

Karakterisasi Dinamis dan Validasi Pemodelan Sirkuit Ekuivalen 1-RC pada Baterai Lithium-Ion 60V 23Ah

Ahmad Rahil Pahlevi¹, Sonki Prasetya^{1,2*}, Candra Damis Widiawati¹

¹Program Studi Teknologi Rekayasa Konversi Energi, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Jakarta, Jl. Prof. G. A. Siwabessy, Kampus UI, Depok, 16425

²Center for Conversion, Conservation and Applied Renewable Energies (CARE), Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Jakarta, Jl. Prof. G. A. Siwabessy, Kampus UI, Depok, 16425

*Corresponding author E-mail address: sonki.prasetya@mesin.pnj.ac.id

Abstrak

Langkah fundamental dalam pengembangan Battery Management System (BMS) kendaraan listrik adalah membangun model matematis baterai yang akurat. Penelitian ini bertujuan mengkarakterisasi parameter dinamis Equivalent Circuit Model (ECM) 1-RC, yaitu Open Circuit Voltage (OCV), hambatan ohmik (R_o), hambatan polarisasi (R_i), dan kapasitansi polarisasi (C_i), pada baterai lithium-ion 60V 23Ah. Ekstraksi parameter nonlinier dilakukan melalui pengujian Pulse Discharge Test dan diimplementasikan ke dalam model digital berbasis lookup table menggunakan MATLAB/Simulink. Validasi model dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi terhadap data pengukuran menggunakan profil pengisian (charging profile). Hasil validasi menunjukkan bahwa model ECM 1-RC mampu merepresentasikan respons tegangan baterai dengan baik, ditunjukkan oleh nilai Root Mean Square Error (RMSE) sebesar 0,141V dan Maximum Error Percentage (MEP) sebesar 0,797%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa model yang dikembangkan memiliki tingkat kesalahan yang rendah sehingga layak digunakan sebagai dasar pengembangan algoritma estimasi pada Battery Management System (BMS).

Kata-kata kunci: Baterai Lithium-Ion, Equivalent Circuit Model (ECM), Parameter Dinamis, Pulse Discharge Test, MATLAB/Simulink, RMSE.

Abstract

Accurate battery mathematical modelling is a fundamental requirement for the development of Electric Vehicle Battery Management Systems (BMS). This study aims to characterize the dynamic parameters of a first-order Equivalent Circuit Model (1-RC ECM), namely the Open Circuit Voltage (OCV), ohmic resistance (R_o), polarization resistance (R_i), and polarization capacitance (C_i), for a 60V 23Ah lithium-ion battery. The nonlinear parameter extraction was performed using the Pulse Discharge Test and implemented into a MATLAB/Simulink digital model based on a lookup table. The developed model was validated by comparing the simulated terminal voltage with experimental measurements under a charging profile. The validation results demonstrate that the proposed 1-RC ECM accurately reproduces the battery voltage response, achieving a Root Mean Square Error (RMSE) of 0.141V and a Maximum Error Percentage (MEP) of 0.797%. These results indicate that the developed model provides high accuracy and can serve as a reliable foundation for the development of battery state estimation algorithms in Battery Management Systems (BMS).

Keywords: Lithium-Ion Battery, Equivalent Circuit Model (ECM), Dynamic Parameters, Pulse Discharge Test, MATLAB/Simulink, RMSE.

1. PENDAHULUAN

Perkembangan kendaraan listrik (*Electric Vehicle*) di Indonesia terus meningkat sebagai upaya mengurangi emisi karbon dan ketergantungan terhadap bahan bakar fosil [1], [2]. Baterai lithium-ion menjadi sumber energi utama karena memiliki densitas energi tinggi, umur pakai panjang, serta laju *self-discharge* yang rendah [1], [3]. Namun, penggunaan baterai berkapasitas besar, seperti baterai Lithium-ion 60V 23Ah pada sepeda motor listrik, memerlukan sistem pemantauan yang andal melalui *Battery Management System* (BMS) untuk menjaga keamanan, efisiensi, dan keandalan operasinya [4], [5].

Salah satu komponen penting dalam pengembangan BMS adalah pemodelan karakteristik baterai menggunakan *Equivalent Circuit Model* (ECM). Model ini merepresentasikan perilaku kelistrikan baterai melalui parameter *Open Circuit Voltage* (OCV), hambatan ohmik (R_o), hambatan polarisasi (R_1), dan kapasitansi polarisasi (C_1) [4], [6], [7]. Akurasi model sangat bergantung pada proses ekstraksi parameter tersebut, yang umumnya dapat diperoleh dari respons tegangan baterai selama proses *discharging* [7], [8].

Meskipun ECM telah banyak digunakan dalam pemodelan baterai lithium-ion, nilai parameter OCV, R_o , R_1 , dan C_1 tidak bersifat universal karena dipengaruhi oleh karakteristik baterai, kondisi operasi, serta metode pengujian yang digunakan [6], [8]. Oleh karena itu, parameter yang diperoleh dari penelitian lain tidak dapat langsung diterapkan pada baterai dengan spesifikasi berbeda tanpa melalui proses karakterisasi dan validasi. Hal ini menunjukkan pentingnya ekstraksi parameter yang sesuai dengan karakteristik baterai yang digunakan agar model mampu merepresentasikan perilaku tegangan baterai secara akurat sebagai dasar pengembangan BMS [4], [6], [9].

Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini bertujuan mengkarakterisasi parameter dinamis ECM 1-RC (OCV, R_o , R_1 , dan C_1) pada baterai lithium-ion 60V 23Ah melalui pengujian *Pulse Discharge Test*. Parameter yang diperoleh kemudian diimplementasikan dalam model MATLAB/Simulink berbasis *lookup table* dan divalidasi dengan membandingkan hasil simulasi terhadap data pengukuran. Keakuratan model dievaluasi menggunakan *Root Mean Square Error* (RMSE) dan *Maximum Error Percentage* (MEP) sebagai dasar pengembangan algoritma estimasi baterai pada BMS [6], [7].

2. METODE PENELITIAN

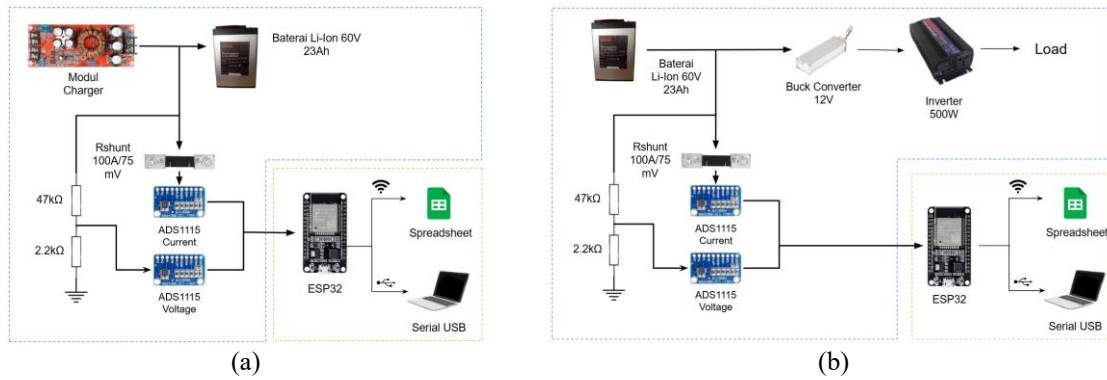
Objek Penelitian dan Perangkat Pengujian

Objek penelitian adalah battery pack Lithium-ion bertegangan nominal 60V dengan kapasitas 23Ah, tersusun atas konfigurasi seri-paralel 17S9P. Spesifikasi lengkap objek pengujian disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Data Spesifikasi Baterai

Parameter Elektrik	Nilai Spesifikasi
Tegangan Nominal	60V
Kapasitas Nominal	23Ah
Jenis Kimia Sel	Lithium-Ion (NCM)
Konfigurasi Baterai	17S 9P
Tegangan Batas Atas (Maksimum Charge)	71,4V
Tegangan Batas Bawah (<i>Cut-off</i>)	54V
Temperatur Pengujian	$30 \pm 2^\circ\text{C}$

Sistem akuisisi data dibangun menggunakan mikrokontroler ESP32 sebagai unit pemroses pusat yang membaca data dari dua modul ADC ADS1115 beresolusi 16-bit. Pengukuran tegangan terminal dilakukan melalui rangkaian voltage divider ($R_1=47\text{k}\Omega$, $R_2=2,2\text{k}\Omega$) untuk menurunkan tegangan baterai (maks. 71,4V) ke batas pembacaan ADC, sedangkan pengukuran arus menggunakan shunt resistor 100A/75mV yang dikonversi menjadi sinyal tegangan milivolt. Data deret waktu direkam secara *real-time* ke *Google Spreadsheet* melalui koneksi Wi-Fi dan ke laptop melalui Serial USB. Skema keseluruhan dari sistem akuisisi data ini, baik untuk fase pengisian maupun pengosongan, diilustrasikan secara lengkap pada Gambar 1.



Gambar 1. Sistem akuisisi data baterai: (a) Skema akuisisi data pengisian, (b) Skema akuisisi data pengosongan serta uji pulsa

Prosedur Adaptasi Uji Pulsa Pengosongan

Karakterisasi parameter ECM dilakukan melalui uji pulsa pengosongan yang diadaptasi dari protokol *Hybrid Pulse Power Characterization* (HPPC). Adaptasi dilakukan karena pengujian menggunakan beban induktif, sehingga menghasilkan dua fase arus yang berbeda: arus puncak sesaat (*inrush*) saat pulsa pertama diberikan, dan arus tunak (*steady-state*) setelah beban stabil. Nilai arus puncak (I_{peak}) digunakan untuk menghitung R_0 , sedangkan nilai arus tunak (I_{steady}) digunakan untuk menghitung R_1 dan C_1 . Prosedur pengujian dilakukan secara sekuensial pada setiap penurunan level SOC sebesar 10% (dari SOC 100% hingga SOC 10%), dengan tahapan sebagai berikut [9], [10]:

1. Pengondisian Awal: Battery pack diisi penuh dengan metode CC-CV hingga tegangan 71,4V, kemudian dibiarkan 1 jam untuk mencapai kesetimbangan termal dan elektrokimia.
2. Pembebanan Pulsa: Beban arus sekitar 5A diberikan selama ± 30 detik. Tegangan terminal (V_t) dan arus (I) direkam secara *real-time* dengan resolusi tinggi untuk menangkap respons transien penurunan tegangan sesaat.
3. Relaksasi: Beban diputus dan baterai dibiarkan dalam kondisi rangkaian terbuka (*open circuit*) selama 10 menit hingga tegangan terminal merayap menuju nilai OCV baru.

Langkah (2) dan (3) diulang secara siklik pada setiap titik SOC hingga tegangan mencapai batas bawah 54V. Seluruh data koordinat tegangan dan waktu dari fase transien ini menjadi basis perhitungan parameter ECM pada tahap berikutnya[9].

Ekstraksi Parameter ECM 1-RC

Parameter sirkuit ekuivalen 1-RC diekstrak secara analitis dari data respon transien tegangan hasil uji pulsa menggunakan tiga persamaan berikut[6], [10].

Hambatan ohmik (R_0) dihitung dari penurunan tegangan sesaat (ΔV_{inst}) yang terjadi pada momen pertama pulsa diberikan V_0 ke V_1 terhadap arus puncak I_{peak} :

$$R_0 = \frac{\Delta V_{inst}}{I_{peak}} = \frac{V_0 - V_1}{I_{peak}} \quad (1)$$

Hambatan polarisasi (R_1) diekstrak dari selisih tegangan antara kondisi stabil akhir fase pembebanan (V_∞) dan tegangan sesaat (V_{start}), dibagi arus tunak I_{steady} :

$$R_1 = \frac{V_\infty - V_{start}}{I_{steady}} \quad (2)$$

Kapasitansi polarisasi (C_1) dihitung dari konstanta waktu (τ) kurva pemulihan eksponensial selama fase relaksasi, di mana τ didefinisikan sebagai waktu yang dibutuhkan tegangan mencapai 63,2% pemulihan penuh:

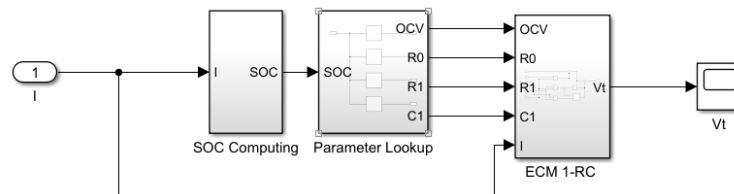
$$C_1 = \frac{\tau}{R_1} \quad (3)$$

Prosedur (1)–(3) diulang pada setiap titik SOC (10%–100%) sehingga menghasilkan *lookup table* parameter nonlinear R_0 , R_1 , C_1 sebagai fungsi SOC Tabel 2. OCV pada setiap titik SOC juga dicatat dari nilai tegangan stabil akhir fase relaksasi untuk membangun kurva OCV-SOC. Seluruh kalkulasi dilakukan menggunakan skrip MATLAB yang memproses data deret waktu dari sistem akuisisi.

Validasi Model ECM

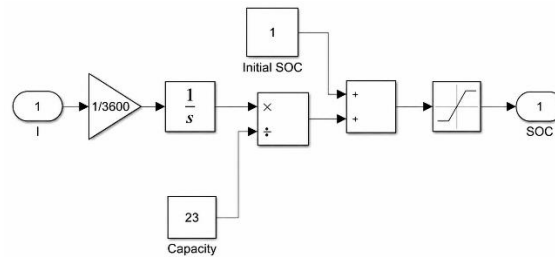
Validasi model ECM dilakukan dengan membandingkan tegangan terminal hasil simulasi (V_{sim}) terhadap tegangan terminal hasil pengukuran (V_{sensor}) menggunakan profil arus pengisian yang sama. Model dikembangkan di lingkungan MATLAB/Simulink dengan memanfaatkan parameter hasil ekstraksi berupa OCV, R_0 , R_1 , dan C_1 yang bergantung pada SOC. Akurasi model kemudian dievaluasi menggunakan RMSE dan MEP.

Implementasi model dilakukan secara modular agar setiap tahapan perhitungan dapat dipisahkan berdasarkan fungsinya. Arsitektur keseluruhan simulasi yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Arsitektur keseluruhan model simulasi ECM 1-RC.

Pada model utama, sinyal arus pengisian digunakan sebagai masukan untuk dua proses secara bersamaan, yaitu perhitungan *State of Charge* (SOC) dan perhitungan tegangan terminal baterai. Hasil perhitungan SOC selanjutnya digunakan sebagai indeks untuk memperoleh parameter dinamis baterai melalui *lookup table*. Rangkaian perhitungan SOC diperlihatkan pada Gambar 3.

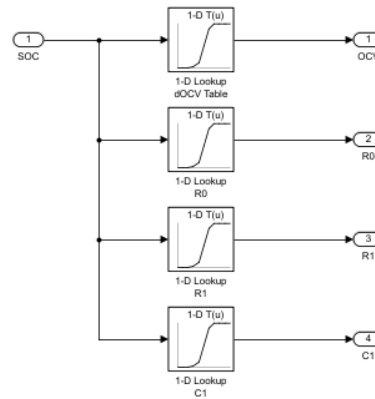


Gambar 3. Submodel perhitungan (SOC) menggunakan metode *Coulomb Counting*

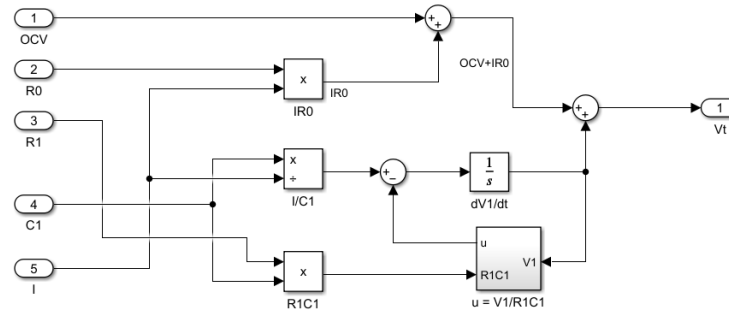
Perhitungan *State of Charge* (SOC) dilakukan menggunakan metode *Coulomb Counting* dengan mengintegrasikan arus pengisian terhadap waktu berdasarkan kapasitas nominal baterai[5], [11]. Pada penelitian ini, arus pengisian didefinisikan bernilai positif sehingga nilai SOC meningkat selama proses pengisian. Persamaan *Coulomb Counting* dinyatakan sebagai:

$$SOC(t) = SOC_0 + \frac{1}{C_n} \int_0^t I(\tau) d\tau \quad (4)$$

dengan $SOC(t)$ adalah nilai *State of Charge* pada waktu t , SOC_0 adalah nilai SOC awal, C_n merupakan kapasitas nominal baterai sebesar 23Ah, dan $I(\tau)$ adalah arus pengisian sebagai fungsi waktu. Nilai SOC yang diperoleh selanjutnya digunakan sebagai masukan pada *lookup table* untuk memperoleh parameter OCV, R_0 , R_1 , dan C_1 . Submodel parameter *lookup table* ditunjukkan pada Gambar 4.

Gambar 4. Submodel *lookup table* parameter OCV, R_0 , R_1 , dan C_1 berbasis SOC.

Parameter OCV, R_0 , R_1 , dan C_1 diperbarui secara *real-time* berdasarkan perubahan SOC, kemudian bersama arus pengisian digunakan sebagai masukan pada submodel ECM 1-RC untuk menghitung tegangan terminal baterai Gambar 5.



Gambar 5. Submodel perhitungan tegangan terminal menggunakan ECM 1-RC.

Pada submodel ECM 1-RC, tegangan terminal dihitung menggunakan kombinasi OCV, rugi-rugi hambatan ohmik (R_0), dan tegangan polarisasi pada cabang RC (V_1) [4], [6], [7]. Pada penelitian ini, data arus pengisian (*charging*) didefinisikan bernilai positif, sehingga persamaan tegangan terminal dituliskan sebagai:

$$V_t = OCV + IR_0 + V_1 \quad (5)$$

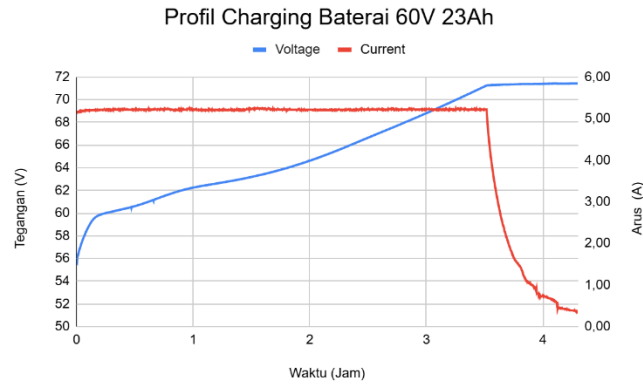
dengan V_t merupakan tegangan terminal baterai, OCV adalah tegangan sirkuit terbuka, I adalah arus pengisian, R_0 merupakan hambatan ohmik, dan V_1 adalah tegangan polarisasi yang diperoleh dari dinamika cabang RC. Persamaan (5) menunjukkan bahwa selama proses pengisian, tegangan terminal merupakan penjumlahan antara OCV, rugi-rugi hambatan ohmik, dan tegangan polarisasi sesuai konvensi arus yang digunakan pada penelitian ini. Tegangan polarisasi dihitung menggunakan persamaan keadaan

$$\frac{dV_1}{dt} = \frac{I}{C_1} - \frac{V_1}{R_1 C_1} \quad (6)$$

Persamaan tersebut diimplementasikan menggunakan blok integrator pada MATLAB/Simulink, sedangkan parameter OCV, R_0 , R_1 , dan C_1 diperbarui secara *real-time* berdasarkan nilai SOC melalui *lookup table*. Output tegangan terminal hasil simulasi kemudian dibandingkan dengan hasil pengukuran aktual untuk mengevaluasi tingkat akurasi model.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

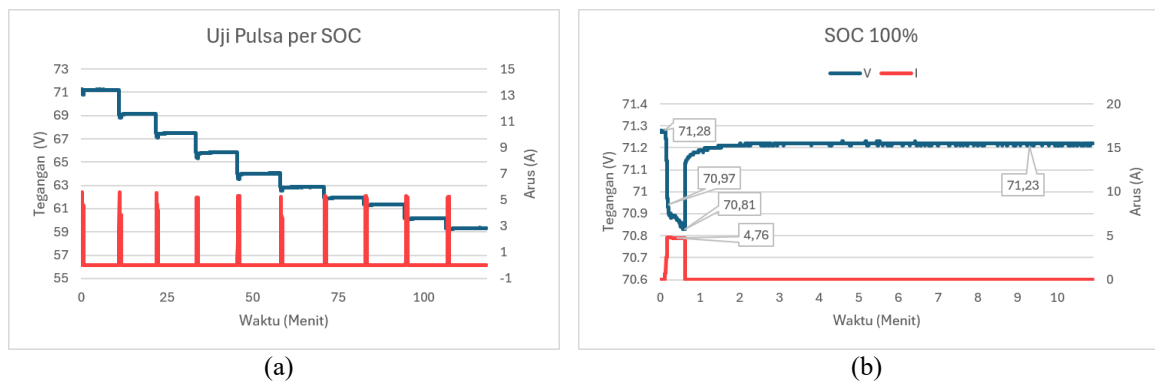
Sebelum ekstraksi parameter, profil pengisian daya baterai direkam untuk dijadikan data referensi validasi. Gambar 6 menunjukkan data profil *charging* yang diperoleh dari pengukuran sensor fisik.



Gambar 6. Profil charging baterai hasil pengukuran sensor fisik

Karakteristik pengisian daya baterai 60V 23Ah yang direkam menggunakan sensor fisik ditunjukkan pada Gambar 6. Profil arus pengisian tersebut digunakan sebagai masukan simulasi untuk memvalidasi akurasi model ECM.

Setelah memetakan profil *charging*, proses ekstraksi parameter dinamis sirkuit ekuivalen dilakukan dengan memanfaatkan pengujian pulsa arus. Visualisasi dari respons transien tegangan terminal dan injeksi arus selama pengujian tersebut ditunjukkan pada Gambar 7. Gambar 7(a) memperlihatkan keseluruhan rentetan pulsa, sedangkan Gambar 7(b) menyoroti detail transien pada kondisi kapasitas penuh (SOC 100%).

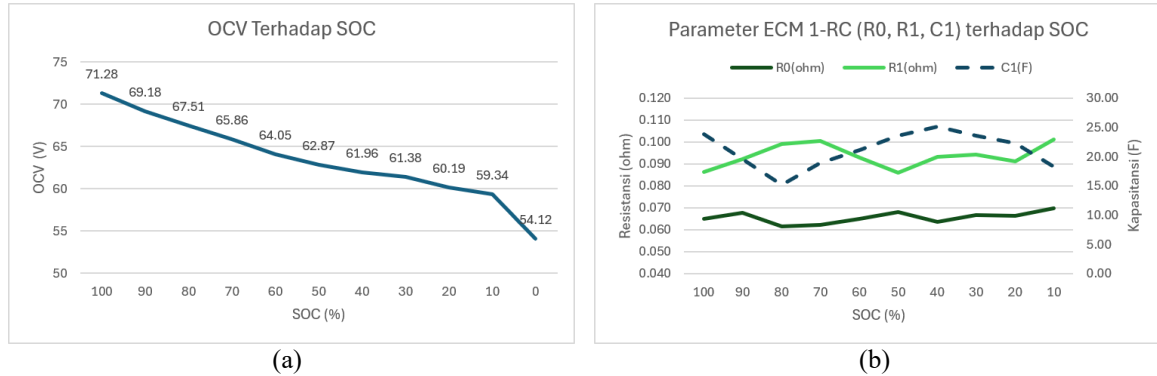
Gambar 7. Profil respons transien tegangan dan arus: (a) keseluruhan uji pulsa (*pulse test*); (b) perbesaran respons pada kondisi SOC 100%

Parameter model sirkuit ekuivalen (R_0 , R_1 , C_1 , dan OCV) diekstrak secara analitis dari data respons transien tegangan hasil uji pulsa menggunakan persamaan (1)–(3). Prosedur ini dilakukan secara berurutan pada setiap titik SOC dari 100% hingga 10%, menghasilkan *lookup table* parameter nonlinear yang disajikan pada Tabel 2. Sebagai representasi hasil, pada kondisi SOC 100% diperoleh nilai $R_0 = 0,065 \, \Omega$, $R_1 = 0,088 \, \Omega$, $C_1 = 23,86 \, \text{F}$, dan $\text{OCV} = 71,28 \, \text{V}$. Nilai konstanta waktu relaksasi $\tau = 2,10$ detik pada SOC 100% diperoleh dari analisis kurva pemulihan eksponensial fase relaksasi berdasarkan kriteria pemulihan 63,2%, sesuai dengan prosedur yang ditetapkan

Tabel 2. Hasil ekstraksi parameter kelistrikan pemodelan ECM 1-RC pada berbagai tingkat SOC

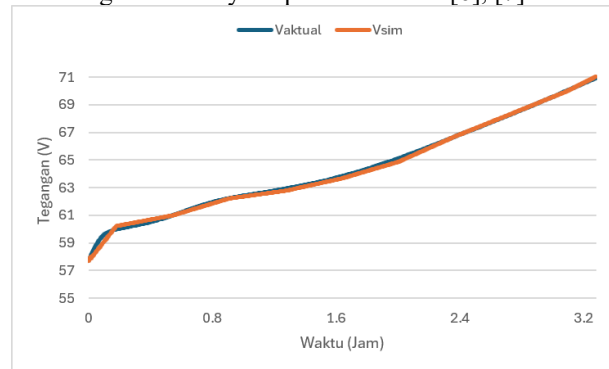
SOC (%)	OCV(V)	$R_0(\Omega)$	$R_1(\Omega)$	$C_1(\text{F})$
100	71,28	0,065	0,088	23,86
90	69,18	0,068	0,092	19,54
80	67,51	0,061	0,099	15,15
70	65,86	0,062	0,100	18,93
60	64,05	0,065	0,093	21,19
50	62,87	0,068	0,086	23,57

40	61,96	0,064	0,093	25,09
30	61,38	0,067	0,094	23,63
20	60,19	0,066	0,091	22,35
10	59,34	0,070	0,101	18,29



Gambar 8. Karakteristik dinamika parameter hambatan (R_0 , R_1) dan kapasitansi polarisasi (C_1) terhadap penurunan SOC

Berdasarkan data dari Tabel 2, karakteristik dinamika parameter internal ECM 1-RC dipetakan pada Gambar 8. Secara visual, nilai hambatan ohmik (R_0) cenderung stabil di kisaran 0,061 Ω hingga 0,068 Ω pada rentang SOC menengah, namun mengalami lonjakan hingga 0,070 Ω saat SOC kritis (10%). Peningkatan R_0 pada SOC rendah menunjukkan bertambahnya resistansi internal akibat berkurangnya konsentrasi ion litium aktif serta meningkatnya hambatan transfer muatan, sehingga rugi-rugi ohmik menjadi lebih dominan [4], [8], [9], di sisi lain, komponen polarisasi (R_1 dan C_1) menunjukkan fluktuasi non-linear yang merepresentasikan perubahan karakteristik polarisasi elektrokimia baterai dalam menyimpan muatan transien akibat lambatnya laju transfer massa elektrolit seiring menurunnya kapasitas muatan [6], [7] .



Gambar 9. Validasi komparasi tegangan terminal aktual (sensor) dan simulasi pada fase *charging*

Tabel 3. Hasil evaluasi tingkat akurasi pemodelan sirkuit ekuivalen 1-RC

Parameter Evaluasi	RMSE (V)	MEP(%)
V_t	0,141	0,797

Keandalan parameter ECM-1RC yang telah diekstrak diuji melalui simulasi validasi silang pada fase pengisian daya (*charging*), yang hasilnya disajikan pada Gambar 5. Kurva tegangan terminal hasil komputasi model (V_{sim}) terlihat berimpit secara presisi dan mengikuti tren kenaikan kurva tegangan pengukuran aktual (V_{aktual}) dari awal hingga akhir siklus pengisian. Evaluasi kuantitatif pada Tabel 3 menegaskan tingginya akurasi pemodelan ini, dengan perolehan nilai *Root Mean Square Error* (RMSE) tegangan yang sangat rendah yakni 0,141V. Nilai RMSE sebesar 0,141V menunjukkan bahwa deviasi rata-rata antara tegangan hasil simulasi dan hasil pengukuran relatif kecil dibandingkan tegangan nominal baterai 60V. Selain itu, nilai MEP sebesar 0,797%, sehingga model ECM 1-RC memiliki akurasi yang relatif rendah baik diaplikasikan untuk BMS.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil karakterisasi dan pemodelan *Equivalent Circuit Model* (ECM) 1-RC pada baterai lithium-ion 60V 23Ah, parameter kelistrikan yang meliputi *Open Circuit Voltage* (OCV), hambatan ohmik (R_o), hambatan polarisasi (R_i), dan kapasitansi polarisasi (C_i) berhasil diekstraksi dan menunjukkan karakteristik nonlinier terhadap perubahan *State of Charge* (SOC). Hasil validasi menggunakan MATLAB/Simulink pada profil pengisian (*charging profile*) menunjukkan bahwa model ECM 1-RC mampu merepresentasikan respons tegangan baterai dengan baik, yang ditunjukkan oleh nilai *Root Mean Square Error* (RMSE) sebesar 0,141V dan *Maximum Error Percentage* (MEP) sebesar 0,797%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa model memiliki tingkat kesalahan yang rendah sehingga valid dan andal sebagai dasar pengembangan model baterai untuk algoritma estimasi pada *Battery Management System* (BMS).

REFERENSI

- [1] S. Prasetya, M. Todaro, and H. M. Ridlwan, "Development of IoT-based Monitoring of the Lithium-Ion Battery Pack for a Two-Wheeled Vehicle Ecosystem," vol. 04, no. 02, 2026, doi: 10.59511/riestech.v4i02.137.
- [2] F. Zainuri *et al.*, "Electric Vehicle Conversion Study for Sustainable Transport," vol. 01, no. 02, 2023, doi: 10.59511/riestech.v1i0.
- [3] I. Assagaf *et al.*, "Comparative Analysis of Regression Methods for Estimation of Remaining Useful Life of Lithium Ion Battery," *Recent in Engineering Science and Technology*, vol. 3, no. 01, pp. 9–18, Jan. 2025, doi: 10.59511/riestech.v3i01.93.
- [4] D. P. Laudani, D. Milillo, M. Quercio, F. Riganti Fulginei, and L. Sabino, "A Comprehensive Review of Equivalent Circuit Models and Neural Network Models for Battery Management Systems," Jan. 01, 2026, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/batteries12010037.
- [5] K. Movassagh, A. Raihan, B. Balasingam, and K. Pattipati, "A critical look at coulomb counting approach for state of charge estimation in batteries," *Energies (Basel)*, vol. 14, no. 14, Jul. 2021, doi: 10.3390/en14144074.
- [6] G. Barletta, P. DiPrima, and D. Papurello, "Thévenin's Battery Model Parameter Estimation Based on Simulink," *Energies (Basel)*, vol. 15, no. 17, Sep. 2022, doi: 10.3390/en15176207.
- [7] Y. Li, H. Qi, X. Shi, Q. Jian, F. Lan, and J. Chen, "A Physics-Based Equivalent Circuit Model and State of Charge Estimation for Lithium-Ion Batteries," *Energies (Basel)*, vol. 17, no. 15, Aug. 2024, doi: 10.3390/en17153782.
- [8] S. M. Rakiul Islam, S. Y. Park, and B. Balasingam, "Unification of internal resistance estimation methods for li-ion batteries using hysteresis-free equivalent circuit models," *Batteries*, vol. 6, no. 2, pp. 1–20, Jun. 2020, doi: 10.3390/batteries6020032.
- [9] M. K. Tran, A. Dacosta, A. Mevawalla, S. Panchal, and M. Fowler, "Comparative study of equivalent circuit models performance in four common lithium-ion batteries: LFP, NMC, LMO, NCA," *Batteries*, vol. 7, no. 3, Sep. 2021, doi: 10.3390/batteries7030051.
- [10] R. R. Thakkar, "Electrical Equivalent Circuit Models of Lithium-ion Battery," 2021. [Online]. Available: www.intechopen.com
- [11] A. Gismero, E. Schaltz, and D. I. Stroe, "Recursive state of charge and state of health estimation method for lithium-ion batteries based on coulomb counting and open circuit voltage," *Energies (Basel)*, vol. 13, no. 7, Apr. 2020, doi: 10.3390/en13071811.