

Karakterisasi Superkapasitor dengan Pemodelan Rangkaian R-C Dua Cabang dan Kapasitansi Variabel

¹Audie Rahmani Awali, ²Vita Lystianingrum Budiharto Putri

Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS), Surabaya

¹audierahmani@gmail.com, ²vita@ee.its.ac.id

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 ekuivalen RC dua cabang dengan kapasitansi variabel memiliki keunggulan tingkat akurasi yang tinggi dan prosesnya yang lebih sederhana. Dengan metode karakterisasi *charge-discharge* menggunakan arus konstan 10 A, maka parameter internal superkapasitor Maxwell 100F dan 650F dapat dimodelkan menjadi komponen penyusun rangkaian RC dua cabang yang terdiri atas resistansi, kapasitansi konstan, dan kapasitansi variabel. Serta dilakukannya 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 RC dua cabang memiliki akurasi pemodelan yang tinggi terhadap hasil pengujian superkapasitor sesungguhnya. Selain itu, rangkaian RC dua cabang juga memiliki akurasi yang lebih tinggi daripada rangkaian RC sederhana sebagai rangkaian pembandingan baik pada metode pengujian *charge-discharge* maupun HPPC. Karakter kapasitansi variabel yang mampu meningkatkan akurasi pemodelan RC dua cabang, maka menjadikan rangkaian RC dua cabang sebagai rangkaian pemodelan superkapasitor dengan akurasi yang lebih tinggi daripada RC sederhana.

Kata Kunci— *Charge-Discharge*, Kapasitansi Variabel, Superkapasitor, Rangkaian Ekuivalen, RC Dua Cabang.

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 RC two-branch model equivalent circuit with variable capacitance has the advantage of high accuracy and a simpler process. With the *charge-discharge* characterization method using a constant current of 10 A, the internal parameters of the Maxwell 100F and 650F supercapacitors can be modeled into a RC two-branch circuit component that consist of resistance, constant capacitance, and variable capacitance. As well as hybrid pulse power

characterization (HPPC) experimenting 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 RC two-branch model has high modeling accuracy on the results of the actual supercapacitor experimenting. In addition, the RC two-branch model also has a higher accuracy than the RC standard model as a comparison circuit in both the *charge-discharge* and HPPC experimenting methods. Variable capacitance characters can improve the accuracy of RC two-branch modeling, then make the RC two-branch model as a series of supercapacitor modeling with higher accuracy than RC standard model.

Key words— *Charge-Discharge*, Equivalent Circuit, RC Two-Branch, Supercapacitor, Variable Capacitance.

I. PENDAHULUAN

SISTEM penyimpanan energi secara luas telah berkembang seiring turut berkembangnya teknologi dari penyimpanan energi, terutama energi baru-terbarukan. Superkapasitor yang disebut juga dengan ultrakapasitor atau *electric double layer capacitor* (EDLC) memiliki karakter unik dapat menjadi penyimpan energi pada berbagai aplikasi salah satunya pada sistem hybrid [1]. Dengan lingkup aplikasi dan fungsi dari superkapasitor yang luas menjadi prioritas dalam pengembangan sistem penyimpanan energi. Berbagai macam area pengembangan dari sistem penyimpanan energi seperti pembangkitan energi baru-terbarukan, kendaraan listrik, dan peralatan telekomunikasi [2]. Dengan keunggulan tersebut, kebutuhan sistem penyimpanan energi terhadap superkapasitor juga semakin meningkat. Sehingga dibutuhkan studi lebih lanjut mengenai penanaman superkapasitor pada berbagai sistem kelistrikan.

Aplikasi superkapasitor secara global pada sistem kompleks membutuhkan suatu perencanaan awal. Tujuan perencanaan awal untuk mensimulasikan performa suatu sistem berdasarkan karakter kelistrikannya [2]. Tahap awal berupa karakterisasi bertujuan untuk mengetahui parameter internal dari superkapasitor melalui proses pengujian dan simulasi. Sehingga dapat dimodelkan dalam bentuk rangkaian ekuivalen

yang selanjutnya dapat diketahui tingkah laku superkapasitor melalui pemodelan pada suatu sistem yang berjalan.

Pemodelan superkapasitor secara teori dapat direpresentasikan menjadi sebuah rangkaian ekuivalen sederhana. Rangkaian ekuivalen yang paling mudah dan umum digunakan adalah rangkaian RC seri sederhana yang terdiri atas sebuah kapasitor, hambatan ekuivalen secara seri dan hambatan ekuivalen secara parallel [3]. Namun rangkaian ekuivalen ini kurang memadai untuk memodelkan tingkah laku superkapasitor secara nyata karena hanya terdiri atas satu kondisi konstanta waktu dan nilai kapasitansi yang tidak bergantung pada nilai tegangan terminal. Akurasi pemodelan yang rendah terhadap kondisi nyatanya juga menjadi kekurangan model RC sederhana.

Pada tugas akhir ini mengusulkan model rangkaian R-C dua cabang yang terdiri atas dua cabang komponen resistansi dan kapasitansi secara parallel dengan kondisi konstanta waktu pendek dan menengah-panjang. Kapasitor pada salah satu percabangan rangkaiannya juga menggunakan kapasitor yang nilai kapasitansinya bergantung pada nilai tegangan terminalnya. Sehingga pemodelan ini dapat diunggulkan karena memiliki kondisi waktu operasi yang bervariasi dan nilai kapasitansi yang bergantung pada tegangan terminal, sesuai dengan kondisi nyata kerja superkapasitor.

II. DASAR TEORI

A. Superkapasitor

Superkapasitor merupakan komponen elektronika yang memiliki kemampuan untuk menyimpan, melepaskan muatan dan mengalirkan daya dengan intensitas tinggi dalam waktu yang singkat. Superkapasitor termasuk ke dalam salah satu kategori media penyimpanan energi elektro-kimia yang pertama kali ditemukan di SOHIO (*Standart Oil Company of Ohio*) oleh Robert A. Rightmire pada tahun 1962 [4].

Superkapasitor menyimpan energi secara elektrostatik melalui polarisasi terhadap elektrolit. Ketika tegangan dihantarkan pada elektroda positif dan negatif, ion pada elektrolit akan terpicat pada muatan elektroda yang tidak sejenis [5]. Muatan yang terpicat pada muatan elektroda yang tidak sejenis akan membentuk suatu lapisan antara separator dan permukaan elektroda yang disebut dengan lapisan Helmholtz yang hanya memiliki 1-2 ketebalan molekular. Sehingga terdapat jarak antara dua muatan yang berbeda pada setiap elektrodanya semakin tipis serta menggunakan elektrolit aktif terhadap aliran listrik sebagai media perpindahan ion. Hal ini yang menyebabkan superkapasitor memiliki keunggulan dengan nilai satuan kapasitansi yang dapat mencapai 103 F [3]. Hubungan antar parameter kapasitansi C , luas permukaan elektroda S , dan jarak antar muatan d dengan permitivitas elektrolit ϵ dapat diformulasikan sebagai:

$$C = \epsilon \left(\frac{S}{d} \right) \quad (1)$$

Dengan luas permukaan elektroda yang tinggi, maka kapasitansi superkapasitor juga akan semakin besar. Sedangkan nilai kapasitansi berbanding terbalik dengan jarak antar muatan yang berbeda pada lapisan Helmholtz yang sangat tipis, sehingga dengan semakin kecilnya jarak antar muatan semakin tinggi nilai kapasitansi. Kapabilitas elektrolit juga mempengaruhi kualitas dari superkapasitor sebagai media transfer muatan antar elektroda, semakin konduktif elektrolit yang digunakan, semakin aktif dalam proses transfer muatan

Hal ini berdampak pada beberapa kapabilitas superkapasitor lebih baik dibandingkan kapasitor konvensional dan baterai. Jika dibandingkan dengan baterai, superkapasitor memiliki kerapatan daya lebih tinggi dan siklus hidup yang lebih panjang, sedangkan jika dengan kapasitor konvensional dalam hal kapasitansi dan keandalannya superkapasitor memiliki kapabilitas lebih baik [5].

B. Pemodelan Internal Superkapasitor

Pemodelan superkapasitor memiliki tujuan untuk mengetahui model elektrik yang tepat untuk merepresentasikan konstruksi internal superkapasitor. Sehingga dalam pemodelan internal superkapasitor memiliki beberapa kebutuhan utama sebelum merancang model rangkaian ekuivalennya, yakni:

- 1) Struktur model rangkaian ekuivalen seharusnya berhubungan dengan konstruksi fisik superkapasitor, namun sesedeharna mungkin agar lebih mudah dirancang
- 2) Model rangkaian ekuivalen seharusnya mendeskripsikan kondisi optimum superkapasitor dengan akurasi yang sangat baik
- 3) Nilai parameter model rangkaian ekuivalen didapatkan dari pengujian terminal superkapasitor

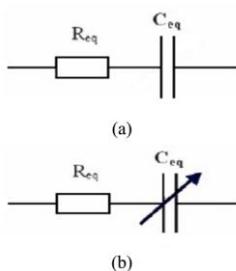
Komponen Rangkaian Ekuivalen RC

Berdasarkan pada teori *double layer* yang dikemukakan Helmholtz pada tahun 1853 bahwa superkapasitor secara teoritikal dapat direpresentasikan sebagai rangkaian ekuivalen yang terdiri dari resistor (R) dan kapasitor nonlinear (C) sehingga dikenal juga sebagai rangkaian ekuivalen RC [3]. Maka rangkaian ekuivalen dari superkapasitor merupakan representasi atas dua sifat internal yaitu resistansi yang dilambangkan resistor (R) dan kapasitansi yang dilambangkan kapasitor (C).

Nilai komponen resistor yang merupakan representasi dari sifat resistansi material pada rangkaian ekuivalen berlaku sebagai representasi dari beberapa parameter [3], yakni:

- 1) Resistansi material elektroda
- 2) Resistansi material elektrolit
- 3) Ukuran pori pori
- 4) Porositas membran
- 5) Kualitas penampang elektroda

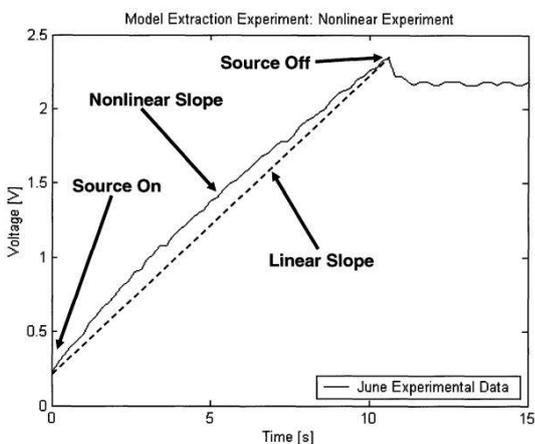
Selain nilai komponen resistor, rangkaian ekuivalen dari superkapasitor juga terdiri atas komponen lainnya yakni komponen kapasitor. Nilai kapasitor merupakan representasi dari komponen dasar dari superkapasitor yang memiliki sifat kapasitif sehingga dilambangkan dengan komponen kapasitor. Berikut pemodelan superkapasitor dengan rangkaian ekuivalen komponen RC yang terdiri atas dua jenis model kapasitansi pada Gambar 2.



Gambar. 2. Rangkaian Ekuivalen dengan Dua Jenis Model Kapasitansi: (a) Model Kapasitansi Konstan, (b) Model Kapasitansi Variabel

Dengan sifat dasar komponen penyusun internal superkapasitor dapat dimodelkan menjadi rangkaian ekuivalen RC seperti Gambar 2 (a). Namun nilai kapasitor tidak mampu menjadi konstan tetapi menjadi berubah-ubah sesuai dengan nilai tegangan *charge* seperti rangkaian ekuivalen pada Gambar 2 (b).

Pemodelan komponen kapasitif pada rangkaian ekuivalen memiliki pengaruh dari kurva karakteristik tegangan pengujian pada fase *charge*. Hal ini sesuai dengan persamaan hubungan nilai kapasitansi dengan kondisi muatan dari superkapasitor pada persamaan berikut.



Gambar. 3. Kurva Tegangan-Waktu Superkapasitor saat Fase Charging

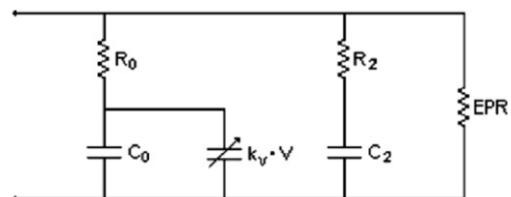
$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta V} = \frac{I \Delta t}{\Delta V} \quad (2)$$

Dengan menggunakan pendekatan persamaan (2) menunjukkan bahwa perubahan tegangan ΔV dari superkapasitor berhubungan dengan perubahan muatan ($\Delta Q = I \Delta t$) dari superkapasitor dan kapasitansi superkapasitor itu sendiri. Maka berdasarkan Gambar 3 yang merupakan kurva karakteristik tegangan terhadap waktu membuktikan dengan meningkatnya kedua parameter tersebut melalui arus *charge* menunjukkan bahwa terbentuk garis hubungan yang tidak linear (*nonlinear slope*).

Sehingga kenaikan nilai muatan dan tegangan bersifat tidak linear. Maka nilai kapasitansi superkapasitor juga bersifat tidak linear seiring dengan naiknya tegangan saat fase *charge*. Sehingga nilai kapasitansi komponen pemodelan superkapasitor pada rangkaian ekuivalen memerlukan komponen kapasitansi variabel atau nonlinear terhadap tegangan terminal superkapasitor.

Rangkaian Ekuivalen RC Dua Cabang

Rangkaian ekuivalen RC dua cabang terdiri atas dua percabangan komponen R dan C yang merupakan model parameter internal superkapasitor dengan peran yang berbeda-beda. Proses pengujian pada pemodelan rangkaian RC dua cabang menggunakan metode *charge-discharge* seperti proses karakterisasi superkapasitor pada umumnya.



Gambar. 4. Model Rangkaian Ekuivalen RC Dua Cabang [3]

Namun pada model RC dua cabang dalam proses penghitungan parameter model rangkaian ekuivalennya hanya membutuhkan proses *charging* pada superkapasitor dari nilai tegangan 0 sampai nilai tegangan nominalnya dengan arus konstan, sehingga proses pengukuran lebih mudah untuk dilakukan seperti grafik proses *charging* Gambar 5.

RC Cabang Pertama

Percabangan pertama merupakan percabangan rangkaian ekuivalen yang terdiri atas komponen sebuah resistor R_0 yang terangkai secara seri dengan sebuah kapasitor yang memiliki peran utama sebagai parameter penyimpanan awal superkapasitor dengan konstanta waktu *short term* [3]. Komponen kapasitif pada rangkaian cabang pertama terdiri dari kapasitor konstan C_0 yang terangkai secara parallel dengan kapasitor variabel yang bersifat *voltage-dependent*

$k_v V$ terhadap tegangan nominal superkapasitor [3]. Salah satu keunggulan dari model RC dua cabang yakni proses penentuan kedua parameter C_o dan $k_v V$ menjadi sangat sederhana dan cepat [3].

Perhitungan resistansi R_o dilakukan dengan cara yang sama dengan model *lumped*, yakni dengan mengukur lonjakan tegangan awal ΔV selama periode pertama *charging* dan dibagi dengan arus *charging* I_c (dengan asumsi seluruh komponen kapasitor dalam kondisi tanpa muatan) [3]:

$$R_o = \frac{\Delta V}{I_c} \quad (3)$$

Namun, pada penentuan total kapasitansi pada percabangan pertama menggunakan cara yang berbeda dari model *lumped* yang telah digunakan. Hubungan antara arus, tegangan, dan muatan pada kapasitor non-linear yakni dengan:

$$i = \frac{dq}{dt} = \frac{dq dv}{dv dt} = (C_o + k_v V) \frac{dv}{dt} \quad (4)$$

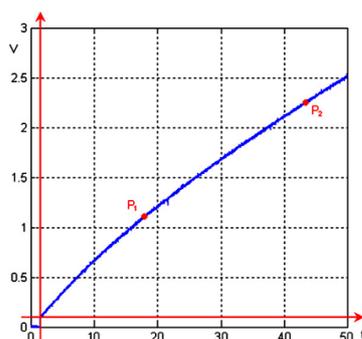
Dimana $C_o + k_v V$ menunjukkan sebuah kapasitansi diferensial. Persamaan (4) dapat diintegrasikan dengan memecahkan elemen variabelnya. Hasil integrasi dari persamaan diatas dengan arus konstan saat *charging* I_c dipindahkan ke sisi kanan, yakni:

$$t = f(V) = \frac{C_o}{I_c} V + \frac{1}{2} \frac{k_v}{I_c} V^2 \quad (5)$$

Persamaan diatas merupakan persamaan waktu dengan fungsi tegangan pada komponen kapasitor cabang pertama yang selanjutnya akan digunakan sebagai dasar dalam perhitungan parameter lainnya. Persamaan (5) dapat disederhanakan menjadi persamaan polynomial orde dua yang menjadi yakni:

$$t = c_1 V + c_2 V^2 \quad (6)$$

Dimana koefisien orde 0 nilainya 0 karena absis grafik fase *charging* telah digeser seperti pada Gambar 6. Sehingga fase



Gambar. 6. Kurva Karakteristik Tegangan-Waktu Superkapasitor[3]

charging instan mulai dari 0 dan nilai tegangan pengukuran RC Cabang Kedua

Penentuan parameter percabangan kedua ditentukan konstanta waktu dahulu karena tingkah laku superkapasitor selama periode *medium-long term* sangat berkaitan dengan nilai konstanta waktu yang digunakan perhitungan. Penentuan nilai konstanta waktu $\tau_2 = R_2 C_2$ memiliki pengaruh terhadap akurasi dalam pemodelan yang dilakukan. Jika terlalu kecil nilai konstanta waktu, semakin besar akurasi pada periode medium dan semakin kecil akurasi pada periode panjang, begitupun sebaliknya pada nilai konstanta waktu yang semakin besar [3]. Nilai konstanta waktu $\tau_2 = 240$ dipilih berdasarkan beberapa pengujian [3]. Setelah konstanta waktu telah dipilih, maka dilakukan pengukuran tegangan V_{2f} pada waktu $3\tau_2$, sehingga C_2 dapat ditentukan dengan persamaan [3]:

$$Q_{tot} = I_c T_c = C_2 V_{2f} + \left(C_o + \frac{k_v}{2} V_{2f} \right) V_{2f} \quad (11)$$

Dengan asumsi bahwa proses *charging* pada percabangan kedua telah selesai dan seluruh komponen kapasitor pada model 2 cabang telah mencapai level tegangan yang sama yakni V_{2f} [3]. Seluruh variabel pada persamaan (11) telah diketahui termasuk waktu *charging* T_c , kecuali C_2 yang akan dicari nilainya.

Setelah kapasitor C_2 berhasil ditentukan, komponen pada percabangan kedua juga terdapat komponen R_2 yang dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan konsanta waktu, yakni:

$$R_2 = \frac{\tau_2}{C_2} \quad (12)$$

Sehingga komponen pada percabangan kedua yakni R_2 dan C_2 dapat ditentukan dengan persamaan (12) konstanta waktu τ_2 . Hal ini sesuai dengan karakteristik dari percabangan kedua yang beroperasi pada rentang waktu menengah-panjang.

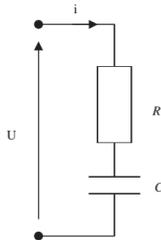
Rangkaian Ekivalen RC Sederhana

Pemodelan superkapasitor dengan rangkaian ekivalen RC sederhana merupakan rangkaian ekivalen yang terdiri atas satu percabangan dengan sebuah komponen resistansi R yang disebut juga dengan *Equivalent Serial Resistance* (ESR) dan sebuah komponen kapasitansi C. Nilai dari komponen RC pada percabangan sederhana ini didapatkan dari spesifikasi superkapasitor yang dimodelkan yakni pada *datasheet* superkapasitor. Skema rangkaian ekivalen RC sederhana terdapat pada Gambar 7.

C. Metode Karakterisasi Superkapasitor

Metode karakterisasi superkapasitor menggunakan dua jenis metode yang terdiri atas metode *charge-discharge* dan *hybrid*

pulse power characterization (HPPC). Metode *charge-discharge* dilakukan untuk penentuan komponen kapasitansi dan nilai resistansi yang umumnya merupakan *equivalent serial resistance* (ESR).



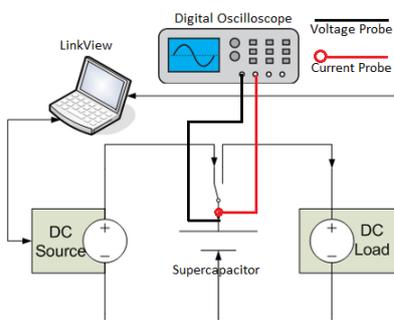
Gambar 7. Model Rangkaian Ekuivalen RC Sederhana [1]

Sedangkan, metode *hybrid pulse power characterization* (HPPC) adalah salah satu pengujian yang dapat memprediksi tingkah laku superkapasitor pada kondisi arus dinamis dengan profil beban yang berbeda-beda [13]. Dengan menggunakan metode HPPC, maka dapat disimpulkan seberapa besar error model rangkaian ekuivalen pada skenario sistem sesungguhnya karena salah satu model representasi dari kondisi nyata kendaraan listrik yang sedang dalam kemudi [13]

III. METODE PENELITIAN

A. Konfigurasi Pengujian Superkapasitor

Keseluruhan metode pengujian superkapasitor 100F (Sc-100) dan 650F (Sc-650) terdiri dari beberapa peralatan, diantaranya superkapasitor, DC power supply dengan DC electronic load yang diatur skenario pengujianya dengan linkView, dan osiloskop dengan probe tegangan dan clamp arus. Keseluruhan konfigurasi pengujian parameter superkapasitor digambarkan pada Gambar 8



Gambar 8. Konfigurasi Peralatan Pengujian Karakterisasi Superkapasitor

B. Skenario Metode Pengujian

Pengujian yang dilakukan dalam karakterisasi superkapasitor Sc-100 dan Sc-650 sebagai penentuan parameter internalnya menggunakan metode *charge-discharge* superkapasitor. Selanjutnya, hasil dari pengujian ini digunakan dalam kalkulasi penentuan komponen penyusun rangkaian

ekivalen sebagai pemodelannya.

Metode Pengujian Charge-Discharge

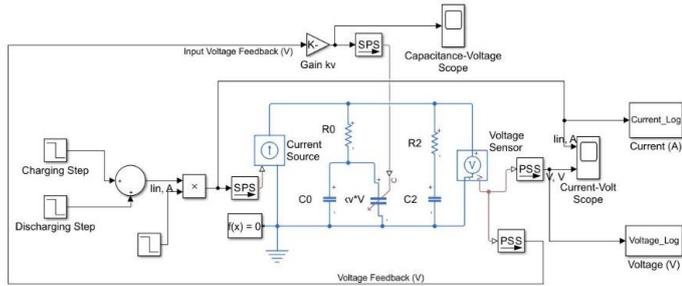
Pengujian metode *charge-discharge* superkapasitor Sc-100 dan Sc-650 dilakukan dengan memberi arus konstan 10 A dahulu hingga superkapasitor mencapai tegangan nominalnya yakni 2,7 V. Fase ini disebut dengan fase *charging*. Selanjutnya pada fase *sleep* superkapasitor akan ditahan dalam kondisi bermuatan penuh dan tidak terhubung beban hingga lebih dari 12 menit atau 720 detik yakni selama 800 detik, karena saat kondisi bermuatan penuh pada menit ke-12 akan diukur nilai tegangannya dan digunakan dalam perhitungan komponen percabangan kedua. Setelah itu superkapasitor dihubungkan dengan beban untuk proses pelepasan muatannya dengan arus konstan 10 A hingga mencapai kurang dari 0,1 V atau tegangan rendah yang aman agar saat digunakan kembali tidak berpotensi mengeluarkan percikan api karena proses pelepasan muatan.

Metode Pengujian HPPC

Pengujian metode arus dinamik superkapasitor dilakukan dengan menguji superkapasitor pada kondisi muatan penuh dengan siklus *charge-discharge* secara berulang-ulang berdasarkan periode waktu yang dibatasi sebagai bentuk representasi beban pada kondisi nyata selama 500 detik. Superkapasitor pada fase *charging* terlebih dahulu dimuati hingga mencapai tegangan nominalnya dengan arus konstan 10 A. Setelah itu diberlakukan proses siklus *charge-discharge* dengan waktu setiap fasenya sebesar 10 detik atau kurang dari waktu yang dibutuhkan superkapasitor pada proses *charging* untuk mencapai tegangan nominalnya dan proses *discharging* pada tegangan rendah yang aman yaitu kurang dari 0,1 V.

C. Pemodelan Simulasi Rangkaian RC Dua Cabang

Model simulasi rangkaian RC dua cabang terdapat tiga bagian besar yang terdiri atas beberapa blok, yakni sisi *input*, rangkaian RC dua cabang, dan sisi *output*. Pada sisi *input*, terdapat dua blok *generic step* sebagai representasi DC power supply dan DC electronic load. Pada sisi rangkaian RC dua cabang sebagai model rangkaian ekuivalen. Percabangan pertama terdapat komponen percabangan resistansi R_0 dan kapasitansi linier C_0 dengan kapasitansi variabel $k_v V$ yang terhubung secara parallel. Pada kapasitansi variabel $k_v V$ memiliki nilai kapasitansi yang berubah-ubah terhadap nilai tegangan terminal rangkaian ekuivalennya, maka kapasitor variabel $k_v V$ memiliki input nilai berupa *gain* yang didapatkan dari nilai tegangan terminal rangkaian ekuivalennya sebagai *feedback* pada nilai kapasitansinya. Sedangkan pada percabangan kedua terdapat komponen resistansi R_2 dan kapasitansi tetap C_2 yang terhubung secara seri. Pada sisi *output* sebagai *data logger* yang merupakan representasi dari osiloskop sebagai alat pengukuran pengujian. Besaran dari setiap komponen rangkaian RC dua cabang didapatkan dari



Gambar 9. Model Simulasi Rangkaian RC Dua Cabang Metode Charge-Discharge

proses ekstraksi karakteristik tegangan superkapasitor uji. Pada pemodelan simulasi pengujian dari metode HPPC dilakukan modifikasi sisi input dengan menggunakan dua blok pulse generator untuk memodelkan arus dinamis. Lalu dalam memodelkan rangkaian ekuivalen RC sederhana sebagai rangkaian pembanding dari RC dua cabang dilakukan modifikasi pada sisi rangkaian ekuivalen dengan menggunakan komponen resistansi resistansi R dan kapasitansi konstan C yang terangkai secara seri. Nilai dari komponen R dan C dari rangkaian RC sederhana didapatkan dari datasheet berupa nilai ESR dan kapasitansi nominal superkapasitor Sc-100 dan Sc-650.

IV. HASIL DAN ANALISIS

A. Identifikasi Parameter Internal Rangkaian RC Dua Cabang

Parameter internal rangkaian RC dua cabang didapatkan dari hasil ekstraksi kurva karakteristik tegangan dari pengujian superkapasitor Sc-100 dan Sc-650. Pada kurva karakteristik tegangan uji dilakukan pengukuran parameter-parameter yang dibutuhkan dalam perhitungan nilai komponen setiap percabangannya, sesuai kebutuhan formulasi setiap komponennya. Sehingga setelah dilakukan perhitungan sesuai formulasi, didapatkan parameter internal rangkaian RC dua cabang Sc-100 dan Sc-650 sebagai berikut

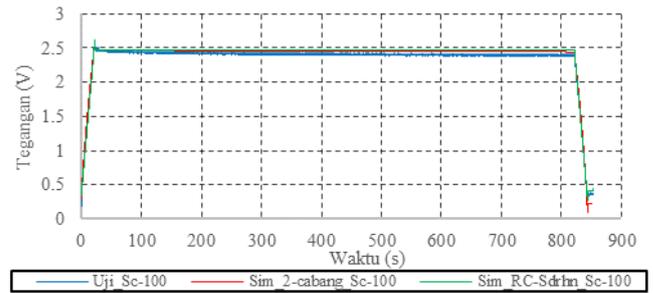
Tabel 1.

Parameter Internal Rangkaian RC Dua Cabang Sc-100 dan Sc-650

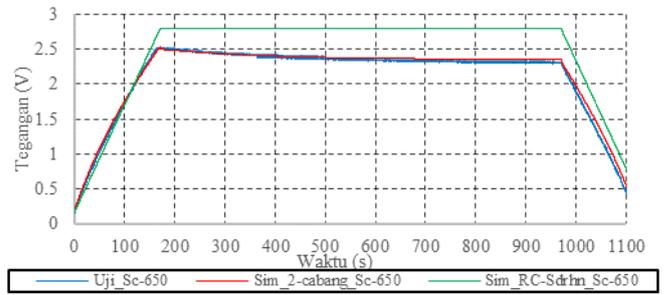
Parameter	Sc-100	Sc-650
R_0 (Ω)	0,012	0,004
C_0 (F)	56,77	422,77
$k_v V$ (F/V)	29,65	202,42
R_2 (Ω)	111,45	2,50
C_2 (F)	2,15	95,95

B. Perbandingan Hasil Pengujian dan Simulasi

Pemodelan simulasi RC dua cabang dengan parameter internal Tabel 1 dan RC sederhana dengan nilai ESR dan kapasitansi nominal superkapasitor, maka didapatkan kurva karakteristik tegangan metode charge-discharge dan HPPC antara model RC dua cabang dan RC sederhana terhadap



(a)



(b)

Gambar 10. Kurva Karakteristik Tegangan antara Simulasi Model RC Dua Cabang dan RC Sederhana (a) Sc-100 dan (b) Sc-650

pengujian sesuai gambar 10.

Pada fase *short term* yang direpresentasikan percabangan pertama telah mencapai tegangan puncak kurva sebesar 2,52 V sesuai tegangan nominal terukur, sedangkan puncak kurva tegangan RC sederhana selalu melebihi daripada tegangan nominalnya, yakni 2,6 volt pada model Sc-100 dan Sc-650 yaitu 2,80 volt. Pada fase ini pula kapasitansi variable mampu memodelkan kurva *charging* superkapasitor yang berbentuk non-linear daripada RC sederhana. Sehingga kapasitansi variabel mampu meningkatkan akurasi pemodelan.

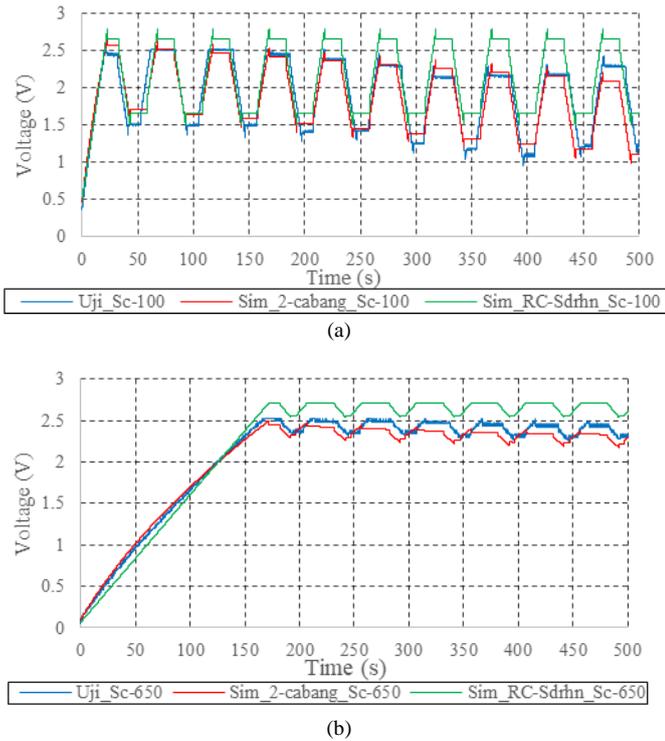
Pada fase *medium-long* model RC dua cabang juga mampu memodelkan fenomena drop tegangan akibat adanya perpindahan muatan yang mengakibatkan *losses I²R*. Sedangkan RC sederhana tidak dilakukannya pemodelan tersebut, sehingga tidak mampu memodelkan fenomena perpindahan muatan pada konstanta waktu yang lebih panjang.

Dengan demikian model RC dua cabang secara keseluruhan dari fase konstanta waktu *short term* dan *medium-long term* lebih akurat dengan *root mean square error* (RMSE) lebih kecil yaitu 4% pada Sc-100 dan 4,3% pada Sc-650 daripada model RC sederhana sebesar 5,76% pada Sc-100 dan Sc-650

Tabel 2.

RMSE Tegangan Hasil Pemodelan Rangkaian Ekuivalen Model RC Dua Cabang dan RC Sederhana Sc-100 dan Sc-650

Superkapasitor	Persentase Error Pemodelan (%)	
	RC Dua Cabang	RC Sederhana
Sc-100	4	5,76
Sc-650	4,3	38,17



Gambar 11. Kurva Karakteristik Tegangan antara Simulasi Model RC Dua Cabang dan RC Sederhana pada Tes Arus Dinamik dari Supercapacitor (a) Sc-100 and (b) Sc-650

sebesar 38,17%.

Begitu juga dengan metode HPPC yang didapatkan akurasi pemodelan RC dua cabang Sc-100 dan Sc-650 yakni sebesar 21,9% dan 9,9% sedangkan RC sederhana yakni 30,1% dan 22% Maka model RC dua cabang memiliki tingkat akurasi yang tinggi dalam memodelkan fenomena tegangan dan efisiensi energi superkapasitor sesungguhnya daripada RC sederhana.

V. KESIMPULAN

Parameter internal superkapasitor dapat dimodelkan menjadi rangkaian ekivalen model RC dua cabang dengan komponen resistor, kapasitor konstan, dan kapasitor variabel. Keberadaan kapasitansi variabel meningkatkan akurasi pemodelan fase *charging* dari rangkaian RC dua cabang dengan pendekatan kurva persamaan polynomial orde dua terhadap karakteristik tegangan pengujian. Sehingga rangkaian RC dua cabang memiliki akurasi pemodelan dengan RMSE tegangan yang lebih tinggi daripada model RC sederhana terhadap hasil pengujian superkapasitor sesungguhnya.

VI. DAFTAR PUSTAKA

- [1] N. Devillers, S. Jemei, M.-C. Péra, D. Bienaimé, and F. Gustin, "Review of characterization methods for

- supercapacitor modelling," Elsevier, vol. 246, no. Journal of Power Sources, pp. 596–608, Jan. 2014.
- [2] P. Johansson and B. Andersson, "Comparison of Simulation Programs for Supercapacitor Modelling," Thesis, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, 2008.
- [3] R. Faranda, "A new parameters identification procedure for simplified double layer capacitor two-branch model," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 80, no. 4, pp. 363–371, Apr. 2010.
- [4] J. Miller, "Introduction to electrochemical capacitor technology," *IEEE Electr. Insul. Mag.*, vol. 26, no. 4, pp. 40–47, Jul. 2010.
- [5] K. R. Patel and R. R. Desai, "Calculation of Internal Parameters of Super Capacitor to Replace Battery by Using Charging and Discharging Characteristics," *Int. J. Eng. Innov. Technol. IJEIT*, vol. 2, no. 1, p. 5, 2012.