



## Pemodelan Dinamik *Solar Cell* dengan Metode Pendekatan *Shepherd* Modifikasi

Wahyu Diski Pratama, Bidayatul Khoiriyah, Bella Octa Avenia, Supriyono\*

Jurusan Teknik Kimia, Universitas Brawijaya, Jl. Mayjend Haryono 167, Malang, 65145, Indonesia

\*E-mail: [supriyono16@ub.ac.id](mailto:supriyono16@ub.ac.id)

### ABSTRAK

Pemerintah Indonesia menargetkan konsumsi listrik sebanyak 1.129 kWh/kapita pada tahun 2018. Energi alternatif terbarukan merupakan salah satu solusi dalam mengatasi masalah kenaikan konsumsi listrik yang bertambah setiap tahunnya. Salah satu dari energi alternatif terbarukan adalah *solar cell*. *Solar cell* yang digunakan pada mobil listrik sebagai pengisi daya dapat membantu mengurangi konsumsi listrik konvensional. Penelitian ini dilakukan untuk memprediksi kondisi optimum serta cara pengontrolan sebagai sumber energi yang dapat dimanfaatkan. Metode yang dilakukan untuk memprediksi kondisi optimum *solar cell* adalah dengan pemodelan *Shepherd* yang tahapannya meliputi pemodelan simulasi *solar cell* untuk rangkaian, pemodelan simulasi *solar cell Shepherd* untuk kendaraan listrik (EVs), dan model sirkuit ekuivalen. Kemudian, menyusun pendekatan pemodelan dengan penyusunan persamaan voltase dan arus *discharge* serta memberikan asumsi-asumsi pada parameter model. Parameter-parameter *discharge solar cell* berdasarkan data manufaktur yaitu  $Q_{full}$  1034,32031 mAh/gram,  $V_{full}$  17,5177 Volt,  $Q_{exp}$  999,2730931 mAh/gram,  $V_{exp}$  11,46641134 Volt,  $Q_{nom}$  0,854810174 mAh/gram,  $V_{nom}$  0 Volt,  $SOC_{min}$  9,67% dan  $SOC_{max}$  95,05%. Dari hasil algoritma data simulasi didapatkan parameter-parameter *discharge solar cell* yaitu  $E_0$  12,53704928 Volt,  $R_0$  0,012 m $\Omega$ ,  $K_{dr}$  0,01 m $\Omega$ ,  $K_{dv}$  0,044148043 Volt/mA.h,  $A$  4,9956 Volt,  $B$  2,971366829 (mA.h)<sup>-1</sup>,  $SOC_{min}$  9,67% dan  $SOC_{max}$  95,05%.

**Kata kunci:** *discharge solar cell*, pemodelan, *Shepherd*, simulasi, *solar cell*

### ABSTRACT

The Indonesian government targets electricity consumption of 1.129 kWh/capita in 2018. Renewable energy alternative energy is one solution in overcoming the problem of increasing electricity consumption which increase every year. One of the renewable alternative energy is solar cell. Solar cells used in electric cars as chargers can help reduce conventional electricity consumption. This research was conducted to predict the optimum conditions and how to control it as an energy source that can be utilized. The method used to predict the optimum condition of the solar cell is Shepherd modeling whose stages include solar cell simulation modeling for circuits, Shepherd solar cell simulation modeling for electric vehicle (Evs), and equivalent circuit models. Then, develop a modeling approach by compiling the equations of voltage and discharge current and provide assumptions on the model parameters. The discharge parameters of the solar cell based on manufacturing data are  $Q_{full}$  1034,32031 mAh/gram,  $V_{full}$  17,5177 Volt,  $Q_{exp}$  999,2730931 mAh/gram,  $V_{exp}$  11,46641134 Volt,  $Q_{nom}$  0,854810174 mAh/gram,  $V_{nom}$  0 Volt,  $SOC_{min}$  9,67% and  $SOC_{max}$  95,05%. From the results of the simulation data algorithm, the parameters of the solar cell discharge are  $E_0$  12,53704928 Volt,  $R_0$  0,012 m $\Omega$ ,  $K_{dr}$  0,01 m $\Omega$ ,  $K_{dv}$  0,044148043 Volt/mA.h,  $A$  4,9956 Volt,  $B$  2,971366829 (mA.h)<sup>-1</sup>,  $SOC_{min}$  9,67% and  $SOC_{max}$  95,05%.

**Keywords:** discharge solar cell, modeling, Shepherd, simulation, solar cell

### 1. PENDAHULUAN

Data Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) menyebutkan bahwa konsumsi listrik Indonesia pada tahun 2017 mencapai 1.012 kiloWatt per hour kWh/kapita, naik 5,9% dari tahun

sebelumnya. Pada tahun 2018, pemerintah menargetkan konsumsi listrik masyarakat akan meningkat menjadi 1.129 kWh/kapita [1]. Solusi dari permasalahan peningkatan konsumsi listrik tiap tahunnya adalah adanya energi alternatif terbarukan. Akhir-akhir ini,



*solar cell* banyak dikembangkan untuk memenuhi energi listrik pada mobil listrik. *Solar cell* pada mobil listrik digunakan sebagai energi sekunder untuk pengisian daya baterai. Dengan adanya *solar cell* pada mobil listrik dapat semakin panjang. Secara tidak langsung, penggunaan *solar cell* pada mobil listrik dapat membantu mengurangi konsumsi listrik konvensional yang dihasilkan dari *steam power plant* batu bara. Hal ini selaras dengan cita-cita Indonesia menuju 2030 SDGs (*Sustainable Development Goals*).

Simulasi model *solar cell* diperlukan untuk memprediksi kondisi optimum dan kemungkinan cara mengontrolnya sebagai sumber energi yang dapat dimanfaatkan. Pemodelan dinamik *solar cell* dapat diprediksi dengan pemodelan dinamik *discharge* baterai. Pemodelan dinamik untuk baterai banyak dibahas di sejumlah sumber referensi [2]. Akan tetapi, pemodelan *solar cell* belum banyak dibahas secara luas. Metode eksperimen yang digunakan untuk mencari kondisi optimum pengoperasian *solar cell* membutuhkan waktu yang lama dan mahal. Simulasi membutuhkan waktu yang relatif lebih singkat dan murah untuk menentukan kondisi optimum pengoperasian *solar cell*.

Pendekatan model dasar sirkuit elektrik banyak digunakan dalam mempresentasikan karakteristik *solar cell*. Model dasar sirkuit elektrik yang paling sederhana terdiri dari sumber tegangan ideal yang disusun secara seri dengan hambatan internal [3]. Model dasar sirkuit ini sangat sederhana, akan tetapi kurang bisa mewakili kondisi *state of charge* (SOC). Model sirkuit dasar yang lain berdasarkan voltase sirkuit terbuka dalam hubungan seri dengan sistem tahanan dan kapasitor yang terhubung paralel yang disebut dengan *Warburg impedance* [4]. Identifikasi parameter-parameter pada model ini dinamakan *impedance spectroscopy* [5]. *Shepherd* mengembangkan persamaan untuk mendeskripsikan parameter elektrokimia baterai secara langsung pada terminal dari voltase terminal, voltase sirkuit terbuka,

hambatan dalam, arus *discharge*, dan *state of charge* (SOC) [6]. Model *Shepherd* cukup penting, tetapi menyebabkan masalah *looping* algoritma pada simulasi *loop* tertutup pada model modular.

Pada penelitian ini pemodelan yang digunakan sangat mirip dengan model *Shepherd* tetapi tidak sampai terjadi masalah *looping* algoritma. Model menggunakan data manufaktur dari kurva *discharge solar cell*. Kurva *discharge* berdasarkan data studi literatur juga digunakan untuk memvalidasi model yang didapat.

## 2. METODE PENELITIAN

Pada penelitian ini menggunakan berbagai pemodelan simulasi *solar cell*, diantaranya adalah,

### 2.1 MODEL SIMULASI SOLAR CELL UNTUK RANGKAIAN

Model ini merupakan model simulasi *solar cell* untuk rangkaian yang diperlukan dalam penelitian. *Solar cell* yang digunakan tidak hanya satu sel, melainkan beberapa sel yang tersusun baik secara seri maupun paralel. Persamaan (1) menunjukkan model *solar cell* untuk rangkaian yang umum digunakan untuk perhitungan voltase *discharge*,

$$E_b(0) = E(0) + \sum_{t=1}^i E(t)$$

$$E(t) = P_B(t) \cdot T \quad (1)$$

$$E_{min} \leq E(0) \leq E_{max}$$

dimana  $E(0)$  adalah energi awal (*initial energy*) dari *solar cell*,  $E(t)$  adalah akumulasi energi *solar cell* pada waktu tertentu ( $t$ ).  $T$  adalah waktu penggunaan (*discharge*) *solar cell*,  $P_B(t)$  adalah daya *solar cell*,  $E_{min}$  adalah batas minimal energi *solar cell* yang tersimpan,  $E_{max}$  adalah batas maksimal energi *solar cell* yang tersimpan. Nilai masing-masing dari  $E_{min}$  dan  $E_{max}$  berdasarkan rentang pengoperasian SOC [7]. Persamaan (1) merupakan persamaan yang sederhana untuk disimulasikan karena termasuk persamaan orde pertama.

Persamaan orde pertama, adalah persamaan yang mempunyai pola linier.

## 2.2 MODEL SIMULASI SOLAR CELL SHEPHERD UNTUK KENDARAAN LISTRIK (EVS)

Model simulasi *solar cell* untuk kendaraan listrik memiliki variabel yang lebih banyak daripada model *solar cell* untuk skala rangkaian, sebab adanya pengaruh deselerasi dan akselerasi. Kondisi pengoperasian *solar cell* juga memiliki kemiripan dengan model baterai kendaraan listrik berupa cahaya matahari dengan intensitas yang dinamis. Intensitas cahaya matahari yang dinamis menyebabkan intensitas cahaya yang dinamis pula. Model simulasi ini menggambarkan lebih detail daripada model untuk skala rangkaian. Model sirkuit ekuivalen untuk voltase dan arus dideskripsikan bagaimana voltase terminal dari *solar cell* berubah terhadap waktu. Model simulasi ini menggunakan model *Shepherd* untuk arus *discharge* konstan yang ditunjukkan dengan persamaan (2),

$$V_{sc}(t) = E_0 - K_{dv} \cdot \frac{Q}{Q-i \cdot t} \cdot i(t) - R_0 \cdot i(t) \quad (2)$$

dimana  $E_0$  adalah voltase konstan *solar cell* (V),  $K_{dv}$  adalah konstanta polaritas voltase (V/Ah),  $Q$  adalah kapasitas penuh *solar cell*

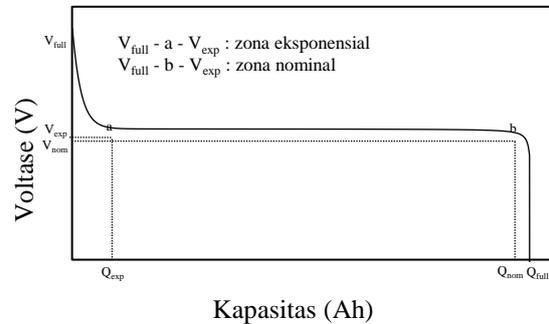
$$V_{sc}(t) = E_0 - K_{dr} \cdot \frac{Q}{Q-i^* \cdot t} \cdot (i^*) - K_{dv} \cdot \frac{Q}{Q-i^* \cdot t} \cdot i(t) - R_0 \cdot i(t) + A \cdot e^{-B \cdot i \cdot t} \quad (3)$$

dimana  $A$  adalah amplitudo pada zona eksponensial (V),  $B$  adalah invers konstan waktu pada zona eksponensial ( $A \cdot h^{-1}$ ), dan  $i^*$  adalah arus listrik terfilter yang melewati tahanan polarisasi (A),  $K_{dr}$  adalah koefisien resistansi polarisasi ( $\Omega$ ), dan  $K_{dv}$  adalah koefisien *overvoltage* polarisasi (V/a.h).

## 2.3 MODEL SIRKUIT EQUIVALEN

Berbagai macam pendekatan pemodelan *solar cell* tergantung pada spesifikasi apa yang diinginkan, termasuk pendekatan secara eksperimental, elektrokimia, dan model dasar sirkuit elektrik [8]. Model-model sirkuit

(Ah),  $V_{sc}(t)$  adalah voltase terminal *solar cell* terhadap waktu ( $t$ ),  $(i \cdot t)$  adalah kapasitas *discharge* (Ah) terhadap perubahan waktu, dan  $i(t)$  adalah arus dinamik (A) terhadap waktu.

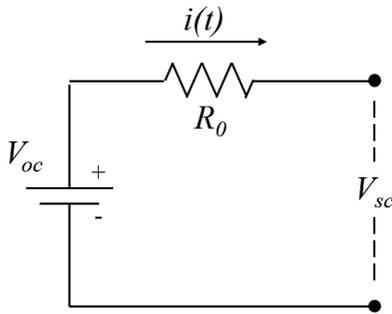


**Gambar 1.** Model kurva ideal untuk properti *discharge solar cell*

Parameter *discharge solar cell* dapat diturunkan berdasarkan model *Shepherd* [9]. Kurva *discharge* ideal *solar cell* ditunjukkan pada Gambar 1. Parameter yang didapat dari Gambar 1 berupa voltase dan kapasitas *discharge* yang dapat digunakan untuk menentukan parameter konstan yaitu  $K$ ,  $R_0$ , dan  $E_0$ . Model *solar cell Shepherd* adalah model modifikasi umum untuk mendeskripsikan parameter *exponential solar cell* lebih mendalam [9]. Pemodelan ini dikenal dengan *Shepherd* modifikasi [9]. Persamaan *discharge* untuk model *Shepherd* modifikasi ditunjukkan pada persamaan (3),

ekuivalen cukup sederhana dan dapat mewakili kondisi parameter *steady state* dan dinamik *solar cell* [8]. Sebuah pendekatan sirkuit ekuivalen banyak dipakai karena pertimbangan waktunya yang singkat dalam simulasi [10]. Pada pemodelan order tinggi, permasalahan optimasi sulit mendekati hasil yang konvergen, bahkan memungkinkan untuk tidak dapat diselesaikan secara efisien. Pada mobil sirkuit ekuivalen, hambatan internal ( $R_{int}$ ) mempunyai nilai voltase konstan di dalam susunan seri dengan sebuah resistor yang mana ditunjukkan pada Gambar 2 [8]. Pada Gambar 2,  $i(t)$  adalah arus

dinamik internal dari *solar cell* ( $A$ ),  $R_0$  adalah hambatan internal *solar cell* ( $\Omega$ ),  $V_{batt}$  adalah voltase output terminal *solar cell*, dan  $V_{oc}$  adalah voltase input *solar cell*. Voltase output terminal untuk model Rint ditunjukkan pada persamaan 4.



**Gambar 2.** Model sirkuit ekuivalen Rint

$$V_{sc}(t) = V_{oc} - R_0 \cdot i(t) \quad (4)$$

Model ini tidak termasuk *SOC solar cell* secara langsung. Akan tetapi, *SOC solar cell* dapat dinyatakan sebagai fungsi voltase pada sirkuit terbuka (*open circuit*). Sirkuit ekuivalen yang lain memasukkan pengaruh dari polarisasi *solar cell* menggunakan sirkuit paralel resistor-kapasitor (RC). Meskipun model sirkuit paralel RC lebih detail dalam memprediksi parameter *discharge*, namun persamaan diferensial yang mana mempresentasikan kapasitor menyebabkan permasalahan *looping* algoritma. Pada penelitian ini, digunakan model sirkuit ekuivalen Rint untuk menghindari permasalahan *looping* algoritma.

#### 2.4 PENYUSUNAN PERSAMAAN VOLTASE DAN ARUS DISCHARGE

*Fitting* regresi untuk data manufaktur dan sirkuit ekuivalen digunakan untuk mempresentasikan parameter *discharge* dari *solar cell*. Penyusunan persamaan voltase dan arus adalah penggabungan antara model *Shepherd* pada persamaan (2) dan model modifikasi *Shepherd* pada persamaan (3). Parameter  $A$  dan  $B$  pada persamaan (3) diturunkan dari titik pada zona eksponensial dari kurva *discharge* ideal yang ditunjukkan pada Gambar 1.

Berdasarkan *discharge* manufaktur *solar cell*, didapatkan parameter-parameter *solar cell* ( $V_{full}$ ,  $V_{exp}$ ,  $V_{nom}$ ,  $Q_{full}$ ,  $Q_{exp}$ , dan  $Q_{nom}$ ), perhitungan untuk simulasi kurva *discharge* yang dapat dilakukan antara lain,

1. Amplitudo voltase pada zona eksponensial ( $A$ , satuan unit Volt)  
Zona eksponensial dari amplitudo, atau  $A$  dihitung berdasarkan persamaan,

$$A = V_{full} - V_{exp} \quad (5)$$

2. *Charge at end* dari zona eksponensial ( $B$ , satuan unit  $A \cdot h^{-1}$ )  
*Charge at end* dari zona eksponensial dari kurva *discharge solar cell*, atau  $B$  dihitung menggunakan persamaan,

$$B = \frac{2,5}{Q_{exp}} \quad (6)$$

Nilai skalar yang digunakan adalah 2,5 untuk memperbaiki *fitting* dari data *solar cell*.

3. Koefisien *overvoltage* polarisasi ( $K_{dv}$ , satuan unit  $V/A \cdot h$ )  
Koefisien *overvoltage* polarisasi,  $K_{dv}$  dihitung menggunakan  $V_{full}$  dan bagian akhir dari zona nominal dari kurva *discharge* yang menggunakan persamaan,

$$K = 0,0005 \cdot \left[ V_{full} - V_{nom} + A \cdot (e^{-B \cdot Q_{nom}} - 1) \cdot \frac{Q_{full} - Q_{nom}}{Q_{nom}} \right] \quad (7)$$

4. Hambatan dalam ( $R$ , satuan unit  $\Omega$ )  
Hambatan dalam *solar cell* pada arus *steady state* direpresentasikan dengan  $R$  yang ditunjukkan dengan persamaan,

$$R = V_{nom} \left( \frac{1 - \eta}{\lambda \cdot Q_{nom}} \right) \quad (8)$$

Dimana  $\eta$  merupakan efisiensi *solar cell*, dan  $\lambda$  merupakan arus beban yang digunakan untuk pengujian *discharge* pada kondisi operasi *steady state*.

5. Voltase konstan ( $E_0$ , satuan unit Volt)  
Voltase konstan merupakan nilai ketika *solar cell* mengalami proses *discharge* secara sempurna. Perhitungan  $E_0$  mengikuti persamaan,

$$V_{sc}(t) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{i \cdot t - \lambda \cdot Q} + A \cdot e^{-B \cdot i \cdot t} - R_0 \cdot i \quad (10)$$

dimana  $i$  merupakan arus masuk konstan yang dihasilkan dari hasil konversi cahaya matahari menjadi listrik. Persamaan

$$V_{sc}(t) = E_0 - K_{dr} \cdot \frac{Q}{Q - i \cdot t} \cdot (i^*) - K_{dv} \cdot \frac{Q}{Q - i^* \cdot t} \cdot (i \cdot t) - R_0 \cdot i(t) + A \cdot e^{-B \cdot i \cdot t} \quad (11)$$

$i^*$  yang mana mempresentasikan arus terseleksi yang melewati hambatan polarisasi.

## 2.5 ASUMSI-ASUMSI PADA PARAMETER MODEL

### 1. Hambatan dalam

Di dalam usulan model *solar cell*, hambatan dalam *solar cell* diasumsikan dua fungsi, yaitu suhu dan *SOC*. Dengan data manufaktur yang didapatkan dari pengujian *discharge solar cell*, hubungan regresi linier *multiple* direpresentasikan dengan  $R_0$ . Untuk mencegah *over-fitting* data, dipilih *fitting* regresi untuk order satu dengan persamaan,

$$R_0 = c_1 \cdot T + c_2 \cdot i \cdot t + c_3 \quad (12)$$

dimana  $c_1$ ,  $c_2$ , dan  $c_3$  bernilai konstan dari regresi linier *multiple*,  $T$  adalah suhu pengoperasian *solar cell*, dan  $i \cdot t$  adalah kapasitas *discharge solar cell* (Ah).

### 2. Range dari State of Charge

Berkaitan dengan efek degradasi *solar cell*, misalnya polarisasi, *solar cell*

$$E_0 = V_{full} + K_v + R \cdot i - A \quad (9)$$

Hasil dari persamaan voltase-arus untuk *discharge* pada kondisi *steady state* direpresentasikan ke dalam persamaan,

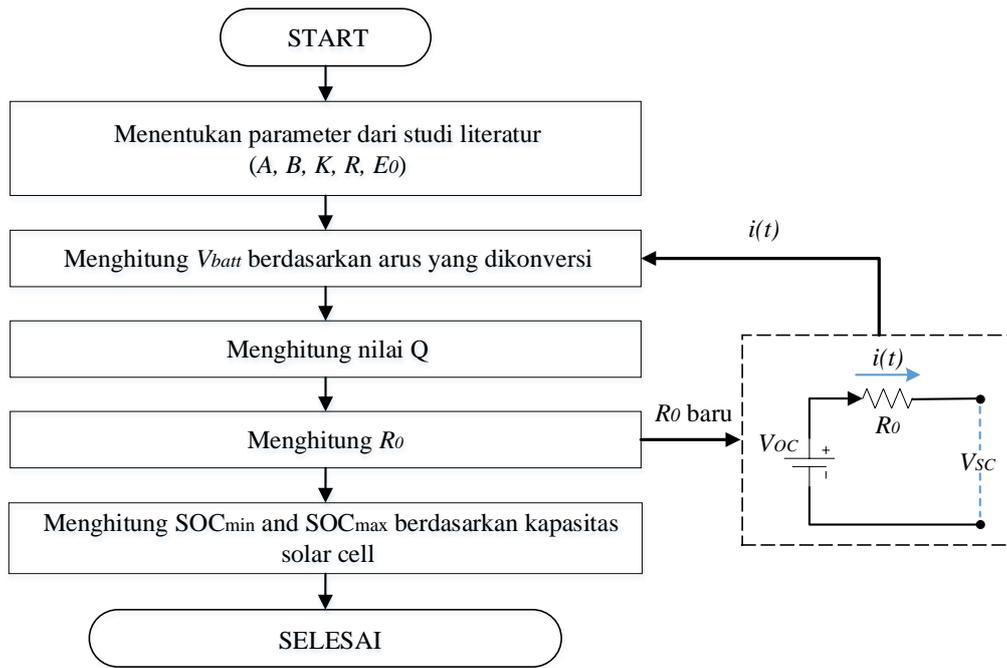
dinamik untuk voltase *discharge* pada pemodelan ini ditunjukkan pada persamaan,

dibatasi oleh kondisi operasi dengan zona linier dari kurva *discharge* nominal. Zona linier kurva *discharge* diestimasi diantara *SOC* minimal sampai *SOC* maksimal dari kapasitas maksimal setiap sel *solar cell*,

### 3. Range suhu

Pada penelitian ini, suhu merujuk kepada suhu lingkungan yang masih memungkinkan *solar cell* untuk beroperasi. *Range* yang digunakan pada penelitian ini berkisar antara  $-10^\circ\text{C}$  sampai  $50^\circ\text{C}$ . Pengoperasian di luar *range* pengujian dan desain manufaktur dapat dengan signifikan menurunkan performa *solar cell*.

Untuk menyederhanakan pertimbangan parameter-parameter pemodelan, Gambar 3 menunjukkan diagram alir (algoritmik) untuk menentukan pola perilaku dinamik *solar cell*. Pada setiap iterasi selama proses simulasi model *solar cell* dinamik, pengaruh hambatan internal dimasukkan dengan model regresi.



**Gambar 3.** Algoritma simulasi pemodelan *discharge solar cell*

Voltase *output solar cell* di-update pada setiap tahapan waktu menggunakan persamaan 10. Sedangkan *SOC* diestimasi dengan persamaan 13.

$$SOC(t) = SOC(t - 1) + \frac{P(t) \cdot \Delta t}{Q} \quad (13)$$

Pada persamaan 13,  $Q$  dinyatakan dalam satuan W.h.  $\Delta t$  mengindikasikan nilai jumlah dari waktu di antara  $t-1$  dan  $t$ . Pola perilaku *discharge solar cell* di-update sampai batas kapasitas yang dipersyaratkan yaitu  $Q \leq Q_{min}$ , dimana  $Q_{min}$  merupakan kapasitas minimal *solar cell* yang diijinkan.

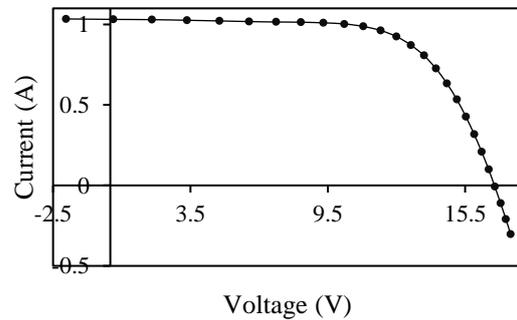
### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 3.1 DATA MANUFAKTUR *DISCHARGE SOLAR CELL*

Kurva *discharge* untuk *solar cell* disajikan dalam Gambar 4. Modul *solar cell* terdiri dari 36 *cells*. Perhitungan parameter pemodelan untuk voltase dan arus *discharge* berhubungan dengan data manufaktur yang didapat dari kurva *discharge solar cell*.

Parameter-parameter pada Gambar 4 dipilih berdasarkan kurva ideal pada Gambar 1.

Parameter-parameter *solar cell* disajikan pada Tabel 1.



**Gambar 4.** Kurva *discharge* untuk *solar cell*

**Tabel 1.** Parameter-parameter *discharge solar cell* berdasarkan data manufaktur

Parameters	Unit	Value
$Q_{full}$	mAh/gram	1034,32031
$V_{full}$	Volt	17,5177
$Q_{exp}$	mAh/gram	999,2730931
$V_{exp}$	Volt	11,46641134
$Q_{nom}$	mAh/gram	0,854810174
$V_{nom}$	Volt	0
$SOC_{min}$	%	9,67
$SOC_{max}$	%	95,05

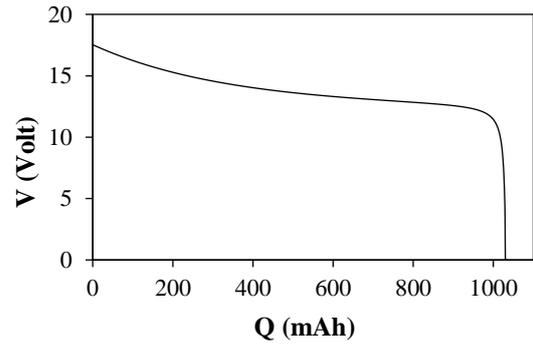
### 3.2 VALIDASI MODEL POLA PERILAKU STEADY STATE

Untuk memvalidasi ketepatan model *solar cell*, digunakan perbandingan dengan data manufaktur kurva *discharge solar cell*. Kurva perbandingan antara hasil simulasi dengan data manufaktur ditunjukkan pada Gambar 5. Parameter-parameter yang didapat dari hasil simulasi disajikan pada Tabel 2. Pada Gambar 5, dapat dilihat bahwa terjadi konvergensi antara data *discharge solar cell* manufaktur dengan data *discharge* hasil simulasi. Pada Tabel 2, dapat dilihat bahwa nilai  $K_{dr}$  dan  $K_{dv}$  sangat kecil. Hal ini mengindikasikan bahwa selisih antara parameter eksponensial dan nominalnya tidak terlalu signifikan. Pola yang sama juga dapat dilihat pada data *discharge solar cell* manufaktur.

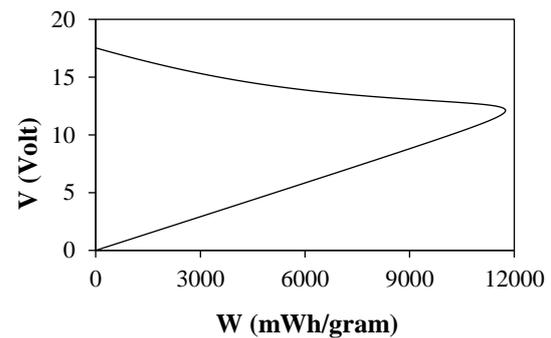
Penentuan nilai *SOC* minimal dan *SOC* maksimal merupakan hal yang penting. *SOC* mempresentasikan pada rentang energi berapa *solar cell* diijinkan untuk beroperasi. Terdapat selisih antara nilai *SOC* minimal dengan maksimalnya antara data *discharge solar cell* manufaktur dengan data *discharge* hasil simulasi. Data hasil simulasi cenderung memiliki rentang *SOC* yang lebih pendek daripada data manufaktur. Dengan kata lain, nilai *SOC* minimal dan *SOC* maksimal dari data simulasi dapat digunakan sebagai nilai batas *safety* untuk pengoperasian *solar cell*. Nilai batas *safety* ini penting untuk mengantisipasi performa *solar cell* menurun drastis sebelum benar-benar habis.

**Tabel 2.** Parameter-parameter *discharge solar cell* yang didapat dari data simulasi

Parameters	Unit	Value
$E_0$	Volt	12,53704928
$R_0$	m $\Omega$	0,012
$K_{dr}$	m $\Omega$	0,01
$K_{dv}$	Volt/mA.h	0,044148043
$A$	Volt	4,9956
$B$	(mA.h) <sup>-1</sup>	2,971366829
$SOC_{min}$	%	9,67
$SOC_{max}$	%	95,05



(a)

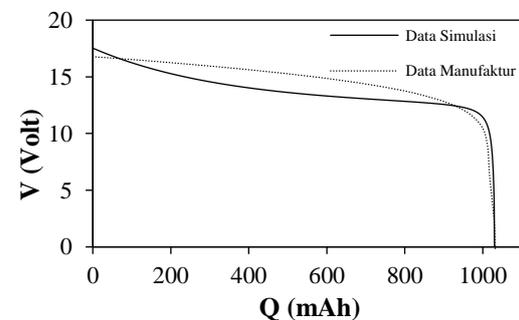


(b)

**Gambar 5.** Kurva *discharge steady state solar cell* hasil simulasi performa *solar cell* (a) Q vs V; (b) W vs V

### 3.3 PERHITUNGAN ERROR

Perhitungan *error* dilakukan dengan menentukan simpangan pada data manufaktur terhadap data simulasi yang dihasilkan. Gambar 6 merupakan grafik perbandingan antara data manufaktur dengan data hasil simulasi.



**Gambar 6.** Simpangan *error* data simulasi dengan data manufaktur

Dari Gambar 6, didapat simpangan voltase maksimum antara data simulasi dengan data manufaktur. Perhitungan *error* pada kurva *discharge steady state* dilakukan menggunakan rumus sebagai berikut,

$$\%error = \frac{data\ man.-data\ sim.}{data\ man.} \times 100\% \quad (14)$$

Dari perhitungan tersebut, didapatkan rata-rata *error* dari hasil simulasi sebesar 0,398%.

#### 4. KESIMPULAN

*Solar cell* sebagai energi alternatif terbarukan dapat mengurangi kenaikan konsumsi listrik konvensional. Melalui metode *Shepherd* diperoleh data *discharge solar cell* melalui data simulasi dengan *error* sebesar 0,398%.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi yang telah membiayain penelitian ini, sehingga hasil penelitian ini dapat dituangkan dalam bentuk tulisan dan diinformasikan kepada seluruh pembaca di Indonesia.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] Kementerian Energi Sumber Daya Mineral. Capaian 2017 dan Outlook 2018 Subsektor Ketenagalistrikan dan EBTKE.
- [2] B. Guo, J. Wu, J. Qun, Q. Han, The Lithium-ion Battery Standby Power of Wind Turbine Pitch System, *Energy Procedia*, vol. 105, hal. 3539–3544, 2017.
- [3] M. Durr, A. Cruden, S. Gair, J.R. McDonald, Dynamic Model of a Lead Acid Battery for Use in a Domestic Fuel Cell System, *J. Power Sources*, vol. 161, no. 2, hal. 1400–1411, 2006.
- [4] E. Kuhn, C. Forgez, P. Lagonotte, G. Friedrich, Modelling Ni-mH Battery Using Cauer and Foster Structures, *J. Power Sources*, vol. 158, no. 2, hal. 1490–1497, 2006.
- [5] P. Mauracher, E. Karden, Dynamic Modelling of Lead/acid Batteries Using Impedance Spectroscopy for Parameter Identification, *J. Power Sources*, vol. 67, no. 1-2, hal. 69–84, 1997.
- [6] C. M. Shepherd, Design of Primary and Secondary Cells - Part 2. An Equation Describing Battery Discharge, *J. Electrochemical Society*, vol. 112, hal. 657– 664, 1965.
- [7] C. Zhao, S. Dong, F. Li, Y. Song, Optimal Home Energy Management System with Mixed Types of Loads, *CSEE J. Power and Energy Systems*, vol. 1, no. 4, hal. 29–37, 2015.
- [8] O. Tremblay, L.A. Dessaint, Experimental Validation of a Battery Dynamic Model for EV Applications, *J. World Electric Vehicle*, vol. 3, hal. 289–298, 2009.
- [9] S. Li, B. Ke, Study of Battery Modeling using Mathematical and Circuit Oriented Approaches, *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, hal. 1–8, 2011.
- [10] R. Rao, S. Vrudhula, D.N. Rakhmatov, Battery Modeling for Energy-Aware System Design, *Computer*, vol. 36 no. 12, hal. 77–87, 2003.