEC 62391-2, 2004). Sebagian besar parameter superkapasitor terikat pada suhu sekitar, nilai arus, frekuensi, dan tegangan. Oleh karena itu, diperlukan hasil eksperimen yang andal dan presisi. Bagian ini menjelaskan teknik yang digunakan untuk memperkirakan parameter superkapasitor. Beberapa metode sebagian besar digunakan oleh ahli elektrokimia di laboratorium penelitian, sementara beberapa metode yang lain digunakan di lingkungan industri.

Metode *charge-discharge* merupakan metode yang umum digunakan untuk pengukuran kapasitansi dan ESR dan akan digunakan pada Tugas Akhir ini. Pada metode ini, sebuah superkapasitor dilakukan *charge* dan *discharge* menggunakan nilai arus yang tetap (konstan), dan sebuah beban statis digunakan pada metode ini. Nilai yang diamati adalah perubahan tegangan terminal dari superkapasitor ketika proses *charge-discharge* berlangsung. Untuk kemudian dapat dihitung besar parameter yang ada pada rangkaian ekivalen superkapasitor.

## 2.5 Prosedur Ekstraksi

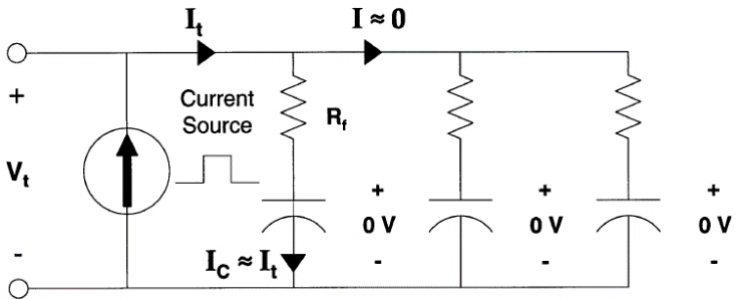
Berdasarkan penelitian [4], ekstraksi dari berbagai parameter rangkaian ekivalen dilakukan pada titik-titik tertentu sepanjang kurva hasil pengujian dari superkapasitor bergantung pada parameter yang dianalisis. Agar lebih sederhana dalam pelaksanaannya, diasumsikan nilai tegangan awal dari kapasitor adalah 0 V sehingga tidak ada muatan yang tersimpan pada superkapasitor. Oleh karena itu, nilai tegangan kapasitor pada *fast branch*, *medium branch*, dan *slow branch* adalah 0 V. Hubungan antara resistansi pada setiap cabang dan nilai *time constant* pada setiap

cabang berdasarkan sifat fisis dari elektrolit dan struktur dari elektroda yang berpori sesuai dengan persamaan (2.2) dan (2.3) dibawah ini.

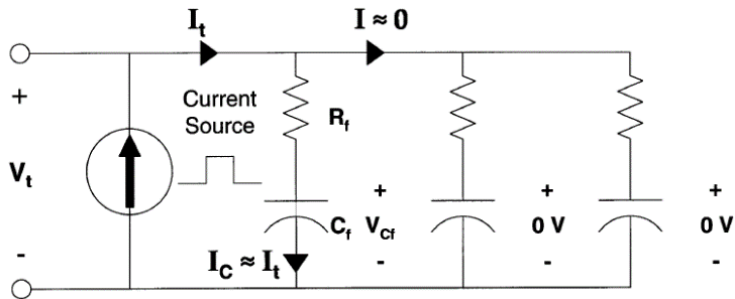
$$R_f \ll R_m \ll R_s \quad (2.2)$$

$$\tau_f \ll \tau_m \ll \tau_s \quad (2.3)$$

Pada saat  $t=0$ , pulsa arus yang bernilai konstan akan mengisi muatan pada superkapasitor. Pada periode ini diasumsikan bahwa muatan akan disimpan keseluruhan pada *fast branch* (muatan akan mengisi/menempel pada pori-pori berukuran besar terlebih dahulu). Gambar 2.10 menunjukkan rangkaian ekuivalen ketika arus mengisi superkapasitor ( $t=0^+$ ). Gambar 2.11 menunjukkan  $C_f$  mulai diisi oleh muatan. Pada proses ini nilai tegangan  $C_f$  mulai meningkat dari awalnya yang diasumsikan bernilai 0 V.

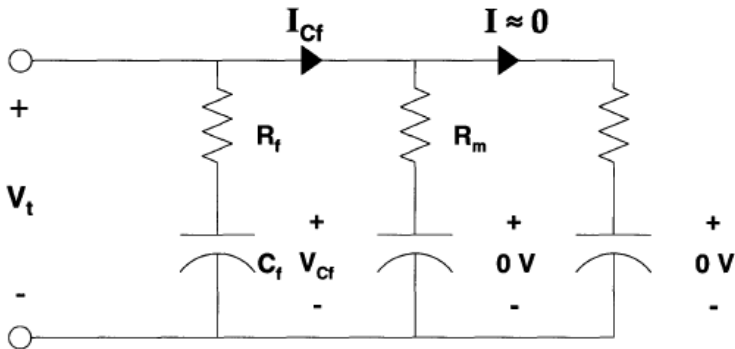


Gambar 2. 10 Rangkaian Ekuivalen Ketika ( $t=0^+$ ) [4]



Gambar 2. 11 Pengisian Muatan pada *fast branch* [4]

Bersamaan dengan pulsa arus, muatan akan meredistribusi ke dalam kapasitor (muatan melebur ke pori-pori yang berukuran lebih kecil). Selama proses pengisian muatan (*charging*), nilai tegangan yang terukur pada terminal superkapasitor adalah tegangan pada kapasitor  $C_f$  ditambah dengan *drop* tegangan yang melalui resistor  $R_f$ . Setelah proses pengisian muatan (*charging*) selesai, nilai  $V_t$  terukur adalah pendekatan dari nilai tegangan dari kapasitor  $C_f$  karena *drop* tegangan yang melalui  $R_f$  terlampaui sangat kecil.



**Gambar 2. 12** Pengisian Muatan pada *Medium Branch*,  $t = t^+_{\text{off}}$  [4]

Gambar 2.12 mengilustrasikan awalnya pada *medium branch* hanya terdiri dari sebuah resistor (karena nilai tegangan awal dari  $C_m$  adalah 0 V) dan *drop* tegangan pada resistor sama dengan  $V_t$  terukur dibagi dengan besar arus yang disuplai dari  $C_f$  sebagai muatan yang terdifusi ke pori-pori yang berukuran lebih kecil. Persamaan (2.4) dan (2.5) dibawah ini merepresentasikan pernyataan tersebut.

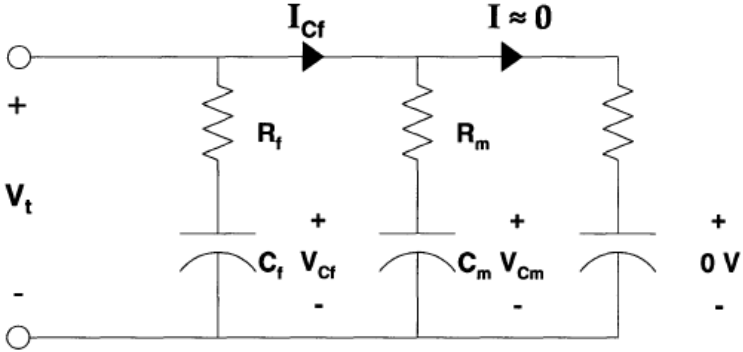
$$R_m \cong \frac{V_t}{I_{Cf}} \quad (2.4)$$

$$R_m \cong \frac{V_t}{C_f \left( \frac{dV_t}{dt} \right)} \quad (2.5)$$

Gambar 2.13 merepresentasikan rangkaian ketika muatan mulai mengalir mengisi ke kapasitor  $C_m$ . Tegangan terukur pada terminal



superkapasitor adalah sama dengan tegangan pada *medium branch* dan kira-kira sama dengan tegangan dari  $C_f$ .



**Gambar 2. 13** Pengisian Muatan pada *Medium Branch*,  $t > t^+_{\text{off}}$  [4]

Arus yang mengalir seperti pada gambar 2.13 dapat diartikan sebagai transfer muatan dari  $C_f$  yang berangsur berkurang karena dikirirkan ke kapasitor  $C_m$ . Persamaan (2.6)-(2.8) dibawah ini menunjukkan kalkulasi untuk  $C_m$  yang menunjukkan muatan yang hilang dari  $C_f$  sesungguhnya disimpan pada  $C_m$ . Nilai  $\Delta V_t$  digunakan untuk perhitungan  $\Delta Q$  yang dihitung sebagai perubahan nilai tegangan pada rentan waktu tertentu setelah proses *charging* selesai yaitu selama 60 detik. 60 detik dipilih karena memiliki nilai yang lebih besar daripada  $\tau_f$ , dan sangat lebih kecil daripada  $\tau_s$  dan perubahan nilai tegangan yang terjadi dianggap masih bisa terukur dengan baik pada interval waktu tersebut.

$$\Delta Q = \Delta V_{C_f} C_f \approx \Delta V_t C_f \quad (2.6)$$

$$C_m = \frac{\Delta Q}{\Delta V_{cm}} \quad (2.7)$$

$$C_m = \frac{\Delta Q}{V_{cf} - I_c R_m} \cong \frac{\Delta Q}{V_{cf} - C_f \left( \frac{dV_t}{dt} \right) R_m} \quad (2.8)$$

Serangkaian proses ekstraksi diatas dapat dilakukan kembali untuk dapat mendapatkan parameter pada *slow branch* ( $R_s$  dan  $C_s$ ). Interval waktu yang digunakan untuk perhitungan  $R_s$  adalah sekitar 3 kali *time constant* dari *medium branch*. Sehingga *medium branch* akan terisi oleh muatan terlebih dahulu sebelum melakukan perhitungan parameter *slow branch*. Interval waktu yang digunakan untuk perhitungan  $C_s$  adalah sebesar 1800 detik. Interval panjang ini dipilih sedemikian rupa sehingga interval waktu lebih panjang dibandingkan dengan konstanta waktu diasumsikan dari *slow branch*, cukup pendek sehingga resistansi kebocoran dapat diabaikan, dan cukup lama sehingga perubahan nilai tegangan mudah diukur pada paruh kedua intervalnya.

Proses ekstraksi yang telah dijelaskan diatas tidak mencakup induktansi, resistansi bocor (*leakage resistance*), ataupun *voltage dependent capacitance* seperti yang diilustrasikan pada model Zubieta-Bonert. Induktansi pada superkapasitor diasumsikan sangat kecil dan impedansi akibat induktansi pada frekuensi rendah dapat diabaikan. Resistansi bocor pada superkapasitor tidak memiliki dampak yang berarti terhadap performa superkapasitor pada penerapan *pulsed-power* disamping itu resistansi bocor memerlukan *time constant* yang sangat lama untuk proses perhitungannya.

## 2.6 Perhitungan Parameter Rangkaian Ekuivalen

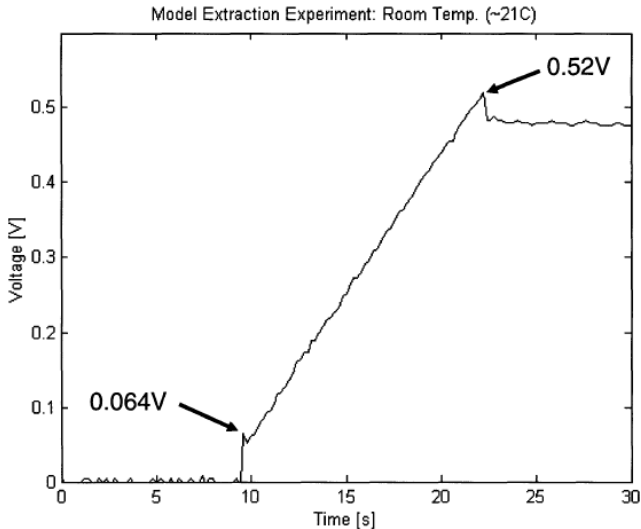
Semua proses perhitungan nilai parameter rangkaian ekuivalen dibawah ini berdasarkan penelitian [4].

### 2.6.1 Perhitungan Nilai $R_f$

Perhitungan  $R_f$  dimulai dengan asumsi nilai tegangan awal dari ketiga kapasitor adalah 0 V. Sehingga menghasilkan rangkaian ekuivalen terdiri dari tiga resistor yang tersusun paralel ( $R_f$ ,  $R_m$ ,  $R_s$ ). Perubahan tegangan ketika  $t = 0^+$  berbanding lurus dengan nilai resistansi ekuivalen. Untuk  $t > 0^+$ , tegangan kapasitor akan naik dari awalnya bernilai 0 V. Ketidakidealan sumber arus menimbulkan *non-zero rise, fall time*, dan *overshoot* ketika proses pengisian muatan (*charging*) sehingga untuk memperoleh nilai  $R_f$  dapat dilakukan melalui persamaan (2.9) berikut ini

$$R_f = \frac{\Delta V t}{\Delta I} \quad (2.9)$$

Nilai  $\Delta V_t$  diperoleh dari *non-zero rise* tegangan terminal superkapasitor ketika pertama kali proses *charging* berlangsung dan ditunjukkan pada gambar 2.14.



**Gambar 2. 14** Letak  $\Delta V_t$  dan  $\Delta V_{t'}$  pada Grafik Tegangan Superkapasitor [4]

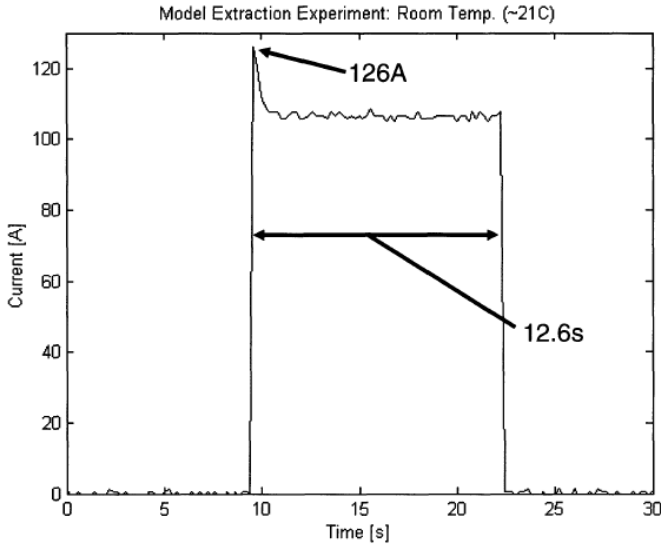
Sedangkan nilai  $\Delta I$  diperoleh dari nilai arus maksimal ketika pertama kali *charging* (nilai *overshoot* apabila ada) dan ditunjukkan pada gambar 2.15.

### 2.6.2 Perhitungan Nilai $C_f$

Pada perhitungan nilai  $C_f$ , asumsinya adalah *time constant* pada *fast branch* ( $\tau_f = R_f C_f$ ) lebih kecil daripada *time constant* dari medium dan *slow branch*, mengingat waktu pengisian (*charging*) cukup singkat maka keseluruhan muatan yang dikirim ke superkapasitor akan disimpan pada kapasitor di *fast branch*.

Nilai  $C_f$  dapat dihitung dari perubahan muatan ( $\Delta Q_f$ ) terhadap perubahan tegangan dari kapasitor selama interval pengisian muatan (*charging*) seperti ditunjukkan pada persamaan (2.10) di bawah berikut ini.

$$C_f = \frac{\Delta Q_1}{\Delta V_{tr}} \quad (2.10)$$

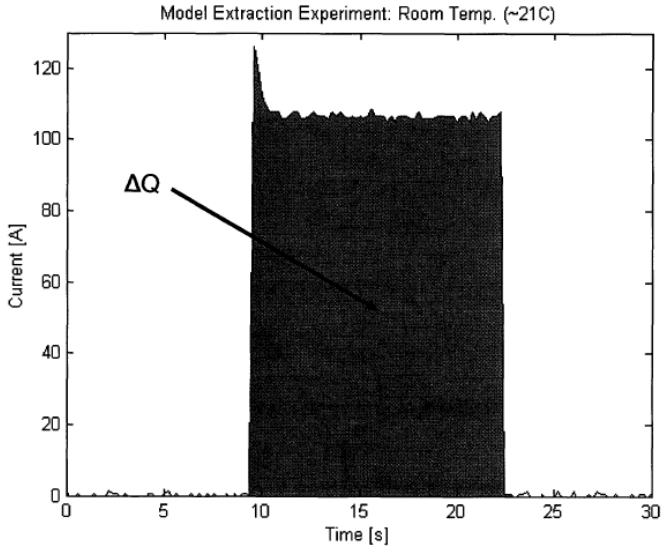


**Gambar 2. 15** Letak  $\Delta I$  pada Grafik Tegangan Superkapasitor [4]

Perhitungan perubahan muatan dapat diukur melalui besar arus yang mengalir ke superkapasitor, waktu pengisian (*charging*), mengintegalkan persamaan garis pada grafik arus atau dengan pendekatan jumlah dari perkalian nilai arus dengan satuan waktu seperti yang ditunjukkan pada persamaan (2.11) di bawah berikut ini. Letak nilai  $\Delta Q_1$  ditunjukkan pada gambar 2.16 dibawah ini.

$$\Delta Q_1 = \int_0^{t=\text{waktu total charging}} i(t)dt \cong \sum (I \times \Delta t) \quad (2.11)$$

Sedangkan untuk  $\Delta V_r$  adalah besar nilai tegangan terminal maksimal superkapasitor (nilai *overshoot* apabila ada) ketika telah melewati nilai tegangan nominal dan ditunjukkan pada gambar 2.14.



**Gambar 2. 16** Letak  $\Delta Q_1$  pada Grafik Tegangan Superkapasitor [4]

### 2.6.3 Perhitungan Nilai $R_m$

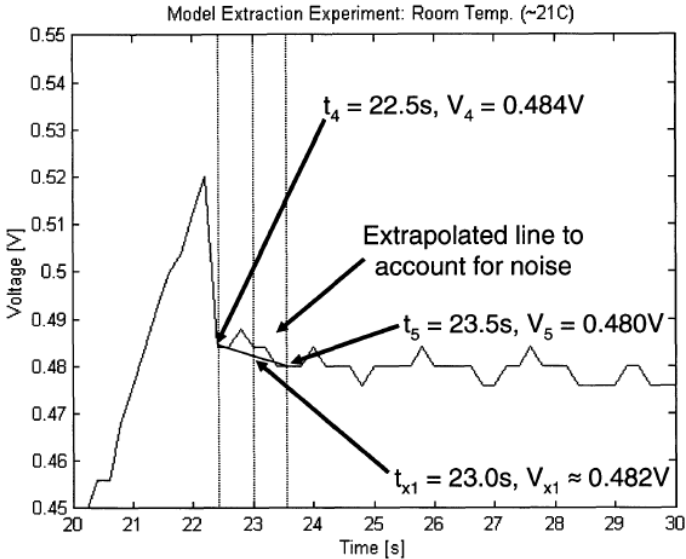
Perhitungan resistansi pada *medium branch* ditemukan setelah interval pengisian dengan menggunakan persamaan di bawah ini dan asumsi bahwa tegangan terminal superkapasitor sesuai dengan tegangan  $R_m$  ( $V_t = V_{Rm} + V_{Cm} = V_{Rm} + 0 \text{ V} = V_{Rm}$ ). Selain itu muatan yang dikirimkan dari *fast branch* relatif sama dengan muatan yang diterima resistansi pada *medium branch*. Penjelasan tambahan mengenai persamaan (2.12) dan (2.13) di bawah ini dapat ditemukan pada gambar 2.13 atau dengan meninjau persamaan pada subbab Prosedur Ekstraksi.

$$R_m \cong \frac{V_t|_{t=tx1}}{C_f \left( \frac{dV_t}{dt} \right)} \quad (2.12)$$

$$\frac{dV_t}{dt} = \frac{V_4 - V_5}{t_5 - t_4} \quad (2.13)$$

$t_4$  merupakan waktu ketika nilai tegangan ketika pertama kali *drop* setelah terjadi *overshoot* atau setelah proses *charging* mencapai nilai

tegangan nominal. Sedangkan  $t_5$  merupakan waktu satu detik setelah  $t_4$ .  $t_{x1}$  merupakan *midpoint* atau waktu antara  $t_4$  dan  $t_5$ . Proses ekstrapolasi terhadap grafik tegangan dibutuhkan apabila terdapat *noise* sehingga sulit untuk menemukan perubahan nilai tegangan pada interval yang singkat. Letak nilai-nilai variabel untuk perhitungan  $R_m$  dapat dilihat pada gambar 2.17 di bawah ini.



**Gambar 2. 17** Letak  $t_4$ ,  $V_4$ ,  $t_{x1}$ ,  $V_{x1}$ ,  $t_5$ , dan  $V_5$  pada Grafik Tegangan Supercapacitor [4]

#### 2.6.4 Perhitungan Nilai $C_m$

Nilai  $C_m$  dihitung dengan melihat data tegangan yang diukur ketika beberapa saat setelah sumber arus dilepas dari rangkaian. Interval waktu ( $t_6$ ) yang dipilih adalah 60 detik setelah  $t_4$ . 60 detik dipilih karena lebih besar dari  $\tau_f$ , lebih kecil dari nilai  $\tau_s$  yang diasumsikan, dan perubahan tegangan yang terjadi masih dapat terukur dengan baik. Interval untuk perhitungan  $C_m$  perlu cukup lama untuk memastikan pengisian  $C_m$  yang cukup. Apabila interval waktu terlalu lama, akan menjadi relatif sama terhadap *time constant* dari *slow branch*, muatan akan bergerak lebih jauh pada rangkaian ekuivalen dan akan mulai mengisi kapasitor pada *slow*

*branch*, sehingga anggapan bahwa muatan yang keluar dari *fast branch* akan disimpan pada *medium branch* menjadi tidak tepat.

Karena itu, kapasitansi ditentukan berdasarkan pembagian perubahan nilai muatan pada *medium branch* (yang kira-kira sama dengan muatan pada *fast branch*) dengan perubahan tegangan pada  $C_m$ . Persamaan (2.14) dan (2.15) di bawah ini menunjukkan hubungan dan penggunaan anggapan bahwa penjumlahan dari  $R_f$  dan  $R_m$  adalah kira-kira sama dengan nilai  $R_m$  sendiri.

$$C_m = \frac{\Delta Q_2}{V_{cf}|_{t=t_6} - C_f \left( \frac{dV_c}{dt} \right) |_{t=t_6} (R_m + R_f)} \quad (2.14)$$

$$C_m \cong \frac{\Delta Q_2}{V_{cf}|_{t=t_6} - C_f \left( \frac{dV_t}{dt} \right) |_{t=t_6} (R_m)} \quad (2.15)$$

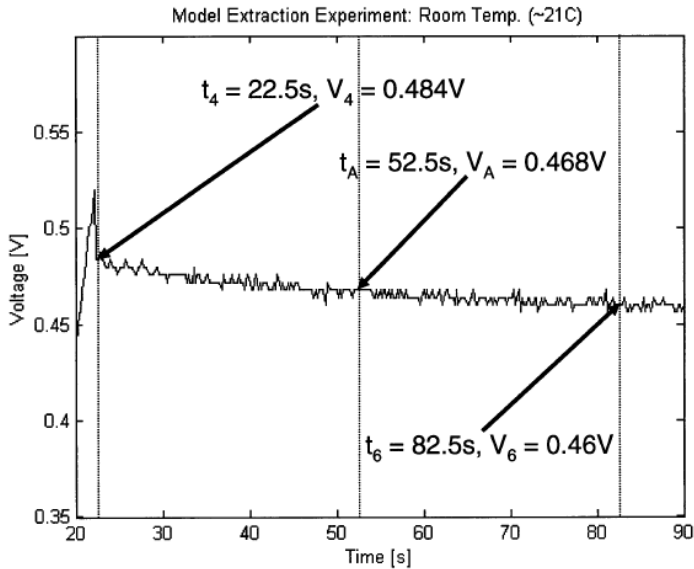
Perubahan nilai muatan pada *medium branch* ( $\Delta Q_2$ ) ditentukan pada persamaan (2.16) di bawah ini setelah interval waktu 60 detik.

$$\Delta Q_2 = \Delta V_{cf} C_f \approx \Delta V_t C_f = (V_t|_{t=t_4} - V_t|_{t=t_6}) \times C_f \quad (2.16)$$

Pada perhitungan  $\frac{dV_t}{dt}$  pada persamaan (2.17) di bawah ini, bahwa perubahan tegangan terminal diasumsikan kira-kira sama dengan perubahan tegangan pada  $C_f$  pada  $dt$  interval. Interval yang digunakan ( $t_a$ ) adalah setengah dari interval 60 detik.  $V_a$  adalah nilai tegangan ketika  $t_a$ . Sedangkan  $V_6$  adalah nilai tegangan pada akhir interval 60 detik. Interval pada  $\frac{dV_t}{dt}$  harus kecil sehingga dipilih waktu pada detik 30-60 karena memiliki bentuk kurva yang hampir linier (dapat dilihat pada gambar 2.18).

$$\frac{dV_t}{dt} = \frac{V_a - V_6}{t_6 - t_a} \quad (2.17)$$

Pengukuran tegangan untuk  $V_{cf}$  diambil pada akhir interval *medium charging* (Pengukuran tegangan pada akhir interval *fast charging* untuk perhitungan  $C_f$ ). Letak nilai-nilai variabel untuk perhitungan  $C_m$  dapat dilihat pada gambar 2.18 berikut ini.



**Gambar 2. 18** Letak  $t_a$ ,  $V_a$ ,  $t_6$ , dan  $V_6$  pada Grafik Tegangan Superkapasitor [4]

### 2.6.5 Perhitungan Nilai $R_s$

Perubahan nilai tegangan semakin sulit untuk diukur karena tingkat *noise* yang semakin tinggi. Oleh karena itu dibutuhkan interval waktu yang tepat agar muatan dari *fast branch* berpindah untuk mengisi *slow branch* daripada mengisi ke *medium branch*. Hal ini dapat ditentukan melalui perhitungan *time constant* dari *medium branch* ( $\tau_m = R_m C_m$ ). Waktu  $t = t_7$  didefinisikan sebagai 3 kali *time constant* dari *medium branch* setelah sumber arus tidak lagi aktif seperti pada persamaan (2.18) berikut ini.

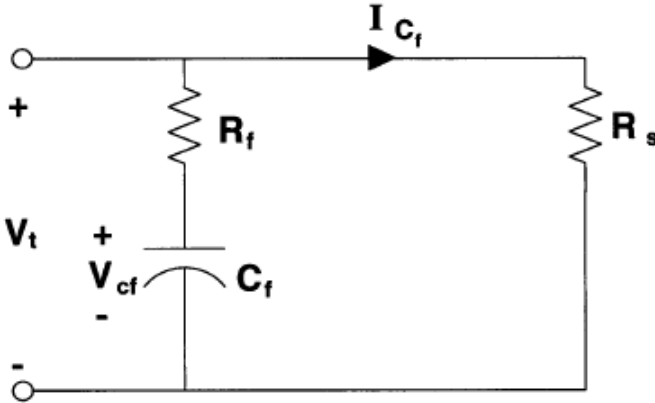
$$(t = t_7 \cong t_4 + 3\tau_m) \quad (2.18)$$

Asumsi untuk perhitungan  $t_7$ , Tegangan  $C_m$  mengalami perubahan nilai karena transfer muatan ke *slow branch*. Selain itu, dengan meninjau nilai *time constant* dari *fast branch* dan *medium branch*, diperkirakan bahwa transfer muatan menuju *slow branch* akan hampir seluruhnya



berasal dari *fast branch* dan muatan yang hilang dari *fast branch* adalah hampir seluruhnya dikirimkan ke *slow branch* (apabila *medium branch* diabaikan).

Pada saat  $t = t_7$  tegangan pada  $C_s$  adalah sekitar 0 V dan pada *slow branch* hanya terdapat elemen resistif seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.19



**Gambar 2. 19** Pengisian Muatan pada *Slow Branch* [4]

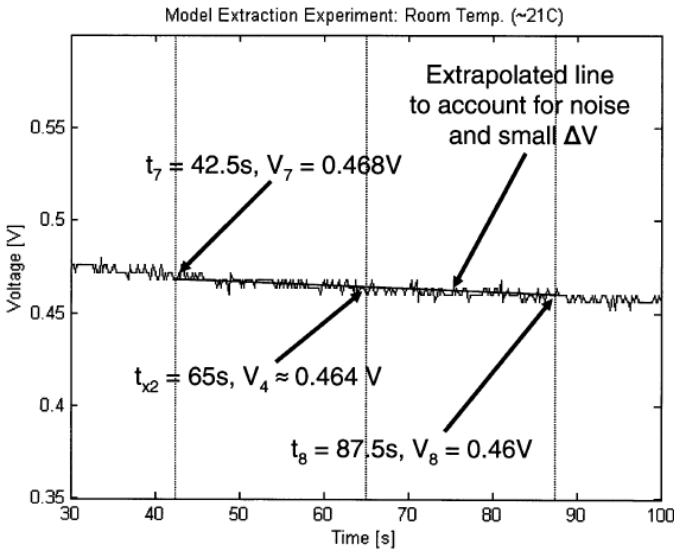
Oleh karena itu, resistansi pada *slow branch* dapat diperoleh melalui perubahan linier dari tegangan *branch* dan membagi tegangan dengan arus pada *slow branch*. Hubungan ini dapat dilihat pada persamaan (2.19) di bawah berikut ini

$$R_s \cong \frac{V_{Cf} + V_{Rf}}{C_f \left( \frac{dV_t}{dt} \right)} = \frac{V_t|_{t=tx2}}{C_f \left( \frac{dV_t}{dt} \right)} \quad (2.19)$$

Nilai penyebut pada persamaan di atas, Tegangan terminal ( $V_t$ ) diasumsikan sama dengan tegangan *branch*. Penyebut pada persamaan di atas menunjukkan arus mengalir disekitar *loop* yang terdiri dari *fast branch* parallel dengan *slow branch* (*medium branch* diabaikan). Untuk perhitungan  $\frac{dV_t}{dt}$  terdapat pada persamaan (2.20) dibawah ini.

$$\frac{dV_t}{dt} = \frac{V_7 - V_8}{t_8 - t_7} \quad (2.20)$$

Untuk menjaga asumsi nilai tegangan dari  $C_s$  tetap 0 V selama perhitungan  $R_s$ , nilai  $dt$  harus diatur cukup besar sehingga nilai *drop* tegangan tetap bisa diukur dengan adanya interferensi dari *noise*. Maka dipilih interval waktu ( $t_8$ ) selama 45 detik setelah  $t_7$ .  $t_{x2}$  merupakan *midpoint* atau waktu antara  $t_7$  dan  $t_8$ . Sehingga  $V_{tx2}$  merupakan nilai tegangan ketika waktu  $t_{x2}$ . Letak nilai-nilai variabel untuk perhitungan  $R_s$  dapat dilihat pada gambar 2.20 dibawah ini.

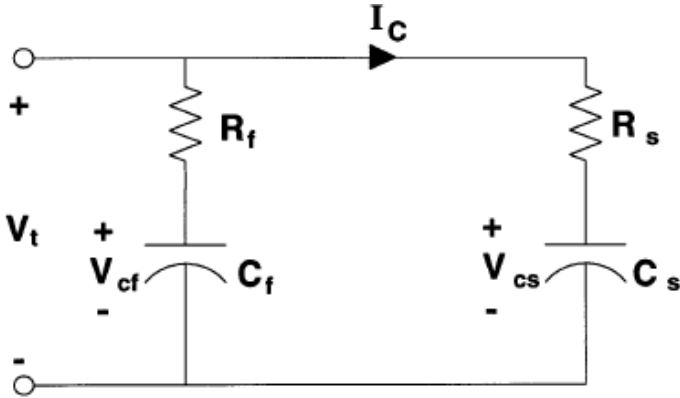


**Gambar 2. 20** Letak  $t_7$ ,  $V_7$ ,  $t_{x2}$ ,  $V_{x2}$ ,  $t_8$ , dan  $V_8$  pada Grafik Tegangan Superkapasitor [4]

### 2.6.6 Perhitungan Nilai $C_s$

Pada perhitungan parameter  $C_s$ , diasumsikan perubahan tegangan terminal disebabkan oleh transfer muatan dari *fast branch* ke *slow branch*. Perubahan muatan pada *medium branch* diabaikan karena nilai kapasitor pada *medium branch* lebih kecil dibandingkan kapasitor pada *fast branch*. Interval waktu untuk perhitungan ini dimulai setelah cabang menengah sudah terisi ( $t = t_7$ ) dan cukup lama terjadi perubahan tegangan ketika

percobaan disebabkan oleh proses penyimpanan muatan dalam  $C_s$ . Gambar 2.21 digunakan sebagai ilustrasi perhitungan nilai  $C_s$ .



**Gambar 2. 21** Pengisian Muataan pada  $C_s$  [4]

Selain itu, pengukuran perubahan tegangan pada titik ini cukup sulit sehingga membutuhkan  $dt$  yang bernilai besar. Sehingga dipilih interval waktu sebesar 1800 detik.

Nilai  $C_s$  dihitung dari pengukuran perubahan nilai muatan pada *slow branch* ( $\Delta Q_3$ ) dan perubahan tegangan pada kapasitansi *slow branch* seperti yang ditunjukkan pada persamaan (2.21) dan (2.22) di bawah ini. Nilai  $R_s$  harus lebih besar daripada nilai  $R_f$ .

$$C_s = \frac{\Delta Q_3}{V_{cf}|_{t=t_9} - C_f \left( \frac{dV_c}{dt} \right) |_{t=t_9} (R_s + R_f)} \quad (2.21)$$

$$C_s \cong \frac{\Delta Q_3}{V_{cf}|_{t=t_9} - C_f \left( \frac{dV_t}{dt} \right) |_{t=t_9} (R_s)} \quad (2.22)$$

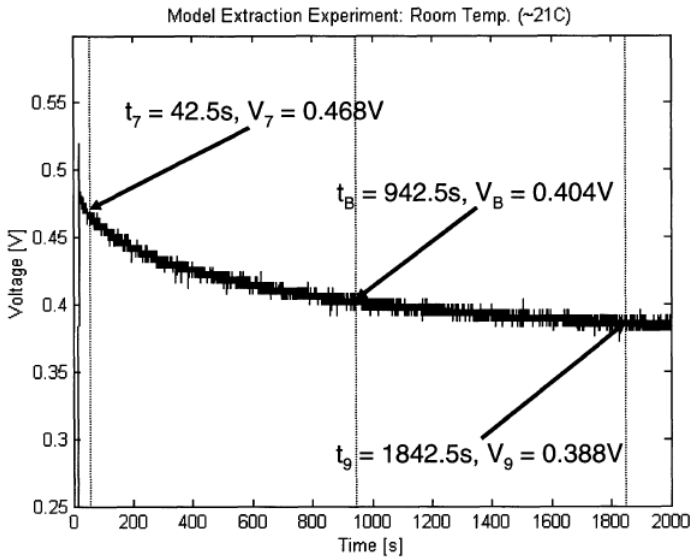
Perubahan muatan pada *slow branch* ( $\Delta Q_3$ ) diberikan pada persamaan (2.23) di bawah ini.  $\Delta Q$  pada kapasitor *slow branch* relatif sama dengan  $\Delta Q$  pada kapasitor *fast branch*. Perubahan tegangan terminal ( $\Delta V_t$ ) sama dengan perubahan tegangan kapasitor *fast branch* selama interval 1800 detik karena nilai  $R_f$  yang kecil, keseluruhan muatan meninggalkan  $C_f$  sehingga *drop* tegangan  $R_f$  dapat diabaikan.

$$\Delta Q_3 = \Delta V_{C_f} C_f \approx \Delta V_t C_f = (V_t|_{t=t_7} - V_t|_{t=t_9}) \times C_f \quad (2.23)$$

Pada perhitungan  $\frac{dV_t}{dt}$  di persamaan (2.24) di bawah ini, bahwa perubahan tegangan terminal diasumsikan sama dengan perubahan tegangan pada  $C_f$  pada  $dt$  interval. Interval yang digunakan ( $t_b$ ) adalah setengah dari interval 1800 detik.  $V_b$  adalah nilai tegangan ketika  $t_b$ . Sedangkan  $V_9$  adalah nilai tegangan pada akhir interval 1800 detik.

$$\frac{dV_t}{dt} = \frac{V_b - V_9}{t_9 - t_b} \quad (2.24)$$

Letak nilai-nilai variabel untuk perhitungan  $C_s$  dapat dilihat pada gambar 2.22 dibawah ini.



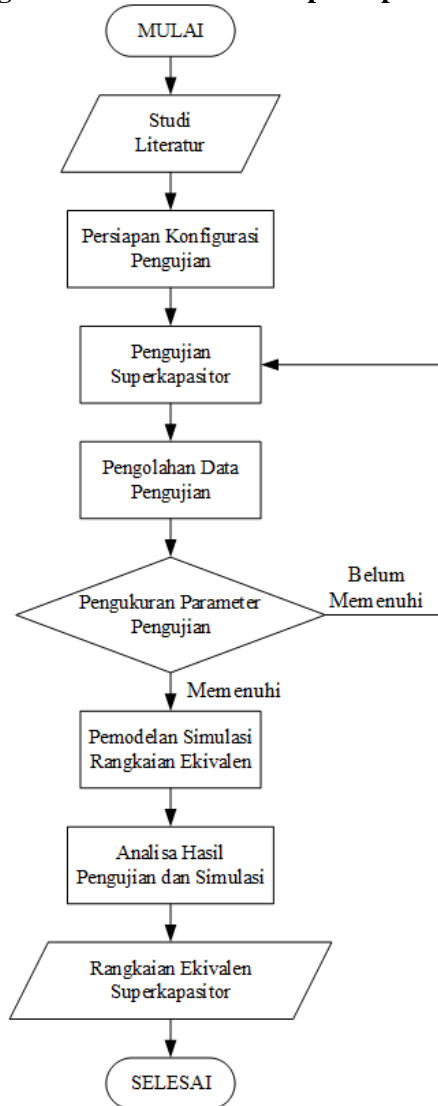
**Gambar 2. 22** Letak  $t_b$ ,  $V_b$ ,  $t_9$ , dan  $V_9$  pada Grafik Tegangan Superkapasitor [4]

## **BAB 3**

### **PENGUJIAN DAN PEMODELAN SUPERKAPASITOR**

Dalam bab ini akan dijelaskan tentang proses pengujian superkapasitor menggunakan *Programmable Multi Range DC Power Supply*, *Programmable DC Electronic Load*, dan *Digital Storage Oscilloscope* serta pemodelan rangkaian ekuivalen R-C tiga cabang superkapasitor menggunakan MATLAB/Simulink. Pengujian superkapasitor bertujuan untuk mendapatkan nilai-nilai parameter dari rangkaian ekuivalen R-C tiga cabang dan akan dijelaskan pada sub bab 3.1 untuk kemudian dimasukkan pada rangkaian ekuivalen R-C tiga cabang ketika proses simulasi. Proses simulasi dan pemodelan rangkaian ekuivalen akan dijelaskan di sub bab 3.2. Hasil dari kedua metode tersebut berupa grafik perubahan nilai tegangan terminal superkapasitor selama proses *charge-discharge*. Kemudian kedua grafik tersebut dibandingkan sebagai proses validasi dan akan dianalisis lebih dalam pada bab 4.

### 3.1 Diagram Alir Pemodelan Superkapasitor

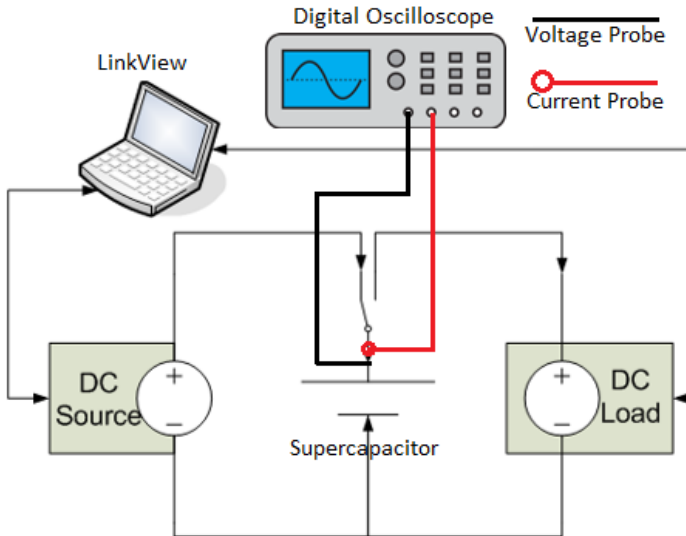


**Gambar 3. 1** Diagram Alir Pemodelan Superkapasitor

## 3.2 Konfigurasi Pengujian Superkapasitor

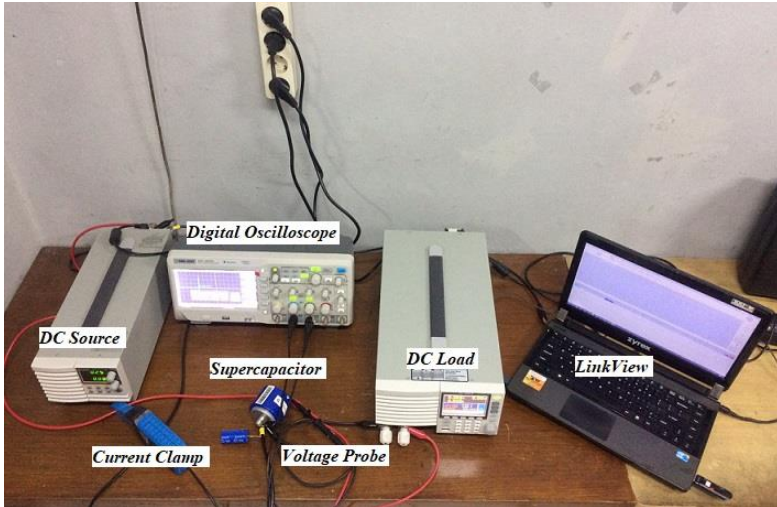
### 3.2.1 Rangkaian Pengujian Superkapasitor

Rangkaian pengujian superkapasitor ditunjukkan pada gambar 3.2 berikut ini



**Gambar 3. 2** Diagram Pengujian Superkapasitor

Semua komponen dan peralatan elektronik dirangkai seperti gambar diatas. *Programmable Multi Range DC Power Supply*, superkapasitor, dan *Programmable DC Electronic Load* dirangkai secara parallel. Sebuah PC atau laptop dihubungkan dengan *Programmable Multi Range DC Power Supply* dan *Programmable DC Electronic Load* untuk memudahkan pelaksanaan pengujian yang diatur langsung melalui *software* LinkView. Terdapat dua probe osiloskop yang masing-masing digunakan untuk mengukur tegangan dan arus kapasitor selama pengujian. Kedua probe osiloskop tersebut dipasang pada terminal positif dari superkapasitor. Rangkaian konfigurasi alat pengujian tersusun sesuai dengan diagram pada gambar 3.2 ditunjukkan pada gambar 3.3 berikut ini



**Gambar 3. 3** Rangkaian pengujian superkapasitor

### 3.2.2 Komponen Pengujian Superkapasitor

Pengujian superkapasitor membutuhkan beberapa peralatan elektronik yaitu *Programmable Multi Range DC Power Supply*, *Programmable DC Electronic Load*, *Digital Storage Oscilloscope*, dan sebuah *Personal Computer (PC)* atau laptop. Berikut merupakan deskripsi singkat mengenai masing-masing peralatan elektronik yang digunakan pada proses pengujian superkapasitor:

#### 1. Superkapasitor

Superkapasitor merupakan objek utama pada Tugas Akhir ini yang akan diambil datanya melalui proses pengujian dan pemodelan ketika simulasi. Superkapasitor yang digunakan memiliki kapasitas 100 F dan 650 F. Masing-masing superkapasitor memiliki tegangan nominal 2,7 V. Manufaktur dari superkapasitor yang digunakan pada Tugas Akhir ini adalah Maxwell. Tabel 3.1 menunjukkan spesifikasi superkapasitor yang digunakan pada Tugas Akhir ini.



**Tabel 3. 1** Spesifikasi Superkapasitor [8], [9]

Parameter	Superkapasitor 100 F	Superkapasitor 650 F
Jenis	BCAP0100 T01	BCAP0650
Kapasitansi Nominal	100F	650F
Tegangan Nominal	2,7 V	2,7 V
Tegangan Maksimal	2,85 V	2,85 V
Arus Maksimal	36 A	680 A
<i>ESR</i>	15 m $\Omega$	0.8 m $\Omega$
<i>Leakage Current</i>	0,260 mA	1,5 mA

2. *Programmable Multi Range DC Power Supply*

Catu daya DC pada Tugas Akhir ini berfungsi untuk mengisi muatan (*charging*) pada superkapasitor dengan nilai arus dan tegangan yang dapat ditentukan sesuai keinginan dan dapat diatur melalui LinkView sehingga disebut *programmable power supply*. *DC Power Supply* yang digunakan berasal dari manufaktur GW Instek dengan tipe PSW 30-72 yang memiliki tegangan nominal hingga 30 V, arus nominal hingga 72 A, dan memiliki daya sebesar 720 W [10].

3. *Programmable DC Electronic Load*

Beban DC elektrik ini merupakan beban yang dapat diatur menjadi beban statis atau beban dinamis melalui LinkView sehingga disebut *programmable electronic load*. Beban DC elektrik ini berfungsi ketika fase pengosongan muatan (*discharging*) pada superkapasitor sehingga muatan yang tersimpan di dalam superkapasitor dapat dikeluarkan. Pada Tugas Akhir ini beban DC elektrik yang digunakan berasal dari manufaktur GW Instek dengan tipe PEL-3032E dengan tegangan nominal 2,5 V-500 V, arus nominal 1,5 A (untuk *low range*) dan 15 A (untuk *high range*), serta memiliki daya sebesar 300 W [11].

4. *Digital Storage Oscilloscope*

Osiloskop pada Tugas Akhir ini berfungsi untuk melihat dan menganalisis (*monitoring*) perubahan nilai tegangan terminal

superkapasitor selama proses pengujian berlangsung. Selain itu data yang telah ditampilkan oleh osiloskop dapat sekaligus direkam (*data logging*) sehingga dapat diolah pada Microsoft Excel. Osiloskop yang digunakan pada Tugas Akhir ini berasal dari Manufaktur Siglent dengan tipe SDS1204CFL dengan kanal masukan sebanyak 4 buah. Memiliki nilai tegangan masukan maksimal 400 V dan daya maksimal sebesar 50 VA [12].

5. *Probe* Tegangan dan *Clamp* Arus

Pembacaan tegangan ketika pengujian superkapasitor oleh osiloskop dilakukan menggunakan *probe* tegangan yang dipasang pada terminal positif superkapasitor. *Probe* tegangan yang digunakan menggunakan manufaktur dari Siglent [13]. Sedangkan pembacaan arus ketika pengujian superkapasitor dilakukan menggunakan *Clamp* arus yang juga dipasang pada terminal positif superkapasitor. *Clamp* arus yang digunakan menggunakan manufaktur Hantek [14].

6. *Personal Computer/Laptop* dilengkapi dengan LinkView dan Microsoft Excel

LinkView merupakan sebuah aplikasi yang dapat melakukan pengaturan langsung kepada *Programmable DC Power Supply* dan *Programmable DC Electronic Load* sehingga dapat mempermudah proses pengujian superkapasitor dengan membuat skenario atau langkah-langkah selama pengujian seperti *charge*, *discharge*, dan *sleep* sehingga tidak perlu melakukan pengaturan langsung pada perangkatnya. Gambar 3.4 dan gambar 3.5 merupakan contoh tampilan *interface* dari LinkView.

Pattern Edit

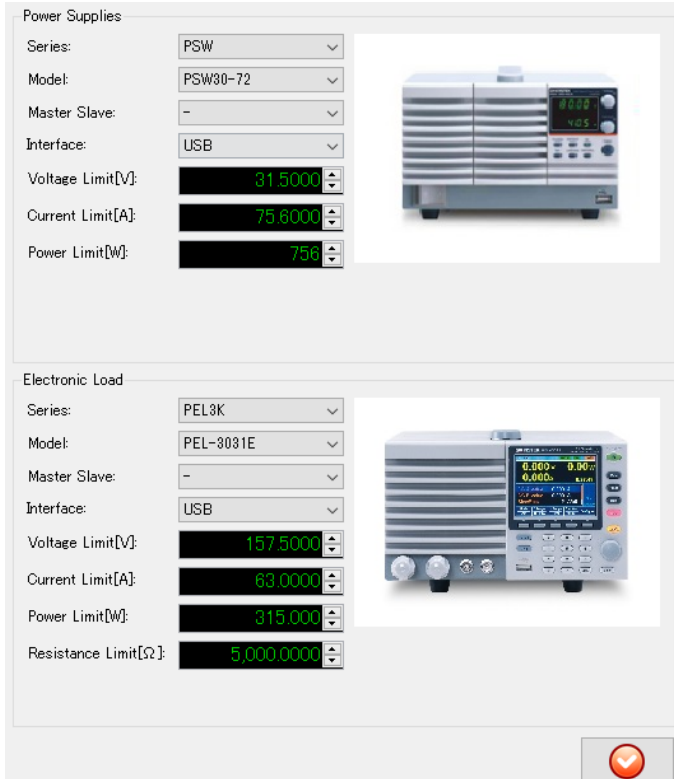
No:  Name:

Step Table

No	Mode	Parameter	Voltage[V]		
			Time[S]	Hi	Lo
001	Sleep	-	10	OFF	OFF
002	Charge	2.700V, 8.000A	OFF	2.670	OFF
003	Sleep	-	1860	OFF	OFF
004	Discharge CC	H, 8.000A	OFF	OFF	0.010
005	Sleep	-	10	OFF	OFF

**Gambar 3. 4** Tampilan menu ‘*Pattern Edit*’ pada LinkView

Sedangkan Microsoft Excel berfungsi untuk menggambar ulang (plot) grafik tegangan terminal superkapasitor yang telah direkam oleh osiloskop. Grafik tersebut selanjutnya diolah untuk mendapatkan nilai parameter-parameter pada rangkaian ekivalen R-C tiga cabang.



**Gambar 3. 5** Tampilan menu ‘Device’ pada LinkView

### 3.2.3 Skenario Metode Pengujian

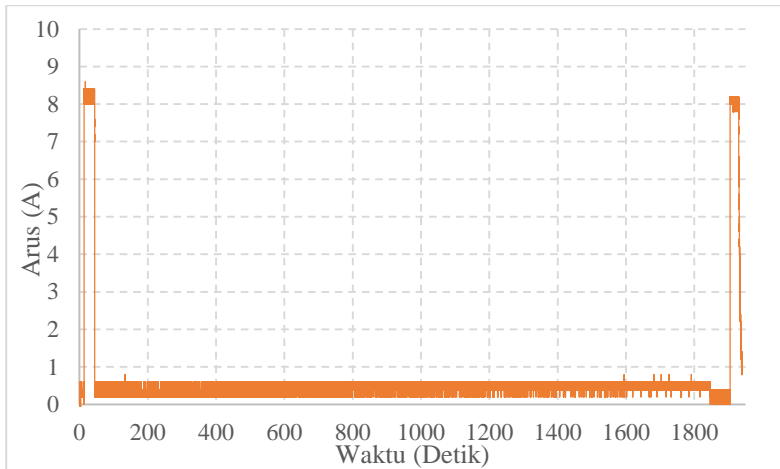
Segala proses dan prosedur pengujian superkapasitor yang dilakukan pada Tugas Akhir ini berdasarkan sumber referensi [4]. Terlebih dahulu dilakukan proses *discharge* pada superkapasitor untuk memastikan tegangan terminal awalnya bernilai (mendekati) 0 V. Apabila superkapasitor sudah tidak bertegangan, maka proses pengujian dapat dilakukan.

#### 3.2.3.1 Metode Charge-Discharge

*Programmable Multi Range DC Power Supply* akan membangkitkan arus yang bernilai konstan sebesar 8 A untuk melakukan

pengisian muatan pada superkapasitor. Proses *charging* ini membuat nilai tegangan terminal pada superkapasitor terus bertambah. *Programmable Multi Range DC Power Supply* akan menjaga nilai arus yang mengisi superkapasitor tidak berubah-ubah sampai superkapasitor mencapai nilai tegangan nominalnya.

Setelah mencapai nilai tegangan nominal, superkapasitor seolah-olah dilepas (*open circuit*) dari rangkaian atau mode *sleep* pada LinkView dan dibiarkan selama 30 menit (1800 detik). Setelah 30 menit maka akan dilakukan proses *discharging* menggunakan arus yang bernilai konstan. Proses *discharging* dilakukan oleh *Programmable DC Electronic Load* sampai tegangan terminal superkapasitor bernilai (mendekati) 0 V. Bentuk pulsa arus ditunjukkan pada gambar 3.6 dibawah ini dengan nilai *charge* dan *discharge* yang sama yaitu sebesar 8 A.



**Gambar 3. 6** Grafik Arus Metode *Charge-Discharge*

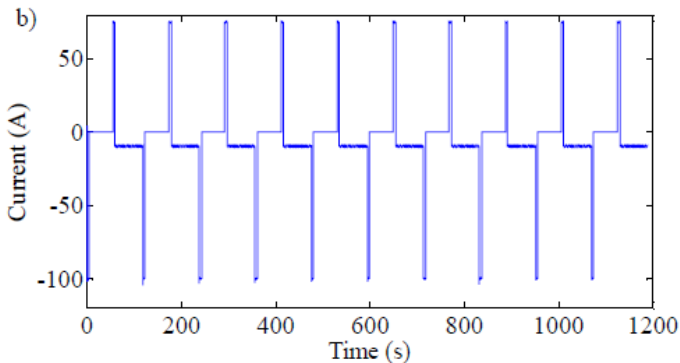
Sebelum melakukan pengujian, alur pengujian akan dibuat terlebih dahulu menggunakan LinkView dengan urutan seperti pada tabel 3.2 untuk pengujian menggunakan metode *Charge-Discharge*.

**Tabel 3. 2** Urutan Pengujian Superkapasitor Metode *Charge-Discharge*

No.	Fase	Parameter	Waktu (detik)	Kondisi Akhir	
				Tegangan (V)	Arus (A)
1	<i>Sleep</i>	-	10	-	-
2	<i>Charge</i>	2,7 V; 8 A	-	2,67	-
3	<i>Sleep</i>	-	1900	-	-
4	<i>Discharge CC</i>	8 A	-	0.01	-
5	<i>Sleep</i>	-	10	-	-

### 3.2.3.2 Metode HPPC

Selain pengujian menggunakan metode *charge-discharge*, dilakukan pula pengujian menggunakan arus dinamis. Tujuannya yaitu untuk mengetahui seberapa akurat rangkaian ekivalen dapat memodelkan fenomena fisika yang terjadi selama proses *charge-discharge*. Nilai arus yang digunakan disesuaikan dengan penelitian [15] yang disebut juga dengan *Hybrid Pulse Power Characterization* (HPPC). Bentuk pulsa arus ditunjukkan pada gambar 3.7 dibawah ini dengan nilai *charge* dan *discharge* yang sama yaitu sebesar 8 A dan dilakukan pengulangan selama beberapa kali. Sedangkan jeda (mode *sleep*) antara *charge* ke *discharge* selama 20 detik. Kemudian jeda (mode *sleep*) antara *discharge* ke *charge* selama 10 detik.



**Gambar 3. 7** Grafik Arus Metode HPPC [15]

Sebelum melakukan pengujian, alur pengujian akan dibuat terlebih dahulu menggunakan LinkView dengan urutan seperti pada tabel 3.3 untuk pengujian menggunakan nilai arus dinamis HPPC.

**Tabel 3. 3** Urutan Pengujian Superkapasitor Metode HPPC

No.	Fase	Parameter	Waktu (detik)	Kondisi Akhir	
				Tegangan (V)	Arus (A)
1	<i>Sleep</i>	-	10	-	-
2	<i>Charge</i>	2,7 V; 8 A	-	2,67	-
3	<i>Sleep</i>	-	20	-	-
4	<i>Discharge CC</i>	8 A	10	-	-
5	<i>Sleep</i>	-	10	-	-
6	<i>Charge</i>	2,7 V; 8 A	10	-	-
7	<i>Sleep</i>	-	20	-	-
8	<i>Discharge CC</i>	8 A	10	-	-
9	<i>Sleep</i>	-	10	-	-
10	<i>Charge</i>	2,7 V; 8 A	10	-	-

Metode pada tabel 3.2 [mulai nomor 3 sampai 6] diatas dilakukan berulang-ulang sebanyak sepuluh kali.

### 3.2.4 Skenario Metode *Data Logging*

Semua proses perubahan nilai tegangan terminal superkapasitor selama pengujian dapat dilihat secara langsung melalui osiloskop, LinkView, atau *Programmable Elctronic Load*. Selama proses pengujian, pengaturan osiloskop yang digunakan seperti pada tabel 3.4 dibawah ini.

**Tabel 3. 4** Pengaturan Osiloskop Pengujian Superkapasitor

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

Data grafik yang ditampilkan pada osiloskop selama pengujian dipindahkan ke Microsoft Excel dengan menggunakan fungsi *recorder* pada pilihan menu *utility*. Kemudian Data grafik tersebut diolah pada Microsoft Excel untuk diamati dan dianalisis dengan tujuan untuk mendapatkan nilai-nilai parameter dari rangkaian ekivalen R-C tiga cabang menggunakan persamaan (2.9) sampai dengan persamaan (2.24). Tabel 3.5 Berikut merupakan tabel yang berisi nilai-nilai variabel yang diambil dari grafik hasil pengujian superkapasitor yang akan digunakan untuk perhitungan nilai-nilai parameter superkapasitor. Letak masing-masing variabel dapat ditinjau pada gambar 2.14 sampai dengan gambar 2.22.

**Tabel 3. 5** Variabel yang Diperoleh dari Grafik Pengujian Superkapasitor

Parameter	Variabel	Satuan	Keterangan
$R_f$	$\Delta V_t$	Volt	Perubahan nilai tegangan ketika pertama <i>charging</i> [Persamaan (2.9)]
	$\Delta I$	Ampere	Nilai arus maksimal ketika pertama <i>charging</i> [Persamaan (2.9)]
$C_f$	$\Delta Q_1$	Coloumb	Luasan area dibawah grafik arus selama <i>charging</i> [Persamaan (2.10)]
	$t_{charge}$	Detik	Waktu ketika <i>charging</i> dari awal hingga mencapai tegangan nominal [Persamaan (2.11)]
	$\Delta V_t'$	Volt	Nilai tegangan maksimal ( <i>overshoot</i> ) setelah mencapai tegangan nominal [Persamaan (2.10)]
$R_m$	$t_4$	Detik	Waktu pertama kali nilai tegangan mengalami penurunan setelah <i>overshoot</i> [Persamaan (2.13)]
	$t_5$	Detik	1 detik setelah $t_4$ [Persamaan (2.13)]
	$t_{x1}$	Detik	Waktu antara $t_4$ dan $t_5$



**Tabel 3.5 Lanjutan**

Parameter	Variabel	Satuan	Keterangan
$R_m$	$V_4$	Volt	Nilai tegangan pada waktu $t_4$ [Persamaan (2.13) dan (2.16)]
	$V_5$	Volt	Nilai tegangan pada waktu $t_5$ [Persamaan (2.13)]
	$V_{x1}$	Volt	Nilai tegangan pada waktu $t_{x1}$ [Persamaan (2.12)]
$C_m$	$t_6$	Detik	60 detik setelah $t_4$ [Persamaan (2.17)]
	$t_a$	Detik	Waktu antara $t_4$ dan $t_6$ [Persamaan (2.17)]
	$V_6$	Volt	Nilai tegangan pada waktu $t_6$ [Persamaan (2.14)-(2.17)]
	$V_a$	Volt	Nilai tegangan pada waktu $V_a$ [Persamaan (2.17)]
$R_s$	$t_7$	Detik	[Persamaan (2.18)]
	$t_8$	Detik	45 detik setelah $t_7$ [Persamaan (2.20)]
	$t_{x2}$	Detik	Waktu antara $t_7$ dan $t_8$
	$V_7$	Volt	Nilai tegangan pada waktu $t_7$ [Persamaan (2.20) dan (2.23)]
	$V_8$	Volt	Nilai tegangan pada waktu $t_8$ [Persamaan (2.20)]
	$V_{x2}$	Volt	Nilai tegangan pada waktu $t_{x2}$ [Persamaan (2.19)]
$C_s$	$t_9$	Detik	1800 detik setelah $t_7$ [Persamaan (2.24)]
	$t_b$	Detik	Waktu antara $t_7$ dan $t_9$ [Persamaan (2.24)]
	$V_9$	Volt	Nilai tegangan pada waktu $t_9$ [Persamaan (2.21)-(2.24)]
	$V_b$	Volt	Nilai tegangan pada waktu $t_b$ [Persamaan (2.24)]

Untuk mempermudah proses analisis, dapat merujuk pada tabel asumsi dari setiap parameter rangkaian ekivalen R-C tiga cabang yang

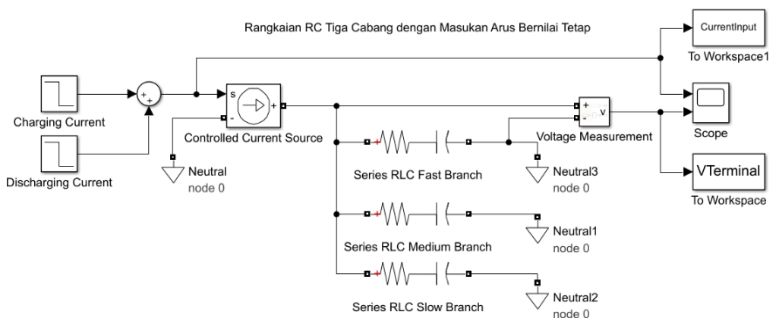
terdapat pada bagian lampiran. Setelah mendapatkan semua nilai variabel seperti pada tabel 3.5 maka dapat dilakukan perhitungan untuk mendapatkan parameter-parameter superkapasitor pada rangkaian ekuivalen R-C tiga cabang. Terdapat enam parameter yang terdapat pada rangkaian ekuivalen R-C tiga cabang yaitu  $R_f$ ,  $C_f$ ,  $R_m$ ,  $C_m$ ,  $R_s$ , dan  $C_s$ . Hasil lebih lengkap akan dijelaskan di bab 4.

### 3.3 Pemodelan Rangkaian Ekuivalen R-C pada Simulink

Setelah melakukan pengujian terhadap superkapasitor, maka tahap selanjutnya adalah memasukkan nilai-nilai parameter yang telah diperoleh melalui perhitungan ke dalam model rangkaian ekuivalen R-C tiga cabang yang akan dimodelkan pada Matlab/Simulink. Tujuannya adalah sebagai proses verifikasi rangkaian ekuivalen R-C untuk dapat merepresentasikan karakteristik dari superkapasitor yang sesuai dengan grafik hasil pengujian.

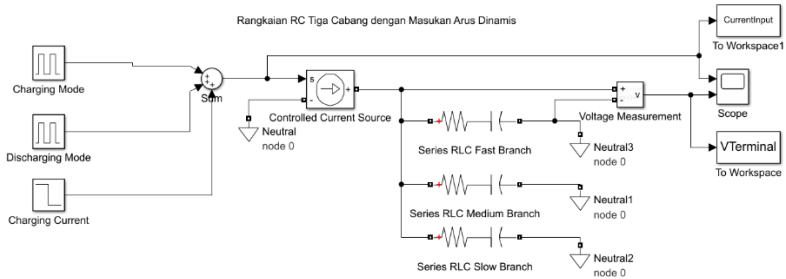
#### 3.3.1 Rangkaian Ekuivalen R-C Tiga Cabang

Rangkaian ekuivalen R-C tiga cabang yang akan dibuat pada Simulink akan disesuaikan dengan referensi [4]. Rangkaian tersebut terdiri dari tiga pasang resistor dan kapasitor serial (R-C) yang dirangkai secara paralel. Untuk metode pengujian *charge-discharge*, rangkaian tersebut memiliki masukan dua buah *unit step* sebagai representasi *Programmable Multi Range DC Power Supply* dan *Programmable DC Electronic Load* serta keluaran berupa sebuah *scope* agar dapat melihat perubahan tegangan terminal superkapasitor sesuai pada gambar 3.8.



**Gambar 3.8** Rangkaian R-C Tiga Cabang Metode *Charge-Discharge*

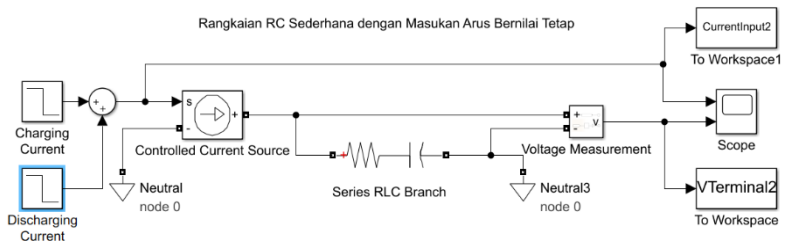
Sedangkan untuk metode pengujian HPPC jumlah masukan pada rangkaian ada tiga buah seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.9 berikut ini.



**Gambar 3. 9** Rangkaian R-C Tiga Cabang Metode HPPC

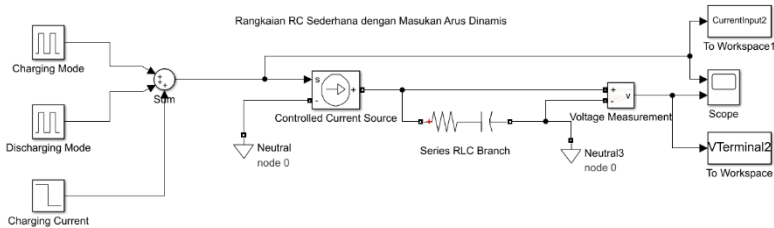
### 3.3.2 Rangkaian Ekuivalen R-C Sederhana

Pada Tugas Akhir ini juga melakukan pemodelan rangkaian ekuivalen superkapasitor menggunakan R-C Sederhana dengan tujuan untuk membandingkan dengan R-C Tiga Cabang. Agar dapat menentukan rangkaian yang memiliki tingkat akurasi yang lebih baik dalam merepresentasikan karakteristik dari superkapasitor. Rangkaian ekuivalen R-C Sederhana terdiri dari satu pasang resistor dan kapasitor serial (R-C). Untuk metode pengujian *charge-discharge*, rangkaian tersebut memiliki masukan dua buah *unit step* sebagai representasi *Programmable Multi Range DC Power Supply* dan *Programmable DC Electronic Load* serta keluaran berupa sebuah *scope* agar dapat melihat perubahan tegangan terminal superkapasitor sesuai pada gambar 3.10.



**Gambar 3. 10** Rangkaian R-C Sederhana Metode *Charge-Discharge*

Sedangkan untuk metode pengujian HPPC, jumlah masukan pada rangkaian ada tiga buah seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.11 berikut ini.



**Gambar 3. 11** Rangkaian R-C Sederhana Metode HPPC

### 3.3.3 Simulasi Metode Pengujian

#### 3.3.3.1 Metode Charge-Discharge

Pada pengujian menggunakan metode *charge-discharge* kondisi superkapasitor tidak bermuatan, superkapasitor telah dihubungkan dengan DC *power supply* dan DC *electronic load* untuk melakukan proses pemuatan dengan arus konstan 8 A dan pelepasan muatannya dengan arus konstan 8 A yang sebelumnya ditahan terlebih dahulu pada waktu yang telah ditentukan. Maka dari itu pemodelan simulasi dari metode *charge-discharge* merupakan pemodelan pengujian superkapasitor yang telah disesuaikan dengan proses pengujian sesungguhnya. Berikut skema model simulasi pengujian *charge-discharge* pada model R-C tiga cabang.

Model sisi masukan simulasi menggunakan metode *charge-discharge* terdapat dua blok *step* yakni berupa gelombang *step* positif sebagai representasi DC *power supply* dan gelombang *step* negatif sebagai representasi DC *electronic load*. Kedua nilai amplitude *step* didapatkan dari nilai arus konstan 8 A pada pengujian yakni 8 pada *charging current* dan -8 pada *discharging current*. Waktu gelombang *step* berjalan atau *step time* didapatkan dari waktu *charging*  $T_c$  dan waktu *discharging*  $T_d$  arus konstan superkapasitor saat pengujian. Fase *sleep* antara fase *charging* dan *discharging* pada pengujian direpresentasikan dengan memberi jeda waktu antara gelombang *step* positif dan gelombang *step* negatif sehingga amplitude gelombang bernilai 0. Berikut tabel 3.6 yang berisi pengaturan profil masukan dua blok *step* simulasi metode *charge-discharge* pada superkapasitor 100 F dan superkapasitor 650 F.

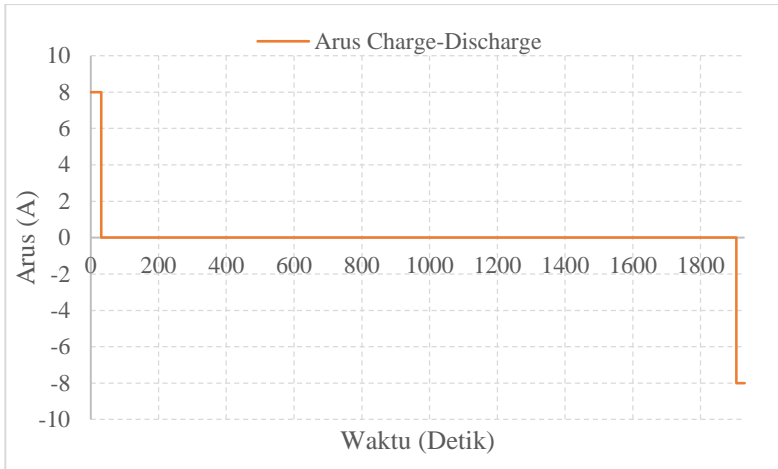
**Tabel 3. 6** Masukan Simulasi Pengujian Metode *Charge-Discharge*

Parameter	Superkapasitor 100 F		Superkapasitor 650 F	
	<i>Charging Step</i>	<i>Discharging Step</i>	<i>Charging Step</i>	<i>Discharging Step</i>
<i>Step Time (s)</i>	30,44	24,5	224,84	182,38
<i>Initial Value</i>	8	0	8	0
<i>Final Value</i>	0	-8	0	-8
<i>Sample Time (s)</i>	0	1898.76	0	2096.5
<i>Simulation Stop Time (s)</i>	1925.88		2300	

Berikut contoh model simulasi arus konstan yang direpresentasikan oleh dua masukan gelombang *step* yang diambil pada bagian keluaran pengujian.

### 3.3.3.2 *Metode HPPC*

Pada pengujian metode HPPC, dengan kondisi superkapasitor bermuatan penuh, superkapasitor yang telah dihubungkan dengan beban melepaskan muatannya dan arus konstan kembali diberikan pada superkapasitor hingga berulang kali secara teratur sehingga membentuk pola *charging-discharging* secara kontinyu yang hanya dibatasi oleh waktu setiap fasenya. Maka dari itu pemodelan simulasi dari metode HPPC merupakan pengembangan dari simulasi metode *charge-discharge* yang dilakukan secara berulang kali dengan batasan waktu yang telah disesuaikan dengan proses pengujian. Berikut gambar 3.12 merupakan skema model simulasi pengujian HPPC pada model R-C tiga cabang.



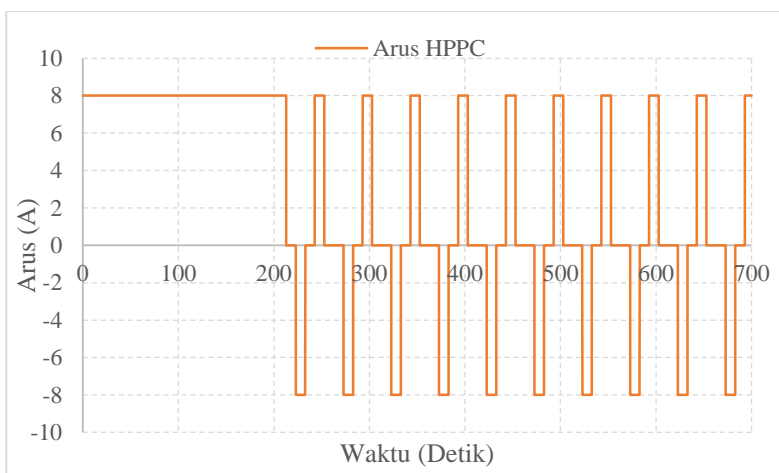
**Gambar 3. 12** Simulasi Grafik Arus Metode *Charge-Discharge*

Pengembangan dari simulasi metode *charge-discharge* pada metode HPPC terletak pada sisi masukan untuk rangkaian ekivalen. Pada fase awal untuk mengisi muatan superkapasitor dengan arus konstan 8 A tetap direpresentasikan oleh blok masukan gelombang *step* positif dengan amplitudo 8 dan *step time* sesuai dengan waktu *charging*  $T_c$  pengujian. Setelah fase pemuatan awal berakhir sesuai *step time*, dilanjutkan dengan fase *discharging-charging* secara kontinyu. Pada fase *discharging-charging* pengujian direpresentasikan oleh dua blok *pulse generator* yang berperan sebagai blok fase *charging* dan fase *discharging*. Nilai amplitudo pada *pulse generator* didapatkan dari arus konstan 8 A selama pengujian, sehingga bernilai 8 dan -8. Pada periode dan *pulse width* didapatkan dari perhitungan waktu fase *sleep* pada saat arus konstan bernilai 8 A (*charging*) dan -8 A (*discharging*). Sedangkan nilai *phase delay* didapatkan dari perhitungan jarak waktu antara saat arus konstan diberikan dengan proses pelepasan muatan ke beban, sehingga *phase delay* merupakan representasi jarak waktu antara bukit dan lembah gelombang dalam satu gelombang pada kedua *pulse generator*. Berikut tabel 3.7 berisi konfigurasi pengaturan profil HPPC pada *pulse generator*.

**Tabel 3. 7** Masukan Simulasi Pengujian Metode HPPC

Parameter	Superkapasitor 100 F	Superkapasitor 650 F		
Fase	<i>Initial Charging</i>			
	<i>Charging Step</i>			
<i>Step Time (s)</i>	29,36	212,86		
<i>Initial Value</i>	8	8		
<i>Final Value</i>	0	0		
<i>Sample Time (s)</i>	0	0		
Fase	<i>HPPC</i>			
	<i>Discharging</i>	<i>Charging</i>	<i>Discharging</i>	<i>Charging</i>
<i>Amplitude</i>	-8	8	-8	8
<i>Periode (s)</i>	50	50	50	50
<i>Pulse Width (% dari periode)</i>	20	20	20	20
<i>Phase Delay (s)</i>	39,36	59,36	222,86	242,86

Dengan pengaturan yang telah dilakukan sesuai dengan konfigurasi pada tabel diatas, berikut grafik masukan yang diberikan pada rangkaian ekivalen yang akan disimulasikan pengujiannya.

**Gambar 3. 13** Simulasi Grafik Arus Metode HPPC

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



## **BAB 4**

### **HASIL DAN PEMBAHASAN**

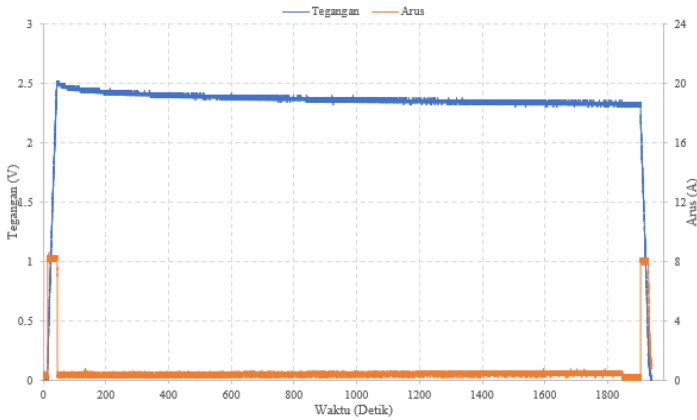
Pada bab ini dibahas hasil pengujian superkapasitor dan hasil simulasi dari karakterisasi superkapasitor dengan pemodelan rangkaian ekivalen R-C tiga cabang dan rangkaian R-C Sederhana menggunakan Simulink/Matlab. Pada proses pengujian dan simulasi terdapat dua jenis metode yaitu *charge-discharge* dan HPPC pada dua superkapasitor yang masing-masing memiliki nilai sebesar 100 F dan 650 F. Nilai arus yang digunakan adalah sebesar 8 A. Kemudian menganalisis kedua hasil tersebut dengan membandingkan grafik perubahan tegangan terminal pada superkapasitor. Hasil dari metode *charge-discharge* akan dibahas pada sub bab 4.1 sedangkan hasil dari metode HPPC akan dijelaskan pada sub bab 4.2

#### **4.1 Metode Charge-Discharge**

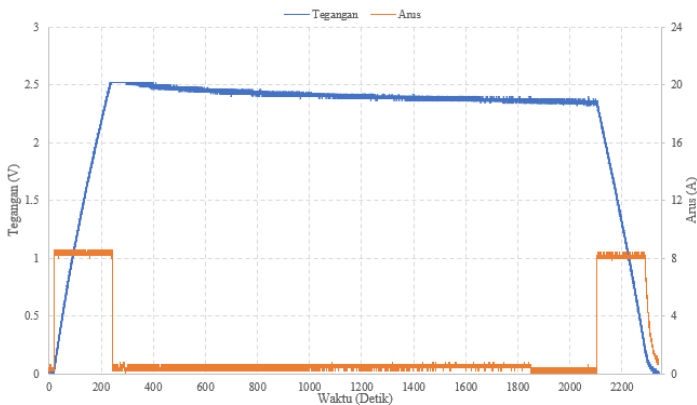
Pada sub bab ini akan dibahas mengenai hasil karakterisasi superkapasitor menggunakan metode *charge-discharge* pada saat pengujian dan simulasi. Ketika akan melakukan pengujian, semua peralatan elektronik pendukung proses pengujian superkapasitor dirangkai dan disusun seperti yang telah dijelaskan pada sub bab 3.2. Urutan pengujian untuk metode *charge-discharge* pada LinkView dapat dilihat pada tabel 3.2. Memastikan tegangan superkapasitor sebelum melakukan pengujian bernilai 0 V. Bentuk grafik tegangan superkapasitor selama proses pengujian telah terekam pada osiloskop dan dapat dipindahkan ke Microsoft Excel agar dapat dengan mudah dilakukan proses analisis dan ekstraksi. Sehingga dapat diperoleh nilai parameter dari rangkaian ekivalen R-C tiga cabang. Analisis bentuk grafik tegangan superkapasitor dan perbandingan bentuk grafik tegangan superkapasitor akan dibahas pada subsub bab 4.1.1 sampai dengan subsub bab 4.1.4

##### **4.1.1 Hasil Pengujian Superkapasitor**

Gambar 4.1 dan 4.2 merupakan grafik tegangan terminal superkapasitor hasil pengujian menggunakan metode *Charge-Discharge* yang direkam oleh osiloskop kemudian ditampilkan kembali pada Microsoft Excel.



**Gambar 4. 1** Tegangan dan Arus Superkapasitor 100 F Hasil Pengujian Metode *Charge-Discharge*



**Gambar 4. 2** Tegangan dan Arus Superkapasitor 650 F Hasil Pengujian Metode *Charge-Discharge*

Setelah diplot kembali pada Microsoft Excel, maka dapat diperoleh nilai-nilai variabel tertentu sesuai tabel 3.5 guna melakukan perhitungan untuk memperoleh parameter internal rangkaian ekivalen superkapasitor R-C tiga cabang. Tabel 4.1 berikut merupakan nilai-nilai variabel yang diperoleh dari grafik tegangan superkapasitor hasil

pengujian menggunakan metode *charge-discharge* menggunakan nilai arus sebesar 8 A yang diplot kembali pada Microsoft Excel.

**Tabel 4. 1** Variabel Hasil Ekstraksi Grafik Tegangan Superkapasitor

Parameter	Variabel	Satuan	Superkapasitor 100 F	Superkapasitor 650 F
$R_f$	$\Delta V_t$	Volt	0,1	0,04
	$\Delta I$	Ampere	8	8
$C_f$	$\Delta Q_1$	Coloumb	243,52	1798,72
	$t_{charge}$	Detik	30,44	224,84
	$\Delta Vt'$	Volt	2,52	2,52
$R_m$	$t_4$	Detik	29,52	217,04
	$t_5$	Detik	30,52	218,04
	$t_{x1}$	Detik	30,02	217,54
	$V_4$	Volt	2,5	2,5
	$V_5$	Volt	2,49	2,49
	$V_{x1}$	Volt	2,52	2,5
$C_m$	$t_6$	Detik	89,52	277,04
	$t_a$	Detik	59,52	247,04
	$V_6$	Volt	2,46	2,49
	$V_a$	Volt	2,48	2,52
$R_s$	$t_7$	Detik	42,71	220,39
	$t_8$	Detik	87,71	265,39
	$t_{x2}$	Detik	65,21	242,89
	$V_7$	Volt	2,48	2,52
	$V_8$	Volt	2,46	2,51
	$V_{x2}$	Volt	2,46	2,52
$C_s$	$t_9$	Detik	1842,71	2020,39
	$t_b$	Detik	942,71	1120,39
	$V_9$	Volt	2,32	2,35
	$V_b$	Volt	2,36	2,4

Setelah mendapatkan nilai-nilai variabel seperti pada tabel 4.1 diatas maka dapat dilakukan perhitungan menggunakan persamaan 2.9 sampai dengan persamaan 2.24 sehingga nilai parameter rangkaian ekuivalen R-C tiga cabang dapat diperoleh.

#### 4.1.1.1 Perhitungan Parameter Superkapasitor 100 F

Proses perhitungan parameter dapat dilakukan ketika semua variabel telah diperoleh atau diketahui. Rangkaian ekivalen R-C terdiri dari tiga cabang. Terdapat dua parameter pada masing-masing cabang/branch. Pada *Fast Branch* terdiri dari  $R_f$  dan  $C_f$ . Kemudian pada *Medium Branch* terdiri dari  $R_m$  dan  $C_m$ . Pada *Slow Branch* terdiri dari  $R_s$  dan  $C_s$ . Berikut merupakan perhitungan untuk mendapatkan parameter rangkaian R-C tiga cabang pada superkapasitor 100 F menggunakan variabel pada tabel 4.1

Perhitungan nilai  $R_f$ :

$$R_f = \frac{\Delta V_t}{\Delta I} = \frac{0,1}{8} = \mathbf{0,0125 \Omega}$$

Perhitungan Nilai  $C_f$ :

$$C_f = \frac{\Delta Q_1}{\Delta V_{t'}} = \frac{243,52}{2,52} = \mathbf{96,6349 F}$$

Perhitungan Nilai  $R_m$ :

$$R_m \cong \frac{V_t|_{t=tx1}}{C_f \left( \frac{dV_t}{dt} \right)} = \frac{V_{x1}}{C_f \left( \frac{V_4 - V_5}{t_5 - t_4} \right)} = \frac{2,52}{96,6349 \times \left( \frac{2,5 - 2,49}{30,52 - 29,52} \right)}$$

$$R_m \cong \mathbf{2,60775 \Omega}$$

Perhitungan Nilai  $C_m$ :

$$C_m \cong \frac{\Delta Q_2}{V_{cf}|_{t=t6} - C_f \left( \frac{dV_t}{dt} \right) |_{t=t6}(R_m)} = \frac{\Delta V_t C_f}{V_{cf}|_{t=t6} - C_f \left( \frac{dV_t}{dt} \right) |_{t=t6}(R_m)}$$

$$C_m \cong \frac{(V_t|_{t=t4} - V_t|_{t=t6}) \times C_f}{V_{cf}|_{t=t6} - C_f \left( \frac{dV_t}{dt} \right) |_{t=t6}(R_m)} = \frac{(V_4 - V_6) \times C_f}{V_6 - C_f \left( \frac{V_a - V_6}{t_6 - t_a} \right) (R_m)}$$

$$C_m \cong \frac{(2,5 - 2,46) \times 96,6349}{2,46 - 96,6349 \left( \frac{2,48 - 2,46}{89,52 - 59,52} \right) (2,60775)} = \mathbf{1,68647 F}$$

Perhitungan Nilai  $R_s$ :

$$R_s \cong \frac{V_{Cf} + V_{Rf}}{C_f \left( \frac{dV_t}{dt} \right)} = \frac{V_t|_{t=tx2}}{C_f \left( \frac{dV_t}{dt} \right)} = \frac{V_{x2}}{C_f \left( \frac{V_7 - V_8}{t_8 - t_7} \right)}$$

$$R_s \cong \frac{2,46}{96,6349 \times \left( \frac{2,48 - 2,46}{87,71 - 42,71} \right)} = \mathbf{57,2774 \Omega}$$

Perhitungan Nilai  $C_s$ :

$$C_s \cong \frac{\Delta Q_3}{V_{cf}|_{t=t_9} - C_f \left( \frac{dVt}{dt} \right) |_{t=t_9} (R_s)} = \frac{\Delta V_t C_f}{V_{cf}|_{t=t_9} - C_f \left( \frac{dVt}{dt} \right) |_{t=t_9} (R_s)}$$

$$C_s \cong \frac{(V_t|_{t=t_7} - V_t|_{t=t_9}) \times C_f}{V_{cf}|_{t=t_9} - C_f \left( \frac{dVt}{dt} \right) |_{t=t_9} (R_s)} = \frac{(V_7 - V_9) \times C_f}{V_9 - C_f \left( \frac{V_b - V_9}{t_9 - t_b} \right) (R_s)}$$

$$C_s \cong \frac{(2,48 - 2,32) \times 96,6349}{2,32 - 96,6349 \left( \frac{2,36 - 2,32}{1842,71 - 942,71} \right) (57,2774)} = \mathbf{7,45496 \text{ F}}$$

#### 4.1.1.2 Perhitungan Parameter Superkapasitor 650 F

Sama dengan perhitungan pada superkapasitor 100 F, rangkaian ekivalen R-C terdiri dari tiga cabang. Terdapat dua parameter pada masing-masing cabang/branch. Pada *Fast Branch* terdiri dari  $R_f$  dan  $C_f$ . Kemudian pada *Medium Branch* terdiri dari  $R_m$  dan  $C_m$ . Pada *Slow Branch* terdiri dari  $R_s$  dan  $C_s$ . Berikut merupakan perhitungan untuk mendapatkan parameter Rangkaian R-C tiga cabang pada superkapasitor 650 F menggunakan variabel pada tabel 4.1

Perhitungan  $R_f$ :

$$R_f = \frac{\Delta Vt}{\Delta I} = \frac{0,04}{8} = \mathbf{0,005 \Omega}$$

Perhitungan  $C_f$ :

$$C_f = \frac{\Delta Q_1}{\Delta V_{t_r}} = \frac{1798,72}{2,52} = \mathbf{713,778 \text{ F}}$$

Perhitungan  $R_m$ :

$$R_m \cong \frac{V_t|_{t=t_{x1}}}{C_f \left( \frac{dVt}{dt} \right)} = \frac{V_{x1}}{C_f \left( \frac{V_4 - V_5}{t_5 - t_4} \right)} = \frac{2,5}{713,778 \times \left( \frac{2,5 - 2,49}{218,04 - 217,04} \right)}$$

$$R_m \cong \mathbf{0,35025 \Omega}$$

Perhitungan  $C_m$ :

$$C_m \cong \frac{\Delta Q_2}{V_{cf}|_{t=t_6} - C_f \left( \frac{dVt}{dt} \right) |_{t=t_6} (R_m)} = \frac{\Delta V_t C_f}{V_{cf}|_{t=t_6} - C_f \left( \frac{dVt}{dt} \right) |_{t=t_6} (R_m)}$$

$$C_m \cong \frac{(V_t|_{t=t_4} - V_t|_{t=t_6}) \times C_f}{V_{cf}|_{t=t_6} - C_f \left( \frac{dVt}{dt} \right) |_{t=t_6} (R_m)} = \frac{(V_4 - V_6) \times C_f}{V_6 - C_f \left( \frac{V_a - V_6}{t_6 - t_a} \right) (R_m)}$$

$$C_m \cong \frac{(2,5 - 2,49) \times 713,778}{2,49 - 713,778 \left( \frac{2,52 - 2,49}{277,04 - 247,04} \right) (0,35025)} = \mathbf{3,18651 F}$$

Perhitungan  $R_s$ :

$$R_s \cong \frac{V_{Cf} + V_{Rf}}{C_f \left( \frac{dVt}{dt} \right)} = \frac{V_t|_{t=t_{x2}}}{C_f \left( \frac{dVt}{dt} \right)} = \frac{V_{x2}}{C_f \left( \frac{V_7 - V_8}{t_8 - t_7} \right)}$$

$$R_s \cong \frac{2,52}{713,778 \times \left( \frac{2,52 - 2,51}{265,39 - 220,39} \right)} = \mathbf{15,8873 \Omega}$$

Perhitungan  $C_s$ :

$$C_s \cong \frac{\Delta Q_3}{V_{Cf}|_{t=t_9} - C_f \left( \frac{dVt}{dt} \right) |_{t=t_9} (R_s)} = \frac{\Delta V_t C_f}{V_{Cf}|_{t=t_9} - C_f \left( \frac{dVt}{dt} \right) |_{t=t_9} (R_s)}$$

$$C_s \cong \frac{(V_t|_{t=t_7} - V_t|_{t=t_9}) \times C_f}{V_{Cf}|_{t=t_9} - C_f \left( \frac{dVt}{dt} \right) |_{t=t_9} (R_s)} = \frac{(V_7 - V_9) \times C_f}{V_9 - C_f \left( \frac{V_b - V_9}{t_9 - t_b} \right) (R_s)}$$

$$C_s \cong \frac{(2,52 - 2,35) \times 713,778}{2,35 - 713,778 \left( \frac{2,4 - 2,35}{2020,39 - 1120,39} \right) (15,8873)}$$

$$C_s \cong \mathbf{70,5478 F}$$

Tabel 4.2 berikut ini merupakan rangkuman nilai-nilai parameter superkapasitor 100 F dan Superkapasitor 650 F pada rangkaian ekivalen R-C tiga cabang yang diperoleh dari ekstraksi grafik tegangan terminal superkapasitor hasil pengujian.

**Tabel 4. 2** Parameter Superkapasitor pada Rangkaian R-C Tiga Cabang dengan Waktu *sleep* 30 menit

Parameter	Superkapasitor 100 F	Superkapasitor 650 F
$R_f$	0,0125 $\Omega$	0,005 $\Omega$
$C_f$	96,6349 F	713,778 F
$R_m$	2,60775 $\Omega$	0,35025 $\Omega$
$C_m$	1,68647 F	3,18651 F
$R_s$	57,2774 $\Omega$	15,8873 $\Omega$
$C_s$	7,45496 F	70,5478 F

Proses pengujian menggunakan waktu *sleep* yang berbeda juga dilakukan untuk mengetahui korelasi antara durasi *sleep* dengan nilai parameter yang dihasilkan. Waktu *sleep* yang digunakan adalah selama 15 menit dan 60 menit masing-masing pada superkapasitor 100 F dan Superkapasitor 650 F. Nilai arus yang digunakan tetap sama yaitu sebesar 8 A dengan nilai yang konstan. Tabel (4.3) dan (4.4) berikut merupakan nilai parameter yang diperoleh ketika menggunakan waktu *sleep* 15 menit dan 60 menit.

**Tabel 4. 3** Parameter Superkapasitor pada Rangkaian R-C Tiga Cabang dengan Waktu *sleep* 15 menit

Parameter	Superkapasitor 100 F	Superkapasitor 650 F
$R_f$	0,005 $\Omega$	0,03 $\Omega$
$C_f$	91,619 F	599,492 F
$R_m$	2,72869 $\Omega$	0,39033 $\Omega$
$C_m$	1,93561 F	2,66204 F
$R_s$	30,2066 $\Omega$	8,78243 $\Omega$
$C_s$	5,2007 F	40,5977 F

**Tabel 4. 4** Parameter Superkapasitor pada Rangkaian R-C Tiga Cabang dengan Waktu *sleep* 60 menit

Parameter	Superkapasitor 100 F	Superkapasitor 650 F
$R_f$	0,0075 $\Omega$	0,0325 $\Omega$
$C_f$	93,9048 F	640,762 F
$R_m$	2,68357 $\Omega$	0,3808 $\Omega$
$C_m$	1,37422 F	5,67716 F
$R_s$	59,9011 $\Omega$	17,1359 $\Omega$
$C_s$	5,83001 F	37,0383 F

Berdasarkan kedua tabel diatas, nilai parameter yang diperoleh antara waktu *sleep* 15 menit, 30 menit, dan 60 menit memiliki besar nilai parameter yang berbeda-beda pada setiap waktu *sleep*-nya. Ketika proses *charging* pada *fast branch* diperoleh hasil yang berbeda-beda meskipun menggunakan nilai arus yang sama. Hal ini mengakibatkan nilai kapasitansi pada *fast branch* dan *medium branch* terdapat sedikit

perbedaan nilai. Selain itu berdasarkan persamaan (2.22), durasi *sleep* sangat berpengaruh terhadap perhitungan  $C_s$ . Nilai kapasitansi pada *slow branch* memiliki perbedaan pada setiap durasi *sleep* yang berbeda. Semakin bertambah kapasitas dari superkapasitor maka akan semakin besar perbedaan nilai pada  $C_s$ . Sehingga besar nilai parameter dari rangkaian R-C tiga cabang terutama pada *slow branch* bergantung pada waktu *sleep* yang digunakan ketika proses pengujian superkapasitor.

#### 4.1.2 Perbandingan Hasil Pengujian dan Hasil Simulasi Rangkaian R-C Tiga Cabang

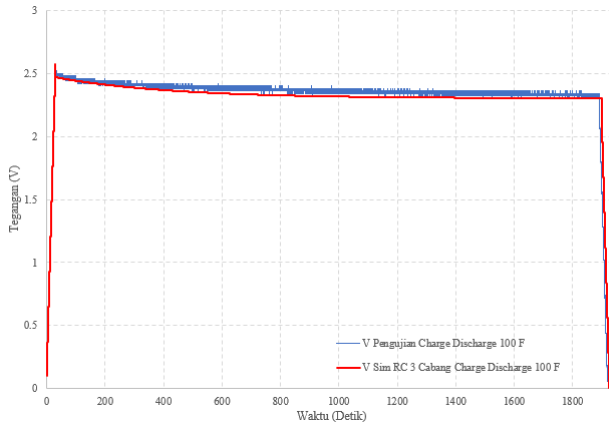
Untuk mendapatkan grafik tegangan superkapasitor pada Simulink, maka terlebih dahulu membuat rangkaian ekivalen seperti pada gambar 3.8 dan memberi nilai pada masukan rangkaian sesuai dengan tabel 3.6. Sedangkan nilai parameter superkapasitor dimasukkan sesuai dengan nilai pada tabel 4.2. Proses simulasi dilakukan sebagai verifikasi dari nilai parameter yang telah diperoleh dari proses ekstraksi grafik tegangan superkapasitor hasil pengujian. Grafik tegangan superkapasitor hasil dari simulasi diharapkan dapat menyerupai bentuk grafik tegangan superkapasitor hasil pengujian.

Setelah memperoleh grafik tegangan superkapasitor dari proses pengujian dan simulasi, maka kedua grafik tersebut akan dibandingkan untuk dianalisis tingkat *error* grafik tegangan superkapasitor hasil simulasi terhadap grafik tegangan superkapasitor hasil pengujian menggunakan perhitungan *root mean square error* (RMSE). Gambar 4.3 dan 4.4 merupakan grafik perbandingan pada superkapasitor 100 F dan 650 F.

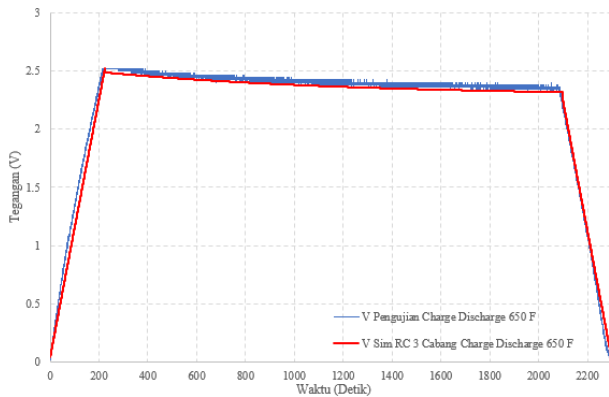
Grafik tegangan superkapasitor 100 F dan 650 F hasil pengujian dan simulasi apabila diamati secara visual bahwa secara keseluruhan model simulasi telah mendekati karakter superkapasitor sesungguhnya. Dibuktikan dengan berhimpitnya grafik hasil pengujian dan grafik hasil simulasi. Fase *short term* atau ketika proses *charging* yang direpresentasikan oleh *fast branch* mencapai tegangan puncak pada nilai 2,52 V yang merupakan tegangan nominal terukur dari proses pengujian masing-masing pada superkapasitor 100 F dan 650 F. Sedangkan pada grafik simulasi tegangan puncak dicapai pada nilai 2,57 V untuk superkapasitor 100 F dan 2,52 V untuk superkapasitor 650 F. Pada fase *medium* sampai *long term* yang direpresentasikan masing-masing oleh *medium branch* dan *slow branch* pada grafik tegangan superkapasitor 100 F dan 650 F hasil pengujian dengan hasil simulasi letaknya berhimpitan



satu sama lain. Sehingga mampu merepresentasikan fenomena *drop* tegangan.



**Gambar 4. 3** Perbandingan Tegangan Superkapasitor 100 F Hasil Pengujian dan Simulasi pada Rangkaian R-C Tiga Cabang Metode *Charge-Discharge*



**Gambar 4. 4** Perbandingan Tegangan Superkapasitor 650 F Hasil Pengujian dan Simulasi pada Rangkaian R-C Tiga Cabang Metode *Charge-Discharge*

Untuk mengevaluasi perbandingan nilai simulasi dengan hasil pengujian, maka dilakukan perhitungan nilai *root mean square error* (RMSE) dengan persamaan (4.1) sebagai berikut:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (4.1)$$

Keterangan:

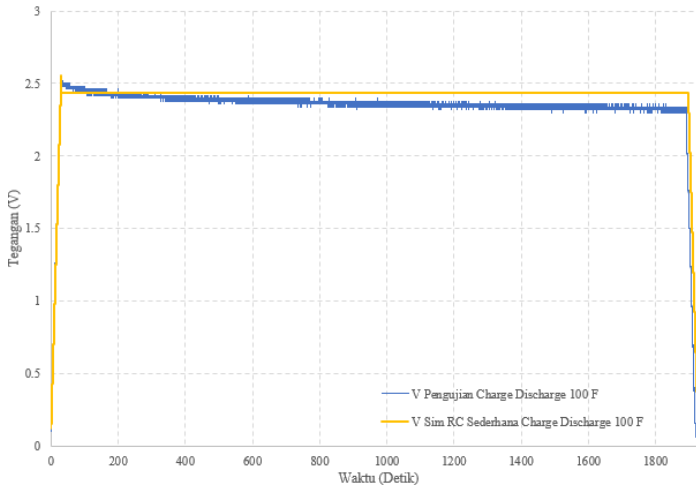
- $P_i$  = Nilai koordinat grafik tegangan superkapasitor hasil pengujian
- $O_i$  = Nilai koordinat grafik tegangan superkapasitor hasil simulasi
- $n$  = Jumlah data koordinat grafik

Diperoleh nilai RMSE pada superkapasitor 100 F sebesar (0,072) dan pada superkapasitor 650 F sebesar (0,059). Sehingga didapatkan rangkaian R-C tiga cabang dengan superkapasitor 650 F lebih akurat daripada superkapasitor 100 F.

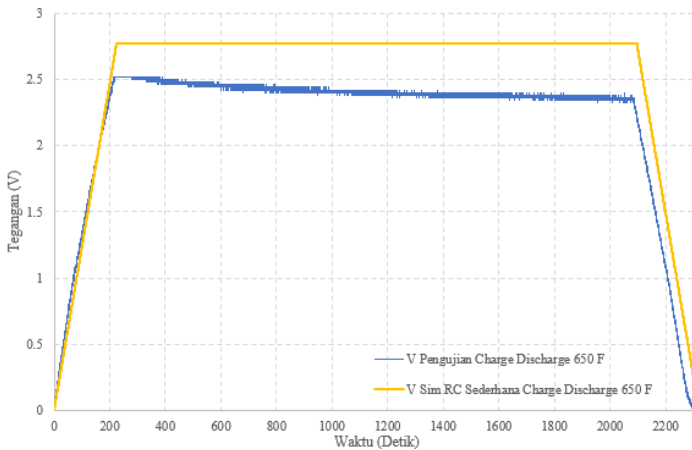
#### 4.1.3 Perbandingan Hasil Pengujian dan Hasil Simulasi Rangkaian R-C Sederhana

Sesuai penjelasan pada subsub bab 3.3.2 dan subsubsub bab 3.3.3.1, maka dilakukan simulasi untuk mendapatkan grafik tegangan superkapasitor pada Simulink. Terlebih dahulu membuat rangkaian ekuivalen seperti pada gambar 3.10 dan memberi nilai pada masukan rangkaian sesuai dengan tabel 3.6. Sedangkan nilai parameter superkapasitor dimasukkan sesuai dengan nilai pada *datasheet* masing-masing superkapasitor untuk nilai kapasitansi nominal dan nilai ESR atau dapat merujuk pada tabel 3.1. Proses simulasi ini bertujuan untuk membandingkan rangkaian R-C sederhana dengan rangkaian R-C tiga cabang terhadap hasil pengujian superkapasitor.

Perbandingan pada Rangkaian R-C sederhana dilakukan untuk mengetahui rangkaian R-C sederhana dapat merepresentasikan karakter dari superkapasitor terutama ketika dibandingkan dengan grafik tegangan superkapasitor pada proses pengujian. Proses perbandingan grafik tegangan superkapasitor hasil simulasi pada rangkaian R-C sederhana terhadap grafik tegangan superkapasitor dibantu dengan menggunakan perhitungan RMSE. Gambar 4.5 dan 4.6 menunjukkan perbandingan tegangan superkapasitor 100 F dan 650 F dari hasil pengujian dengan simulasi rangkaian R-C sederhana.



**Gambar 4. 5** Perbandingan Tegangan Superkapasitor 100 F Hasil Pengujian dan Simulasi pada Rangkaian R-C Sederhana Metode *Charge-Discharge*



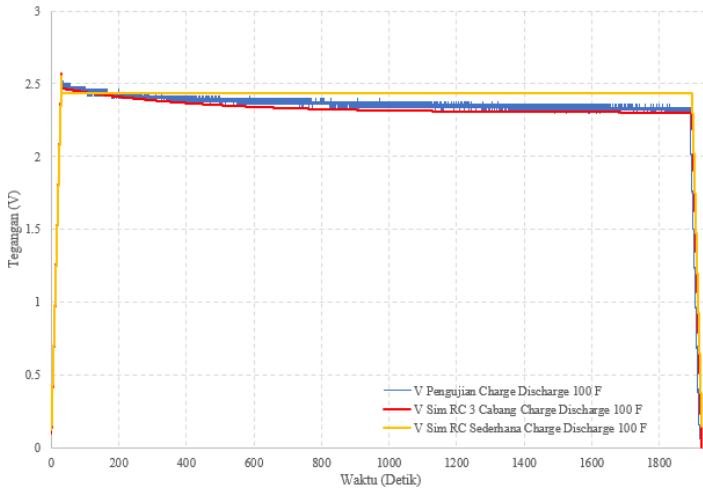
**Gambar 4. 6** Perbandingan Tegangan Superkapasitor 650 F Hasil Pengujian dan Simulasi pada Rangkaian R-C Sederhana Metode *Charge-Discharge*

Apabila diamati secara visual, grafik tegangan pada superkapasitor 100 F yang dimodelkan pada rangkaian R-C sederhana terlihat lebih berhimpitan dengan grafik tegangan hasil pengujian. Apabila dibandingkan dengan grafik tegangan superkapasitor 650 F yang dimodelkan pada rangkaian R-C sederhana yang posisinya berada di atas grafik tegangan hasil pengujian. Ketika fase *charging*, superkapasitor memiliki nilai puncak tegangan yang berbeda antara hasil pengujian superkapasitor 100 F yaitu sebesar 2,52 V. Sedangkan hasil simulasi pada rangkaian R-C sederhana diperoleh sebesar 2,55 V. Selain itu, nilai puncak tegangan hasil pengujian superkapasitor 650 F diperoleh sebesar 2,52 V. Sedangkan hasil simulasi pada rangkaian R-C sederhana sebesar 2,77 V. Grafik hasil simulasi superkapasitor 100 F lebih mendekati grafik hasil pengujian. Pada fase *medium* dan *long term* yang seharusnya dimodelkan oleh *medium branch* dan *slow branch* tidak dapat dimodelkan oleh rangkaian R-C Sederhana. Hal ini disebabkan karena rangkaian R-C sederhana hanya memiliki satu cabang. Sehingga grafik tegangan hasil simulasi pada rangkaian R-C sederhana pada superkapasitor 100 F dan 650 F masing-masing tidak dapat merepresentasikan tren turunnya tegangan sesuai dengan grafik tegangan superkapasitor hasil pengujian.

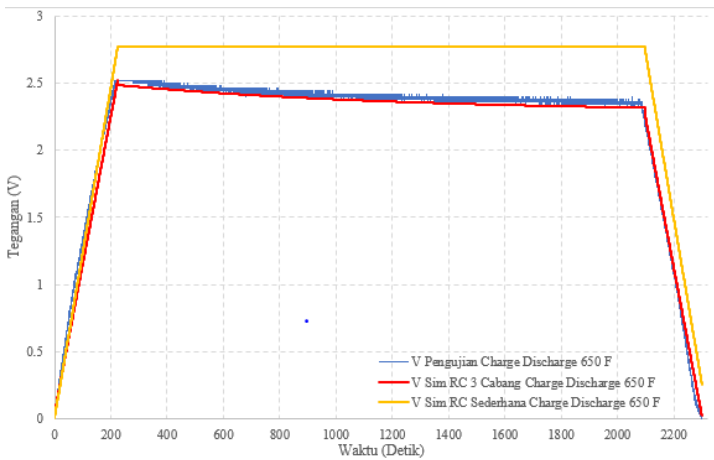
Selain itu nilai RMSE pada grafik tegangan superkapasitor 100 F diperoleh sebesar (0,108) sedangkan *error* pada grafik tegangan superkapasitor 650 F diperoleh sebesar (0,351).

#### **4.1.4 Perbandingan Hasil Pengujian dan Semua Hasil Simulasi**

Perbandingan dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui rangkaian ekuivalen yang dapat merepresentasikan karakteristik superkapasitor dengan baik. Grafik tegangan hasil pengujian superkapasitor merupakan grafik referensi atau acuan untuk mengetahui tingkat kesalahan atau *error* dari setiap rangkaian ekuivalen. Gambar 4.7 dan 4.8 menunjukkan perbandingan grafik tegangan pada superkapasitor 100 F dan 650 F.



**Gambar 4. 7** Perbandingan Tegangan Superkapasitor 100 F Metode *Charge-Dishcarge*



**Gambar 4. 8** Perbandingan Tegangan Superkapasitor 650 F Metode *Charge-Discharge*

Pada grafik superkapasitor 100 F dan superkapasitor 650 F hasil pengujian dan hasil simulasi apabila diamati secara visual bahwa rangkaian R-C tiga cabang lebih mendekati karakter superkapasitor sesungguhnya daripada rangkaian R-C sederhana, dibuktikan dengan lebih berhimpitnya kurva tegangan hasil pengujian dengan hasil simulasi pada rangkaian R-C tiga cabang daripada dengan hasil simulasi pada rangkaian R-C sederhana.

Kemudian rangkaian R-C sederhana tidak dapat menunjukkan kejadian *drop* atau penurunan tegangan selama mode *sleep* pada saat proses pengujian karena parameternya hanya terdiri dari satu buah kapasitor dan satu buah resistor ekivalen. Sehingga hanya memiliki satu *time constant*. Sedangkan pada rangkaian R-C tiga cabang memiliki tiga pasang resistansi dan kapasitansi yang disusun seri dan dibedakan menurut *time constant* nya yang berarti dapat merepresentasikan perilaku perubahan nilai tegangan dalam jangka waktu yang lebih lama. Kemudian proses untuk memperoleh parameter-parameter pada rangkaian R-C tiga cabang juga melalui proses ekstraksi yang nilainya diambil sepanjang grafik hasil pengujian sehingga dapat lebih merepresentasikan karakter dari superkapasitor.

Selain itu besar nilai RMSE yang diperoleh menunjukkan bahwa rangkaian R-C tiga cabang memiliki nilai *error* yang lebih kecil terhadap grafik tegangan superkapasitor hasil pengujian apabila dibandingkan dengan hasil simulasi menggunakan rangkaian R-C sederhana. Tabel 4.5 berikut merupakan rangkuman nilai RMSE selama menggunakan metode *charge-discharge*.

**Tabel 4. 5** Rangkuman Nilai RMSE pada metode *charge-discharge*

Superkapasitor	Rangkaian R-C Tiga Cabang		Rangkaian R-C Sederhana	
	RMSE	Persentase	RMSE	Persentase
100 F	0,072	7,2 %	0,108	10,8 %
650 F	0,059	5,9 %	0,351	35,1 %

Selama proses pengujian metode *charge-discharge* berlangsung, superkapasitor mengalami proses transfer energi. Proses masuknya energi  $E_{in}$  pada fase *charging* berasal dari sumber arus konstan dan dikeluarkannya energi  $E_{out}$  pada fase *discharging* menuju beban. Proses

transfer energi tidak hanya berlangsung pada superkapasitor saat pengujian berlangsung, namun juga terjadi pada rangkaian ekivalen saat dilakukan simulasi. Data pengukuran tegangan dan arus dari proses pengujian dan simulasi dihitung melalui persamaan energi berikut.

$$E = \int P(t)dt = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n P_n \Delta t \quad (4.2)$$

Sesuai dengan persamaan (4.2) didapatkan bahwa daya P dalam perhitungan memiliki fungsi waktu maka besar energi E sama dengan luas area kurva daya dalam fungsi waktu  $P(t)$ . Selain itu dengan  $\Delta t$  sebagai interval waktu *sampling* sebesar 0,02 s, maka penggunaan integral dapat didekati melalui persamaan penjumlahan data perkalian antara tegangan dan arus dari proses pengujian dan simulasi.

Sehingga dengan menggunakan persamaan (4.2) maka diperoleh perhitungan efisiensi energi saat proses *charge* dan *discharge* berlangsung dihasilkan perbandingan besar energi saat *discharging*  $E_{out}$  terhadap energi *charging*  $E_{in}$  dan pada proses pengujian sesungguhnya dan pemodelan dengan rangkaian R-C tiga cabang dan R-C sederhana seperti berikut

**Tabel 4. 6** Efisiensi Energi saat Fase *Charging-Discharging* Berlangsung pada Metode *Charge-Discharge*

Energi		$E_{in}$ (J)	$E_{out}$ (J)	Efisiensi Energi ( $E_{out}/E_{in}$ )	Persentase (%)
Pengujian	Superkapasitor 100 F	355,82	253,54	0,7125	71,25
	Superkapasitor 650 F	2658,54	1967,16	0,7399	73,99
Simulasi R-C Tiga Cabang	Superkapasitor 100 F	326,01	238,91	0,7328	73,28
	Superkapasitor 650 F	2312,13	1864,48	0,8064	80,64
Simulasi R-C Sederhana	Superkapasitor 100 F	325,93	267,14	0,8196	81,96
	Superkapasitor 650 F	2500,05	2456,17	0,9824	98,24

Maka berdasarkan hasil besar efisiensi energi diatas selama proses *charging-discharging* berlangsung, didapatkan bahwa terjadi penurunan nilai energi antara fase *charging* dengan *discharging*. Hal ini dikarenakan terjadi proses perpindahan muatan pada superkapasitor yang masih terus berlangsung pada pori-pori dari elektroda superkapasitor hingga menghasilkan *losses* berupa  $I^2R$ , sesuai dengan fenomena *drop* tegangan yang terjadi. Proses tersebut juga dialami pada rangkaian ekivalen R-C tiga cabang dengan perpindahan muatan dari percabangan pertama menuju percabangan kedua dan ketiga, dengan didapatkan nilai persentase efisiensi energi dari model R-C tiga cabang pada Superkapasitor 100 F sebesar 73,28% dan Superkapasitor 650 F sebesar 80,64% yang mendekati nilai efisiensi energi superkapasitor pengujian, yakni 71,25% pada pengujian superkapasitor 100 F dan 73,99% pada pengujian superkapasitor 650 F. Namun, pada model R-C sederhana tidak dilakukan pemodelan untuk fase *medium-long* karena hanya terdiri dari satu *time constant* sehingga nilai efisiensi energinya lebih besar dari hasil pengujian, yakni pada Superkapasitor 100 F sebesar 81,96% dan Superkapasitor 650 F sebesar 98,24%.

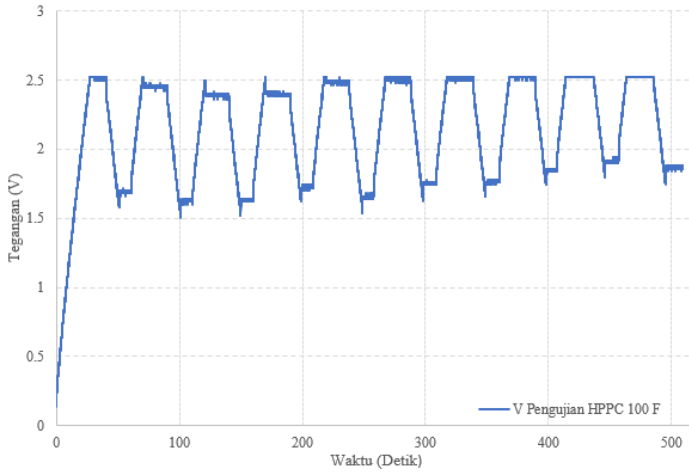
## 4.2 Metode HPPC

Pada sub bab ini akan dibahas mengenai hasil karakterisasi superkapasitor menggunakan metode HPPC pada saat pengujian dan simulasi menggunakan nilai arus sebesar 8 A. Untuk melakukan pengujian menggunakan metode HPPC, semua peralatan elektronik pendukung proses pengujian superkapasitor dirangkai dan disusun seperti yang telah dijelaskan pada sub bab 3.2. Urutan pengujian untuk metode HPPC pada LinkView dapat dilihat pada tabel 3.3. Bentuk grafik tegangan superkapasitor selama proses pengujian telah terekam pada osiloskop dan dapat dipindahkan ke Microsoft Excel agar dapat dengan mudah dilakukan proses analisis. Hasil analisis dari bentuk grafik tegangan superkapasitor dan perbandingan bentuk grafik tegangan superkapasitor akan dibahas pada subsub bab 4.2.1 sampai 4.2.4

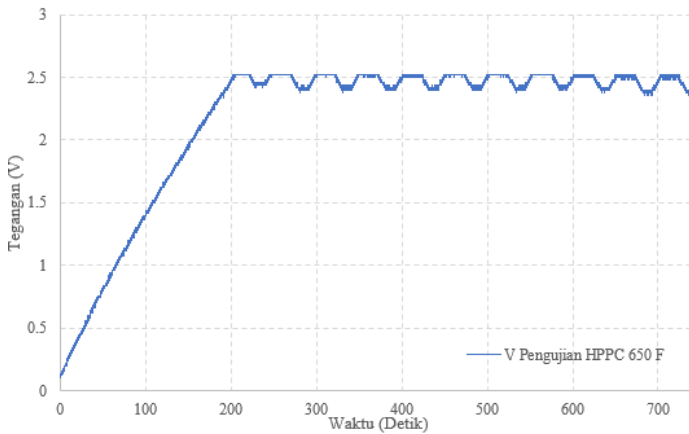
### 4.2.1 Hasil Pengujian Superkapasitor

Gambar 4.9 dan 4.10 merupakan grafik tegangan terminal superkapasitor menggunakan metode HPPC yang direkam oleh osiloskop kemudian ditampilkan kembali pada Microsoft Excel.





**Gambar 4. 9** Tegangan Superkapasitor 100 F Hasil Pengujian Metode HPPC



**Gambar 4. 10** Tegangan Superkapasitor 650 F Hasil Pengujian Metode HPPC

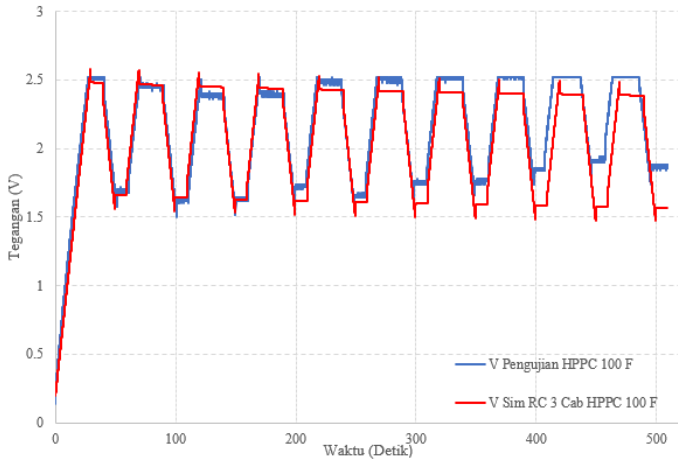
Bentuk grafik tegangan superkapasitor 100 F hasil pengujian memiliki nilai tegangan maksimal pada 2,52 V dan apabila ditinjau secara

visual nilai puncak atau maksimalnya selalu berubah-ubah setiap proses *charging*. Nilai paling minimum pada lembahnya juga turut berubah pada setiap proses *discharging*. Namun keseluruhan cenderung mengalami penurunan tegangan. Sedangkan pada grafik tegangan superkapasitor 650 F hasil pengujian memiliki nilai maksimal pada 2,52 V dan apabila ditinjau secara visual nilai puncak atau maksimalnya cenderung tetap pada setiap proses *charging*. Nilai paling minimum pada lembahnya juga memiliki nilai yang berubah-ubah pada setiap proses *discharging*.

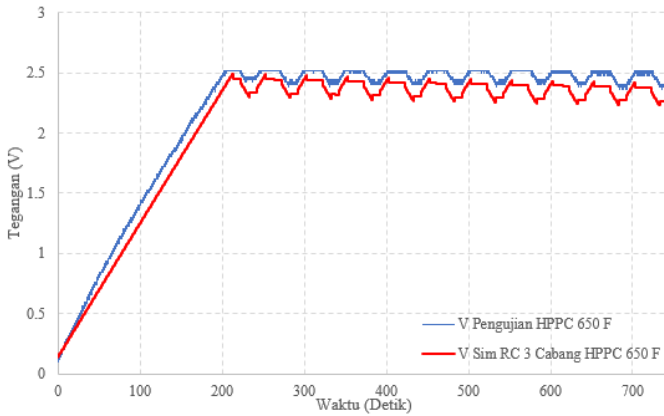
#### **4.2.2 Perbandingan Hasil Pengujian dan Hasil Simulasi R-C Tiga Cabang**

Proses simulasi pada rangkaian R-C tiga cabang dilakukan untuk memperoleh grafik tegangan dari superkapasitor. Untuk mendapatkan grafik tegangan superkapasitor pada Simulink, maka terlebih dahulu membuat rangkaian ekivalen seperti pada gambar 3.9 dan memberi nilai pada masukan rangkaian sesuai dengan tabel 3.7. Sedangkan nilai parameter superkapasitor dimasukkan sesuai dengan nilai pada tabel 4.2 yang diperoleh dari metode *charge-discharge*.

Setelah memperoleh grafik tegangan superkapasitor dari proses pengujian dan simulasi, maka kedua grafik tersebut akan dibandingkan untuk dianalisis karakter dari tegangannya ketika dilalui arus dinamik. Selain itu dapat diketahui pula kedekatan karakteristik tegangan antara rangkaian R-C tiga cabang dengan pengujian superkapasitor sesungguhnya dengan bantuan perhitungan *root mean square error* (RMSE). Gambar 4.11 dan 4.12 merupakan grafik perbandingan pada superkapasitor 100 F dan 650 F



**Gambar 4. 11** Perbandingan Tegangan Superkapasitor 100 F Hasil Pengujian dan Simulasi pada Rangkaian R-C Tiga Cabang Metode HPPC



**Gambar 4. 12** Perbandingan Tegangan Superkapasitor 650 F Hasil Pengujian dan Simulasi pada Rangkaian R-C Tiga Cabang Metode HPPC

Grafik tegangan superkapasitor 100 F dan 650 F hasil pengujian dan simulasi apabila diamati secara visual bahwa secara keseluruhan model simulasi telah mendekati karakter superkapasitor sesungguhnya. Pada grafik tegangan superkapasitor 100 F hasil pengujian, nilai tegangan maksimal adalah sebesar 2,52 V. Akan tetapi nilai maksimal tersebut akan berubah pada setiap proses *charging*. Sedangkan pada hasil simulasi nilai maksimal ialah sebesar 2,58 V. Akan tetapi nilai maksimal tersebut akan terus menurun pada setiap proses *charging*.

Pada grafik tegangan superkapasitor 650 F hasil pengujian, nilai tegangan maksimal adalah sebesar 2,52 V. Nilai tersebut akan cenderung tidak berubah pada setiap proses *charging*. Sedangkan pada hasil simulasi nilai maksimal ialah sebesar 2,49 V. Akan tetapi nilai maksimal tersebut akan terus menurun pada setiap proses *charging*.

Pada perhitungan RMSE, diperoleh *error* sebesar (0,1508) pada simulasi superkapasitor 100 F dan *error* sebesar (0,117) pada simulasi superkapasitor 650 F

Selama proses pengujian metode HPPC berlangsung, superkapasitor mengalami proses siklus transfer energi. Satu siklus berarti satu kali proses *charging* dan satu kali proses *discharging*. Nilai arus yang digunakan sebesar 8 A. Proses transfer energi yang diamati adalah pada 5 siklus pertama masing-masing pada simulasi superkapasitor 100 F dan superkapasitor 650 F pada rangkaian R-C tiga cabang. Hasil selengkapannya dapat dilihat pada tabel 4.7 dan tabel 4.8 berikut.

**Tabel 4. 7** Besaran Efisiensi Energi Superkapasitor 100 F pada Rangkaian R-C Tiga Cabang

Energi	Pengujian		R-C Tiga Cabang	
	$E_{in}$ (J)	$E_{out}$ (J)	$E_{in}$ (J)	$E_{out}$ (J)
Siklus 1	171,37	165,37	173,17	156,24
Siklus 2	167,19	147,56	171,97	155,12
Siklus 3	168,46	136,12	170,91	154,14
Siklus 4	188,75	168,07	169,97	153,28
Siklus 5	162,76	157,01	169,15	152,51
Jumlah	858,54	774,15	855,17	771,29
Rata-rata	171,7	154,83	171,03	154,26
Persentase (%)	90,17		90,19	

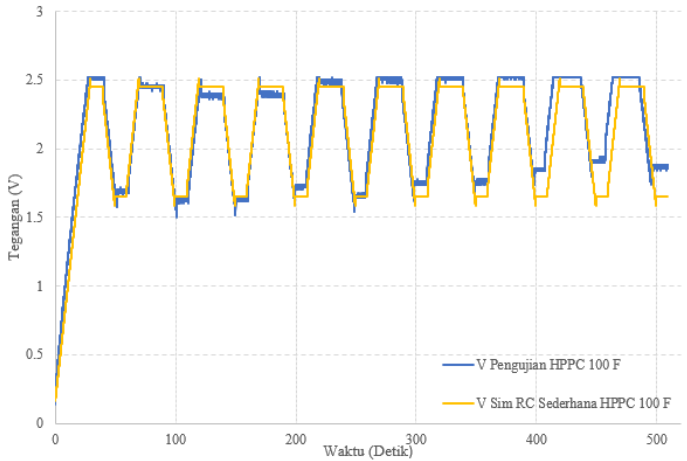
**Tabel 4. 8** Besaran Efisiensi Energi Superkapasitor 650 F pada Rangkaian R-C Tiga Cabang

Energi	Pengujian		R-C Tiga Cabang	
	$E_{in}$ (J)	$E_{out}$ (J)	$E_{in}$ (J)	$E_{out}$ (J)
Siklus 1	240,73	219,02	194,44	187,69
Siklus 2	264,45	229,01	193,75	187,02
Siklus 3	234,77	247,45	193,1	186,38
Siklus 4	235,39	223,57	192,47	185,78
Siklus 5	211,41	219,84	191,88	185,2
Jumlah	1186,75	1138,89	965,64	932,07
Rata-rata	237,35	227,78	193,13	186,41
Persentase (%)	95,96		96,52	

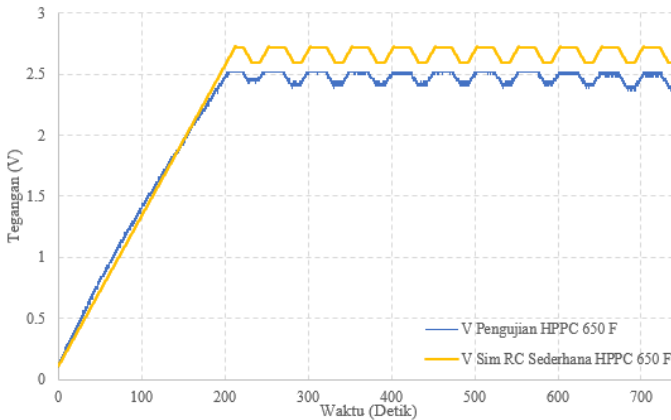
#### 4.2.3 Perbandingan Hasil Pengujian dan Hasil Simulasi R-C Sederhana

Sesuai penjelasan pada subsub bab 3.3.2 dan subsubsub bab 3.3.3.2, maka dilakukan simulasi pada rangkaian R-C sederhana. Untuk mendapatkan grafik tegangan superkapasitor pada Simulink, maka terlebih dahulu membuat rangkaian ekivalen seperti pada gambar 3.11 dan memberi nilai pada masukan rangkaian sesuai dengan tabel 3.7. Sedangkan nilai parameter superkapasitor dimasukkan sesuai dengan nilai pada *datasheet* masing-masing superkapasitor untuk nilai kapasitansi nominal dan nilai ESR atau dapat merujuk pada tabel 3.1.

Perbandingan pada Rangkaian R-C sederhana dilakukan untuk mengetahui rangkaian R-C sederhana dapat merepresentasikan karakter dari superkapasitor terutama sama seperti hasil dari proses pengujian superkapasitor menggunakan metode HPPC. Selain itu juga dilakukan perhitungan RMSE untuk mengetahui tingkat *error* terhadap hasil pengujian superkapasitor. Gambar 4.13 dan 4.14 menunjukkan perbandingan tegangan superkapasitor 100 F dan 650 F dari hasil pengujian dengan simulasi pada rangkaian R-C sederhana



**Gambar 4. 13** Perbandingan Tegangan Superkapasitor 100 F Hasil Pengujian dan Simulasi pada Rangkaian R-C Sederhana Metode HPPC



**Gambar 4. 14** Perbandingan Tegangan Superkapasitor 650 F Hasil Pengujian dan Simulasi pada Rangkaian R-C Sederhana Metode HPPC

Apabila diamati secara visual, grafik tegangan pada superkapasitor 100 F yang dimodelkan pada rangkaian R-C sederhana terlihat lebih berhimpitan dengan grafik tegangan hasil pengujian dibandingkan dengan

grafik tegangan superkapasitor 650 F yang dimodelkan pada rangkaian R-C sederhana yang posisinya berada diatas grafik hasil pengujian. Nilai maksimal tegangan pada superkapasitor 100 F dan 650 F masing-masing bernilai sebesar 2.52 V. Sedangkan nilai tegangan maksimal pada hasil simulasi superkapasitor 100 F ialah sebesar 2,45 V dan pada superkapasitor 650 F sebesar 2,72 V. Nilai tegangan maksimal dan minimal superkapasitor hasil simulasi pada rangkaian R-C sederhana cenderung konstan dan tidak mengalami perubahan nilai pada setiap proses *charging* dan *discharging*. Hal ini dikarenakan pada rangkaian R-C sederhana tidak dapat merepresentasikan tren *drop* tegangan yang terjadi pada grafik tegangan superkapasitor hasil pengujian.

Pada perhitungan RMSE, diperoleh *error* sebesar (0,1448) pada simulasi superkapasitor 100 F dan *error* sebesar (0,168) pada simulasi superkapasitor 650 F

Selama proses pengujian metode HPPC berlangsung, superkapasitor mengalami proses siklus transfer energi. Satu siklus berarti satu kali proses *charging* dan satu kali proses *discharging*. Nilai arus yang digunakan sebesar 8 A. Proses transfer energi yang diamati adalah pada 5 siklus pertama masing-masing pada simulasi superkapasitor 100 F dan superkapasitor 650 F pada rangkaian R-C sederhana. Hasil selengkapannya dapat dilihat pada tabel 4.9 dan tabel 4.10 berikut.

**Tabel 4. 9** Besaran Efisiensi Energi Superkapasitor 100 F pada Rangkaian R-C Sederhana

Energi	Pengujian		R-C Sederhana	
	$E_{in}$ (J)	$E_{out}$ (J)	$E_{in}$ (J)	$E_{out}$ (J)
Siklus 1	171,37	165,37	164,8	163
Siklus 2	167,19	147,56	164,8	163
Siklus 3	168,46	136,12	164,8	163
Siklus 4	188,75	168,07	164,8	163
Siklus 5	162,76	157,01	164,8	163
Jumlah	858,54	774,15	824	815
Rata-rata	171,7	154,83	164,8	163
Persentase (%)	90,17		98,9	

**Tabel 4. 10** Besaran Efisiensi Energi Superkapasitor 650 F pada Rangkaian R-C Sederhana

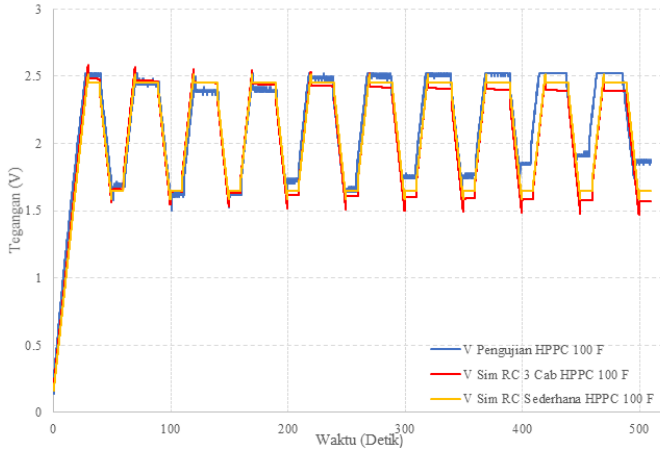
Energi	Pengujian		R-C Sederhana	
	$E_{in}$ (J)	$E_{out}$ (J)	$E_{in}$ (J)	$E_{out}$ (J)
Siklus 1	240,73	219,02	213,16	212,16
Siklus 2	264,45	229,01	213,16	212,16
Siklus 3	234,77	247,45	213,16	212,16
Siklus 4	235,39	223,57	213,16	212,16
Siklus 5	211,41	219,84	213,16	212,16
Jumlah	1186,75	1138,89	1065,8	1060,8
Rata-rata	237,35	227,78	213,16	212,16
Persentase (%)	95,96		99,53	

#### 4.2.4 Perbandingan Hasil Pengujian dan Semua Hasil Simulasi

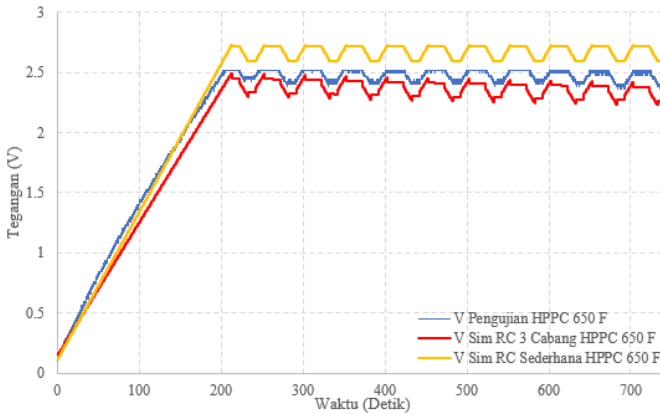
Perbandingan dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui rangkaian ekuivalen yang dapat merepresentasikan karakteristik superkapasitor dengan baik. Grafik tegangan hasil pengujian superkapasitor merupakan grafik referensi atau acuan untuk mengetahui tingkat *error* dari setiap rangkaian ekuivalen hasil simulasi. Gambar 4.15 dan 4.16 menunjukkan perbandingan grafik tegangan pada superkapasitor 100 F dan 650 F.

Pada grafik superkapasitor 100 F dan superkapasitor 650 F hasil pengujian dan hasil simulasi apabila diamati secara visual bahwa rangkaian R-C tiga cabang lebih mendekati karakter superkapasitor sesungguhnya daripada rangkaian R-C sederhana, dibuktikan dengan lebih berhimpitnya kurva tegangan hasil pengujian dengan hasil simulasi pada rangkaian R-C tiga cabang daripada dengan hasil simulasi pada rangkaian R-C sederhana.





**Gambar 4. 15** Perbandingan Tegangan Superkapasitor 100 F Metode HPPC



**Gambar 4. 16** Perbandingan Tegangan Superkapasitor 650 F Metode HPPC

Kemudian rangkaian R-C sederhana tidak dapat menunjukkan kejadian *drop* atau penurunan tegangan selama mode *sleep* pada saat proses pengujian karena parameternya hanya terdiri dari satu buah

kapasitor dan satu buah resistor ekivalen. Sehingga hanya memiliki satu *time constant*. Sedangkan pada rangkaian R-C tiga cabang memiliki tiga pasang resistansi dan kapasitansi yang disusun seri dan dibedakan menurut *time constant* nya yang berarti dapat merepresentasikan perilaku perubahan nilai tegangan dalam jangka waktu yang lebih lama. Kemudian proses untuk memperoleh parameter-parameter pada rangkaian R-C tiga cabang juga melalui proses ekstraksi yang nilainya diambil sepanjang grafik hasil pengujian sehingga dapat lebih merepresentasikan karakter dari superkapasitor.

Selain itu besar nilai RMSE yang diperoleh menunjukkan bahwa rangkaian R-C tiga cabang memiliki nilai *error* yang lebih kecil terhadap grafik tegangan superkapasitor hasil pengujian apabila dibandingkan dengan hasil simulasi menggunakan rangkaian R-C sederhana. Tabel 4.11 berikut merupakan rangkuman nilai RMSE selama menggunakan metode HPPC.

**Tabel 4. 11** Rangkuman Nilai RMSE pada metode HPPC

Superkapasitor	Rangkaian R-C Tiga Cabang		Rangkaian R-C Sederhana	
	RMSE	Persentase	RMSE	Persentase
100 F	0,1508	15,08 %	0,1448	14,48 %
650 F	0,117	11,7 %	0,168	16,8 %

Selain itu berdasarkan analisis efisiensi energi pada model rangkaian R-C tiga cabang dan R-C sederhana terhadap pengujian superkapasitor menggunakan metode HPPC maka diperoleh nilai persentase efisiensi energi dari lima siklus pertama pada simulasi superkapasitor 100 F dan 650 F.

**Tabel 4. 12** Besaran Efisiensi Energi Total dari Energi Lima Siklus Pertama pada Rangkaian Ekuivalen Terhadap Pengujian HPPC

Energi		$E_{in}$ (J)	$E_{out}$ (J)	Efisiensi Energi ( $E_{out}/E_{in}$ )	Persentase (%)
Pengujian	Superkapasitor 100 F	171,7	154,82	0,9017	90,17
	Superkapasitor 650 F	237,35	227,78	0,9596	95,96
Simulasi R-C Tiga Cabang	Superkapasitor 100 F	171,03	154,26	0,9019	90,19
	Superkapasitor 650 F	193,13	186,41	0,9652	96,52
Simulasi R-C Sederhana	Superkapasitor 100 F	164,8	163	0,989	98,9
	Superkapasitor 650 F	213,16	212,16	0,9953	99,53

Maka berdasarkan hasil besar efisiensi energi diatas selama siklus *charging-discharging* berlangsung pada metode HPPC, didapatkan bahwa terjadi penurunan nilai energi antara fase *charging* dengan *discharging*. Hal ini sesuai dengan fenomena *drop* tegangan yang terjadi dikarenakan proses perpindahan muatan pada superkapasitor hingga menghasilkan *losses* berupa  $I^2R$ . Proses tersebut juga dialami pada rangkaian ekuivalen R-C tiga cabang dengan didapatkan nilai persentase efisiensi energi total dari lima siklus *charging-discharging* dari model R-C tiga cabang pada Superkapasitor 100 F sebesar 90,19% dan Superkapasitor 650 F sebesar 96,52% yang mendekati nilai transfer energi superkapasitor pengujian, yakni 90,17% dan 95,96%. Namun, pada model R-C sederhana tidak dilakukan pemodelan untuk fase *medium-long* sehingga nilai transfer energi total nilainya lebih besar dari hasil pengujian, yakni pada Superkapasitor 100 F sebesar 98,9% dan Superkapasitor 650 F sebesar 99,53%. Selain itu, dengan semakin tingginya nilai kapasitansi dari superkapasitor pengujian, maka pemodelan R-C tiga cabang mengalami peningkatan akurasi pemodelan, sehingga model R-C tiga cabang selain memiliki keunggulan dengan akurasi pemodelan yang tinggi, juga memiliki kenaikan tingkat akurasi pemodelan seiring semakin tingginya nilai kapasitansi superkapasitor yang dimodelkan.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## **BAB 5**

### **KESIMPULAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

Dari hasil pengujian superkapasitor dan simulasi pada rangkaian ekivalen R-C tiga cabang dan R-C sederhana menggunakan metode *charge-discharge* dan HPPC maka didapatkan beberapa kesimpulan, diantaranya:

1. Parameter rangkaian ekivalen superkapasitor pada R-C tiga cabang dapat diperoleh dengan melakukan proses ekstraksi terhadap grafik tegangan hasil pengujian menggunakan metode *charge-discharge*
2. Variasi durasi *sleep* yang berbeda menyebabkan perbedaan nilai kapasitansi pada *slow branch*. Semakin besar kapasitansi superkapasitor yang diuji, maka akan terdapat perbedaan nilai yang besar pada  $C_s$ .
3. Pada metode *charge-discharge* dengan waktu *sleep* selama 30 menit, rangkaian ekivalen R-C tiga cabang lebih dapat merepresentasikan bentuk karakter tegangan superkapasitor dengan *error* sebesar 7,2 % pada superkapasitor 100 F dan 5,9 % pada superkapasitor 650 F dibandingkan dengan rangkaian ekivalen R-C sederhana dengan *error* sebesar 10,8 % pada superkapasitor 100 F dan 35,1 % pada superkapasitor 650 F.
4. Pada metode HPPC dengan menggunakan parameter hasil pengujian dengan *sleep* 30 menit, rangkaian ekivalen R-C tiga cabang lebih dapat merepresentasikan bentuk karakter tegangan superkapasitor dengan *error* sebesar 15,08 % pada superkapasitor 100 F dan 11,7 % pada superkapasitor 650 F dibandingkan dengan rangkaian ekivalen R-C sederhana dengan *error* sebesar 14,48 % pada superkapasitor 100 F dan 16,8 % pada superkapasitor 650 F.
5. Semakin kompleks bentuk rangkaian ekivalen superkapasitor dan semakin banyak jumlah parameter yang ada di dalamnya maka akan dapat merepresentasikan karakter dari superkapasitor secara mendetail.

## 5.2 Saran

Pada penelitian selanjutnya, diharapkan untuk dapat mempertimbangkan suhu dari ruangan tempat pengujian superkapasitor sehingga dapat mengetahui pengaruhnya terhadap proses pengujian dan nilai kapasitansi pada superkapasitor. Kemudian juga dengan mempertimbangkan *error* dan keterbatasan yang dimiliki oleh masing-masing peralatan elektronik yang digunakan selama proses pengujian sehingga nilai yang diperoleh dan dianalisis menjadi lebih representatif dan akurat dalam menunjukkan karakter dari superkapasitor. Selain itu, untuk Tugas Akhir selanjutnya disarankan untuk memilih metode yang lebih mempertimbangkan banyak faktor ketika pengujian serta memiliki sedikit asumsi-asumsi untuk perhitungan nilai-nilai variabel.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Nikkhoo, E. Farjah, and T. Ghanbari, "A simple method for parameters identification of three branches model of supercapacitors," in *2016 24th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, Shiraz, Iran, 2016, pp. 1586–1590.
- [2] R. Bonert and L. Zubieta, "Measurement techniques for the evaluation of double-layer power capacitors," in *IAS '97. Conference Record of the 1997 IEEE Industry Applications Conference Thirty-Second IAS Annual Meeting*, New Orleans, LA, USA, 1997, vol. 2, pp. 1097–1100.
- [3] L. Zubieta and R. Bonert, "Characterization of double-layer capacitors for power electronics applications," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 36, no. 1, pp. 199–205, Feb. 2000.
- [4] D. A. New, *Double Layer Capacitors: Automotive Applications and Modelling*. Massachusetts, United States: Massachusetts Institute of Technology, 2004.
- [5] J. Fernando, "Electrical double-layer capacitors," in *Energy Storage Devices for Electronic Systems*, Elsevier, 2015, pp. 149–186.
- [6] K. R. Patel and R. R. Desai, "Calculation of Internal Parameters of Super Capacitor to Replace Battery by Using Charging and Discharging Characteristics," *IJEIT*, vol. 2, no. 1, p. 5, 2012.
- [7] N. Devillers, S. Jemei, M.-C. Péra, D. Bienaimé, and F. Gustin, "Review of characterization methods for supercapacitor modelling," *Elsevier*, vol. 246, pp. 596–608, 2014.
- [8] "Datasheet HC Series Ultracapacitors." Maxwell Technologies, 2013.
- [9] "Datasheet K2 Ultracapacitors - 2.7V Series." Maxwell Technologies, 2014.
- [10] "USER MANUAL : Multi-Range DC Power Supply PSW Series." Good Will Instrument Co., Ltd.
- [11] "USER MANUAL : DC Electronic Load PEL-3000E Series." Good Will Instrument Co., Ltd.
- [12] "USER MANUAL : SDS1000CFL Series Digital Storage Oscilloscope." Siglent Technologies Co., Ltd.
- [13] "DataSheet SIGLENT Series Probe." Siglent Technologies Co., Ltd.
- [14] "CC-65 AC/DC CURRENT CLAMP OPERATOR'S MANUAL." Qingdao Hantek Electronic Co., Ltd.

- [15] 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.



# LAMPIRAN

## Datasheet Spesifikasi Superkapasitor 100 F BCAP0100 T01

### DATASHEET HC SERIES ULTRACAPACITORS

#### PRODUCT SPECIFICATIONS (Cont'd)

ELECTRICAL	BCAP0025 T01/T11	BCAP0050	BCAP0100 T01	BCAP0100 T07	BCAP0150
Rated Capacitance <sup>1</sup>	25 F	50 F	100 F	100 F	150 F
Minimum Capacitance, initial <sup>1</sup>	25 F	50 F	100 F	100 F	150 F
Maximum ESR <sub>DC</sub> initial <sup>1</sup>	42 mΩ	20 mΩ	15 mΩ	15 mΩ	14 mΩ
Test Current for Capacitance and ESR <sub>DC</sub> <sup>1</sup>	2.5 A	5 A	10 A	10 A	15 A
Rated Voltage (65/85°C)	2.70 / 2.30 V	2.70 / 2.30 V	2.70 / 2.30 V	2.70 / 2.30 V	2.70 / 2.30 V
Absolute Maximum Voltage <sup>2</sup>	2.85 V	2.85 V	2.85 V	2.85 V	2.85 V
Absolute Maximum Current	20 A	27 A	36 A	36 A	40 A
Leakage Current at 25°C, maximum <sup>3</sup>	0.045 mA	0.075 mA	0.260 mA	0.260 mA	0.500 mA
TEMPERATURE					
Operating temperature range (Cell case temperature)					
Minimum	-40°C	-40°C	-40°C	-40°C	-40°C
Maximum	65° / 85°C	65° / 85°C	65° / 85°C	65° / 85°C	65° / 85°C
Storage temperature range (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	7.5 g	13 g	23 g	22 g	32 g
Terminals	Wire Leads	Wire Leads	Wire Leads	Snap In	Snap in
Vibration	-	-	-	-	-
Shock	-	-	-	-	-

# Datasheet Spesifikasi Superkapasitor 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 <sup>1</sup>	650 F	1,200 F	1,500 F	2,000 F	3,000 F
Minimum Capacitance, initial <sup>1</sup>	650 F	1,200 F	1,500 F	2,000 F	3,000 F
Maximum Capacitance, initial <sup>1</sup>	780 F	1,440 F	1,800 F	2,400 F	3,600 F
Maximum ESR <sub>DC</sub> , initial <sup>1</sup>	0.8 mΩ	0.58 mΩ	0.47 mΩ	0.35 mΩ	0.29 mΩ
Test Current for Capacitance and ESR <sub>DC</sub> <sup>1</sup>	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 <sup>2</sup>	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 <sup>3</sup>	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](http://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
<b>Constant Voltage Mode</b>						
Line Regulation (*1)	mV	18	43	83	128	403
Load Regulation (*2)	mV	20	45	85	130	405
<b>Ripple and Noise (*3)</b>						
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
<b>Rise Time (*6)</b>						
Rated Load	ms	50	50	100	100	150
No Load	ms	50	50	100	100	150
<b>Fall Time (*7)</b>						
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
<b>Constant Current Mode</b>						
Line regulation (*1)	mA	77	32	19.4	14	7.88
Load regulation (*9)	mA	77	32	19.4	14	7.88
<b>Ripple and noise</b>						
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
<b>Constant Current Mode</b>				
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	$(T^{*1}) \pm (0.1\% \text{ of set} + 0.1\% \text{ of F.S}) + \text{Vin}/500\text{k}\Omega$	$(T^{*1}) \pm (0.1\% \text{ of set} + 0.2\% \text{ of F.S}) + \text{Vin}/500\text{k}\Omega$	$(T^{*1}) \pm (0.1\% \text{ of set} + 0.1\% \text{ of F.S}) + \text{Vin}/500\text{k}\Omega$	$(T^{*1}) \pm (0.1\% \text{ of set} + 0.2\% \text{ of F.S}) + \text{Vin}/500\text{k}\Omega$
	(Full scale of High range)	(Full scale of High range)	(Full scale of High range)	(Full scale of High range)
<b>Constant Resistance Mode</b>				
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

**SIGLENT**

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- $\Omega$  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  $10 \times 10 = 100\text{mA}$ .
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  $5 \times 100 = 500\text{mA}$ .

### **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°C to 50°C, 70% R.H.

Storage Temperature: -20°C~+70°C, 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°C, 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



Tabel Parameter Rangkaian R-C Tiga Cabang beserta Asumsi Pendukungnya

Parameter	Asumsi
R <sub>f</sub>	1. Perhitungan R <sub>f</sub> dimulai dengan asumsi nilai tegangan awal dari ketiga kapasitor adalah 0 V [halaman 18]
C <sub>f</sub>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Agar lebih sederhana dalam pelaksanaannya, sehingga tidak ada muatan yang tersimpan pada superkapasitor. Nilai tegangan awal kapasitor pada masing-masing branch adalah 0 V [halaman 14]</li> <li>2. Ketika pulsa arus mengisi superkapasitor, muatan akan disimpan keseluruhan pada <i>fast branch</i> (muatan akan mengisi/menempel pada pori-pori berukuran besar terlebih dahulu) [halaman 15]</li> <li>3. Nilai V<sub>t</sub> terukur adalah pendekatan nilai tegangan C<sub>f</sub> karena <i>drop</i> tegangan melalui R<sub>f</sub> yang nilainya terlampaui kecil [halaman 16]</li> <li>4. Pada perhitungan nilai C<sub>f</sub>, asumsinya adalah <i>time constant</i> pada <i>fast branch</i> (<math>\tau_f = R_f C_f</math>) lebih kecil daripada <i>time constant</i> dari <i>medium</i> dan <i>slow branch</i>, mengingat waktu pengisian (<i>charging</i>) cukup singkat maka keseluruhan muatan yang dikirim ke superkapasitor akan disimpan pada kapasitor di <i>fast branch</i>. [halaman 19]</li> </ol>
R <sub>m</sub>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. <i>Drop</i> tegangan pada resistor sama dengan V<sub>t</sub> terukur dibagi dengan besar arus yang disuplai dari C<sub>f</sub> sebagai muatan yang terdifusi ke pori-pori yang berukuran lebih kecil. [halaman 16]</li> <li>2. Perhitungan resistansi pada <i>medium branch</i> ditemukan setelah interval pengisian dengan menggunakan persamaan di bawah ini dan asumsi bahwa tegangan terminal superkapasitor sesuai dengan tegangan R<sub>m</sub> (<math>V_t = V_{R_m} + V_{C_m} = V_{R_m} + 0 \quad V = V_{R_m}</math>) [halaman 21]</li> <li>3. Selain itu muatan yang dikirimkan dari <i>fast branch</i> relatif sama dengan muatan yang diterima resistansi pada <i>medium branch</i>. [buku hal 21] [thesis hal 73]</li> </ol>
C <sub>m</sub>	1. Agar lebih sederhana dalam pelaksanaannya, sehingga tidak ada muatan yang tersimpan pada superkapasitor.

	<p>Nilai tegangan awal kapasitor pada masing-masing branch adalah 0 V [halaman 14]</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>2. Tegangan terukur pada terminal superkapasitor adalah sama dengan tegangan pada <i>medium branch</i> dan kira-kira sama dengan tegangan dari <math>C_f</math>. [halaman 16-17]</li> <li>3. Muatan yang hilang dari <math>C_f</math> sesungguhnya disimpan pada <math>C_m</math> [halaman 17]</li> <li>4. 60 detik dipilih karena memiliki nilai yang lebih besar daripada <math>\tau_f</math>, dan sangat lebih kecil daripada <math>\tau_s</math> dan perubahan nilai tegangan yang terjadi dianggap masih bisa terukur dengan baik pada interval waktu tersebut. [halaman 17]</li> <li>5. Interval untuk perhitungan <math>C_m</math> perlu cukup lama untuk memastikan pengisian <math>C_m</math> yang cukup. Apabila interval waktu terlalu lama, akan menjadi relatif sama terhadap <i>time constant</i> dari <i>slow branch</i>, muatan akan bergerak lebih jauh pada rangkaian ekuivalen dan akan mulai mengisi kapasitor pada <i>slow branch</i>, sehingga anggapan bahwa muatan yang keluar dari <i>fast branch</i> akan disimpan pada <i>medium branch</i> menjadi tidak tepat. [halaman 22-23]</li> <li>6. Penjumlahan dari <math>R_f</math> dan <math>R_m</math> adalah kira-kira sama dengan nilai <math>R_m</math> sendiri. [halaman 23]</li> <li>7. Interval pada <math>\frac{dv}{dt}</math> harus kecil sehingga dipilih waktu pada detik 30-60 karena memiliki bentuk kurva yang hampir linier (dapat dilihat pada gambar 2.18). [halaman 23]</li> </ol>
Rs	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Interval waktu yang digunakan untuk perhitungan Rs adalah sekitar 3 kali <i>time constant</i> dari <i>medium branch</i>. Sehingga <i>medium branch</i> akan terisi oleh muatan terlebih dahulu sebelum melakukan perhitungan parameter <i>slow branch</i>. [halaman 18]</li> <li>2. Asumsi untuk perhitungan <math>t_7</math>, Tegangan <math>C_m</math> mengalami perubahan nilai karena transfer muatan ke <i>slow branch</i> [halaman 24]</li> <li>3. Selain itu, dengan meninjau nilai <i>time constant</i> dari <i>fast branch</i> dan <i>medium branch</i>, diperkirakan bahwa transfer muatan menuju <i>slow branch</i> akan hampir</li> </ol>

	<p>seluruhnya berasal dari <i>fast branch</i> dan muatan yang hilang dari <i>fast branch</i> adalah hampir seluruhnya dikirimkan ke <i>slow branch</i> (apabila <i>medium branch</i> diabaikan). [halaman 24-25]</p> <p>4. Pada saat <math>t = t_7</math> tegangan pada <math>C_s</math> adalah sekitar 0 V dan pada <i>slow branch</i> hanya terdapat elemen resistif [halaman 25]</p> <p>5. Untuk menjaga asumsi nilai tegangan dari <math>C_s</math> tetap 0 V selama perhitungan <math>R_s</math>, nilai <math>dt</math> harus diatur cukup besar sehingga nilai <i>drop</i> tegangan tetap bisa diukur dengan adanya interferensi dari <i>noise</i>. Maka dipilih interval waktu (<math>t_8</math>) selama 45 detik setelah <math>t_7</math> [halaman 26]</p>
Cs	<p>1. Agar lebih sederhana dalam pelaksanaannya, sehingga tidak ada muatan yang tersimpan pada superkapasitor. Nilai tegangan awal kapasitor pada masing-masing branch adalah 0 V [halaman 14]</p> <p>2. Interval waktu yang digunakan untuk perhitungan <math>C_s</math> adalah sebesar 1800 detik. Interval panjang ini dipilih sedemikian rupa sehingga interval waktu lebih panjang dibandingkan dengan konstanta waktu diasumsikan dari <i>slow branch</i>, cukup pendek sehingga resistansi kebocoran dapat diabaikan, dan cukup lama sehingga perubahan nilai tegangan mudah diukur pada paruh kedua intervalnya. [halaman 18]</p> <p>3. Pada perhitungan parameter <math>C_s</math>, diasumsikan perubahan tegangan terminal disebabkan oleh transfer muatan dari <i>fast branch</i> ke <i>slow branch</i>. [halaman 26]</p> <p>4. Perubahan muatan pada <i>medium branch</i> diabaikan karena nilai kapasitor pada <i>medium branch</i> lebih kecil dibandingkan kapasitor pada <i>fast branch</i>. [halaman 26]</p> <p>5. <math>\Delta Q</math> pada kapasitor <i>slow branch</i> relatif sama dengan <math>\Delta Q</math> pada kapasitor <i>fast branch</i>. [halaman 27]</p> <p>6. Perubahan tegangan terminal (<math>\Delta V_t</math>) sama dengan perubahan tegangan kapasitor <i>fast branch</i> selama interval 1800 detik karena nilai <math>R_f</math> yang kecil, keseluruhan muatan meninggalkan <math>C_f</math> sehingga <i>drop</i> tegangan <math>R_f</math> dapat diabaikan [halaman 27]</p>

Asumsi-asumsi pendukung yang lain:

1. Asumsi hubungan resistansi dan time constant pada setiap cabang berdasarkan sifat fisis dari elektrolit dan struktur elektroda berpori [persamaan 2.2-2.3 halaman 15]
2. Induktansi pada superkapasitor diasumsikan sangat kecil dan impedansi akibat induktansi pada frekuensi rendah dapat diabaikan.[halaman 18]
3. Resistansi bocor pada superkapasitor tidak memiliki dampak yang berarti terhadap performa superkapasitor pada penerapan *pulsed-power* disamping itu resistansi bocor memerlukan *time constant* yang sangat lama untuk proses perhitungannya. [halaman 18]

## INDEKS

- Arus konstan, 41, 48, 49, 50, 51, 69
- Charge-Discharge, 40, 41, 46, 48, 49, 50, 54, 55, 63, 65, 66, 67, 69
- Ekstraksi, 4, 5, 9, 15, 16, 19, 20, 54, 60, 62, 68, 81, 85
- Electronic Load*, 3, 32, 34, 35, 37, 38, 40, 46, 47, 88, 93
- Energi, 1, 10, 12, 14, 69, 70, 71, 75, 78, 82, 83
- Error*, 2, 62, 63, 66, 68, 73, 75, 76, 78, 79, 81, 85, 86
- ESR, 3, 14, 16, 36, 64, 76
- HPPC, 3, 4, 41, 42, 47, 48, 50, 51, 52, 53, 71, 72, 74, 75, 76, 77, 78, 80, 81, 82, 83, 85
- Induktansi, 20, 101
- Kapasitansi, 1, 3, 10, 12, 16, 25, 30, 61, 64, 68, 76, 81, 84, 85, 86
- Karakterisasi, 3, 5, 6, 8, 13, 15, 53, 54, 71
- LinkView, 34, 36, 37, 38, 39, 40, 42, 43, 54, 71
- Microsoft Excel, 37, 38, 43, 54, 55, 71
- Osiloskop, 35, 37, 38, 43, 54, 71
- Parameter, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 15, 16, 19, 20, 29, 32, 38, 43, 45, 46, 54, 55, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 64, 68, 73, 76, 81, 85, 86, 100
- Pemodelan, 1, 2, 3, 5, 6, 8, 13, 32, 36, 47, 48, 50, 53, 69, 71, 83, 84
- Power Supply*, 1, 3, 32, 34, 35, 36, 38, 40, 46, 47, 88, 92
- Rangkaian ekivalen, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 13, 14, 15, 16, 20, 25, 32, 38, 41, 43, 45, 46, 47, 50, 51, 53, 54, 55, 57, 58, 59, 62, 64, 66, 69, 70, 73, 76, 79, 83, 85, 86, 99
- R-C sederhana, 14, 47, 48, 53, 64, 65, 66, 68, 70, 76, 77, 78, 79, 82, 83
- R-C tiga cabang, 1, 2, 5, 9, 15, 32, 38, 43, 45, 46, 48, 50, 53, 54, 56, 57, 58, 60, 61, 64, 68, 69, 70, 73, 75, 80, 81, 82, 83, 85
- Resistansi, 1, 3, 6, 16, 20, 23, 27, 68, 81, 98, 99, 100, 101
- Simulink, 2, 4, 9, 32, 46, 53, 62, 64, 73, 76
- Sleep*, 38, 40, 41, 49, 51, 60, 61, 62, 68, 81, 85
- Superkapasitor, 1, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 21, 22, 23, 24, 26, 29, 31, 33, 34, 35, 36, 41, 42, 43, 49, 51, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 63, 65, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 89, 90
- Variabel, 24, 26, 28, 31, 43, 45, 55, 56, 57, 58, 86
- Zubieta, 6, 15, 20, 87

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## BIODATA PENULIS



**Muhammad Nafis Ismail**, dilahirkan di Sidoarjo, pada 29 November 1997. Penulis merupakan lulusan dari SDN Pucang 1 Sidoarjo, SMPN 1 Sidoarjo, dan SMAN 1 Sidoarjo. Pada tahun 2015, penulis melanjutkan studinya di Departemen Teknik Elektro ITS dan memilih bidang studi Teknik Sistem Tenaga. Selama perkuliahan, penulis aktif dalam mengikuti berbagai kegiatan dan organisasi dalam kampus. Penulis pernah menjadi Staff Departemen Riset dan Teknologi HIMATEKTRO ITS pada 2016 dan menjadi Kepala Biro Teknologi Departemen Riset dan Teknologi HIMATEKTRO ITS pada 2017.

dan pada 2 tahun terakhir menjadi asisten di Laboratorium Instrumentasi, Pengukuran, dan Identifikasi Sistem Tenaga (LIPIST). Selama menjadi asisten laboratorium, penulis juga sempat menjadi Koordinator Asisten Laboratorium. Selain itu penulis juga aktif dalam berbagai pelatihan berbasis keprofesian di laboratorium dan *project* industri bersama dosen pembina laboratorium. Penulis juga menjuarai beberapa kompetisi di bidang keilmiahan. Untuk menghubungi penulis, dapat melalui email: [nfsismail@gmail.com](mailto:nfsismail@gmail.com)