

SIMULASI OPTIMASI PENGUKURAN *STATE OF CHARGE* BATERAI DENGAN *INTEGRAL OBSERVER*

THE SIMULATION FOR OPTIMIZATION OF MEASUREMENT OF BATTERY'S STATE OF CHARGE USING INTEGRAL OBSERVER

Asep Nugroho dan Estiko Rijanto

Pusat Tenaga Listrik dan Mekatronik LIPI
Jln. Cisitua Lama, Dago, Bandung
Pos-el: asepnugroho.lipi@gmail.com

ABSTRACT

The accuracy of state of charge (SoC) measurement has been an important key in the design of Battery Management System (BMS). A SoC measurement can prevent the battery from both overcharged and undercharged condition. One of the conventional methods for SoC estimation is coulomb counting (CC). This method has a drawback regarding to the accumulation of error propagation. To improve the accuracy of CC method, the integral observer could be added. In our work charge-discharge data simulation generated by PSIM was used to test the Integral observer performance. This research used general lithium-ion battery. It was found that this approach could significantly correct the error from the numerical integral calculation and discrete data input. The error of CC method at 4000 sec was found to reach 25%; however the error propagation could be decreased up to less than <3% by Integral observer.

Keywords: Battery, State of charge, Integral observer, State space, Transfer function

ABSTRAK

Akurasi pengukuran *state of charge* (SoC) mempunyai aspek yang penting dalam perancangan *battery management system* (BMS). Pengukuran SoC secara tepat dapat menghindarkan baterai dari kondisi overcharge dan undercharge. Salah satu metode konvensional untuk mengestimasi SoC adalah *coulomb counting* (CC). Metode ini mempunyai kekurangan dalam akumulasi propagasi galat. Untuk meningkatkan akurasi metode CC ditambahkan integral observer. Dalam penelitian data simulasi charge-discharge dihasilkan oleh PSIM, yang digunakan untuk menguji *integral observer*. Penelitian ini menggunakan baterai litium-ion secara umum. Hasil penelitian menyimpulkan bahwa metode ini secara signifikan dapat mengoreksi galat dari proses perhitungan integral numerik maupun galat dari *input* data diskret pada metode CC. Galat pada metode CC saat waktu (det) ke-4000 mencapai 25%. Akan tetapi dengan integral observer laju propagasi galat dapat diturunkan menjadi sekitar <3%.

Kata kunci: Baterai, *State of charge*, *Integral observer*, *State space*, *Transfer function*

PENDAHULUAN

Battery management system (BMS) merupakan perangkat elektronik yang tersusun atas sensor, aktuator, dan pengendali yang di dalamnya tertanam algoritma/sistem guna memonitor dan menyupervisi operasional baterai.¹ Salah satu

tugas penting *BMS* adalah mengukur *state of charge* secara akurat sehingga ketika dioperasikan baterai tidak mengalami kondisi yang membahayakan atau destruktif (dengan kata lain, baterai beroperasi pada kondisi *safe operating area*).² *State of charge* (SoC) adalah rasio kapasitas energi yang tersedia (*remaining energy capacity*) dengan

kapasitas energi maksimum (*maximum energy capacity*).³

Nilai *SoC* dinyatakan dalam rentang nilai 0~1, di mana nilai 0 menyatakan baterai dalam keadaan kosong tanpa ada kapasitas energi tersimpan sedangkan nilai 1 adalah keadaan baterai ketika kapasitas energi tersimpan secara penuh.³ *SoC* dapat juga dinyatakan juga dengan besaran persentase 0%~100%.

Tabel 1 merupakan sejarah perkembangan metode dalam mengestimasi *SoC*. Secara garis besar terdapat dua metode yaitu *white box system* dan *black box system*. Metode *open circuit voltage (OCV)*, *impedance spectroscopy*, *coulombmetric*, *book-keeping*, *kalman filter*, dan *integral observer* dikategorikan sebagai *white box system* karena membutuhkan model matematis dari sel baterai, sedangkan *artificial neural network*, *fuzzy logic*, dan *learning algorithm* digolongkan sebagai *black box system* karena tidak membutuhkan model matematis baterai.⁴

Salah satu metode estimasi *SoC* yang cukup mudah diimplementasikan dan paling banyak digunakan adalah metode *coloumb counting (CC)*. Prinsip dasar metode *CC* adalah melakukan pejumlahan secara akumulatif (proses integrasi) terhadap arus listrik yang masuk ataupun keluar dari baterai.⁵ Berdasarkan penelitian Rijanto,⁶ hambatan dalam baterai akan mengalami per-ubahan seiring dengan perubahan nilai *SoC*. Hal ini dapat menimbulkan derau pada

sensor arus saat dilakukan pencuplikan data arus pengisian/pelucutan pada baterai.

Kelemahan dari *CC* adalah terjadi akumulasi galat pembacaan *SoC* akibat kesalahan saat penentuan *SoC* awal, proses integrasi numerik, dan kesalahan pembacaan sensor arus akibat derau. Akumulasi galat ini menyebabkan *BMS* keliru dalam mendekteksi kondisi *undercharge* atau *overcharge* sehingga berpotensi merusak baterai. Penelitian ini bertujuan memodifikasi metode *CC* dengan menambahkan integral observer untuk meminimalisasi akumulasi galat pada *CC*.

Ada beberapa penelitian terkait *integral observer* ini, di antaranya yang dilakukan oleh Codeca^{7,8} dan Xu⁹. Metode ini dipilih lantaran cukup mudah untuk disimulasikan dibanding dengan metode *kalman filter*. Ada perbedaan metode dalam merepresentasikan *integral observer* antara Codeca^{7,8} dan Xu⁹. Dalam penelitian yang dilakukan oleh Codeca^{7,8} model baterai direpresentasikan dengan blok fungsi alih (*transfer function*) $\left(\frac{\text{num}(s)}{\text{den}(s)}\right)$, sedangkan Xu⁸

menggunakan model *state space*.

Adapun perbedaan penelitian ini dengan Codeca^{7,8} adalah data simulasi yang digunakan untuk uji coba disesuaikan dengan *datasheet* parameter baterai yang digunakan pada mobil listrik rancangan P2-Telimek LIPI. Selain itu, Codeca^{7,8} menggunakan pembobotan terjadwal (*gain scheduling*) guna menentukan konstanta bobot *integral*

Tabel 1. Sejarah Pengembangan Metode Estimasi *SoC*³

Tahun	Peneliti/Perusahaan	Metode
1938	Heyer	<i>Voltage measurements</i>
1963	Curtis	<i>Voltage measurements and threshold in voltage levels</i>
1970	Lerner	<i>Comparison between two batteries (one with a known SoC)</i>
1974	Brandwein	<i>Voltage, temperature and current measurements</i>
1975	Christianson	<i>OCV</i>
1975	Dowgiallo	<i>Impedance measurements</i>
1975	Finger	<i>Coulomb counting</i>
1978	Eby	<i>OCV and voltage under load</i>
1980	Kikuoka	<i>Book-keeping</i>
1981	Finger	<i>Voltage relaxation</i>
1984	Peled	<i>Look-up tables based on OCV and T measurements</i>
1988	Seyfang	<i>Book-keeping and adaptive system</i>
1992	Aylor	<i>OCV, OCV prediction and coulometric measurements</i>
1997	Gerard	<i>Voltage and current measurements, artificial neural networks</i>
1999	Salkind	<i>Coulomb counting, impedance spectroscopy, fuzzy logic</i>
2000	Garche	<i>Voltage and current measurements, Kalman filters</i>
2000	Bergveld	<i>Book-keeping, overpotential, EMF, maximum capacity learning algorithm</i>

observer, sementara penelitian ini menggunakan bobot yang bersifat statik. Penelitian ini masih dalam tahap pengembangan sehingga dipilih bobot yang statik untuk mempermudah analisis karakter *observer* dan pengaruhnya terhadap kestabilan sistem. Jika menggunakan pembobotan terjadwal akan sulit dilakukan analisis karena terlalu banyak parameter yang harus diamati.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan data *constant load discharge* untuk uji coba algoritma. Data yang digunakan berasal dari simulasi perangkat lunak PSIM 9.3. Data tersebut diambil dalam format *tab separated text file*. Data tersebut memuat informasi berupa waktu, *state of charge*, tegangan terminal, dan arus pengisian dan pelucutan. Data simulasi ini digunakan untuk menguji unjuk kerja metode *CC* dan metode *CC* yang dioptimasi dengan *integral observer*. Analisis kinerja didasarkan pada persentase galat antara *SoC* hasil perhitungan dan *SoC* dari data simulasi.

Rekaman data pola pengisian-pelucutan baterai diperoleh dari simulasi dengan perangkat lunak *PSIM* dengan parameter sebagai berikut.

<i>Total of Cell in Series</i>	: 25 (105V)
<i>Total of Cell in Parallel</i>	: 40
<i>(222.4AH)Maximum Voltage cell</i>	: 4.2V
<i>Rated Voltage per cell</i>	: 3.7V
<i>Maximum Capacity cell</i>	: 5.56AH
<i>Rated Capacity cell</i>	: 40AH
<i>Voltage Derating Factor</i>	: 1
<i>Capacity Derating Factor</i>	: 1
<i>Exponential Point Voltage</i>	: 3.9V
<i>Exponential Point Capacity</i>	: 1.08AH
<i>Discharge Cut-off Voltage</i>	: 2.5V
<i>Internal Resistance</i>	: 0.05
<i>Polarization Resistance (Rp)</i>	: 0.009808
<i>Polarization Capacitance (Cp)</i>	: 1906 F

Coloumb Counting

Metode *CC* adalah metode menghitung muatan listrik (*Coloumb*) yang masuk atau keluar melalui baterai. Arus listrik dihasilkan dari sejumlah muatan listrik yang bergerak persatuan waktu

(detik). Dengan mengintegalkan arus listrik yang mengalir ke baterai terhadap waktu maka didapatkan muatan listrik total yang masuk atau keluar dari baterai. Dalam implementasinya nilai arus (*I*) berupa diskret karena tidak memungkinkan melakukan pencuplikan dengan waktu $\lim_{t \rightarrow 0}$.

Secara umum metode *CC* dirumuskan sebagai berikut:

$$I = \frac{dQ}{dt} \rightarrow Q = \int_{t_0}^t I dt \quad (1)$$

$$SoC(t) = SoC(t_0) - \frac{\eta}{C_n} \int_{t_0}^t I dt \quad (2)$$

di mana:

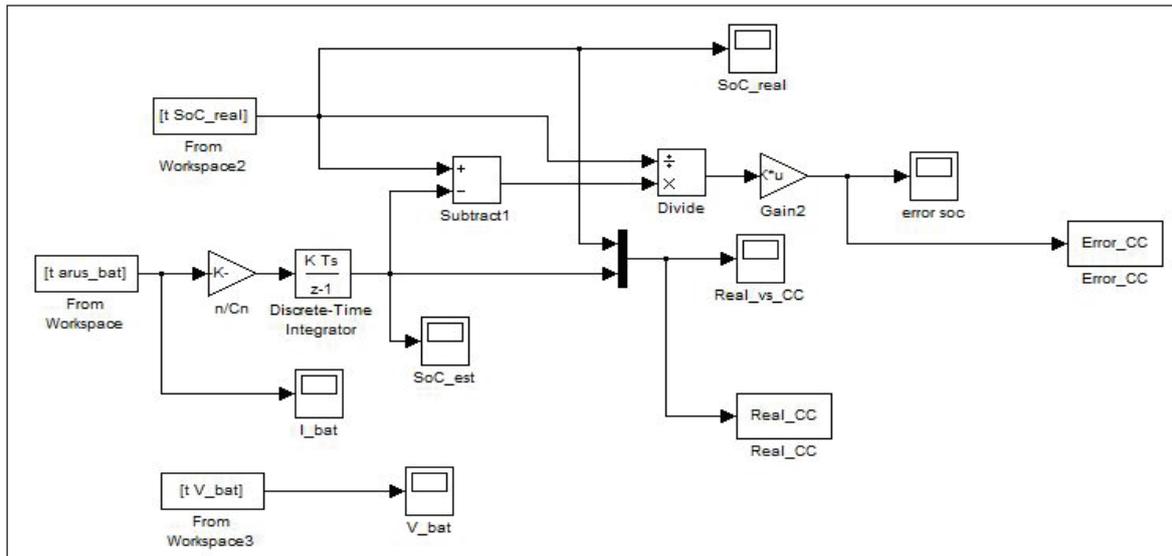
Q	muatan listrik
$SoC(t_0)$	SoC awal sebelum terjadi proses pengisian/pelucutan.
η	efisiensi pengisian/pelucutan baterai.
C_n	kapasitas maksimum baterai
<i>I</i>	besar arus listrik yang masuk atau keluar dari baterai

Gambar 1 adalah implementasi metode *CC* yang dibuat menggunakan *simulink*. Dibutuhkan *discrete integrator block* guna melakukan proses integrasi pengisian/pelucutan arus baterai dan sebuah konstanta gain $\frac{\eta}{C_n}$. Dalam penelitian ini

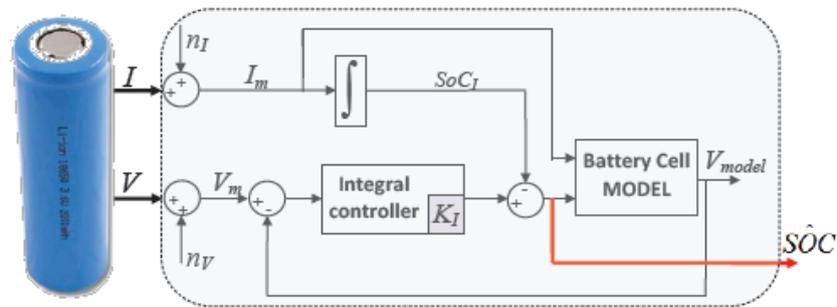
ditetapkan bahwa efisiensi pengisian/pelucutan baterai adalah 0,99 karena baterai dianggap dalam kondisi masih baru dan tidak ada *losses* pada terminal kutub baterai.

Coloumb Counting + I-Observer

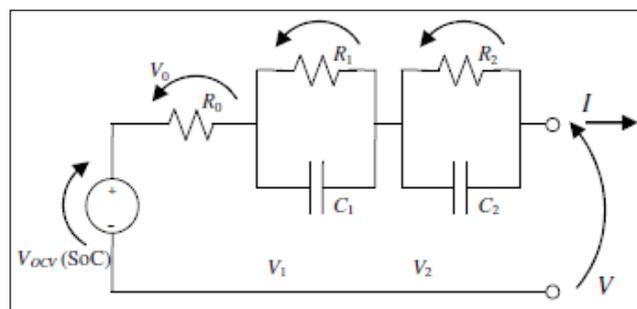
Ide dasar *integral observer* adalah mengadopsi teori kendali di mana *integral controller* mempunyai peran mengompensasi *steady state error* pada sebuah sistem. Kemampuan ini yang kemudian dimanfaatkan untuk mengoreksi pengukuran *SoC* dengan metode *CC*. Koreksi dilakukan dengan cara melakukan evaluasi berdasarkan persamaan model sel baterai seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.



Gambar 1. Blok Diagram Simulink Metode Coloumb Counting



Gambar 2. Blok Diagram Metode Coloumb Counting + Integral Observer⁸



Gambar 3. Model Sirkuit Ekuivalen Sel Baterai¹⁰

Metode CC hanya membutuhkan satu data yaitu data pembacaan arus pengisian/pelucutan untuk menghitung SoC. Adapun metode CC + integral observer membutuhkan dua buah data yaitu data pembacaan arus dan data pembacaan tegangan terminal baterai untuk mengevaluasi hasil perhitungan metode CC.

Model sirkuit ekuivalen sel baterai yang terbaik menurut penelitian Hongwen¹⁰ adalah *dual polarization RC* yang diilustrasikan pada Gambar 3. Berdasarkan Codeca,⁷ dimodelkan tegangan terminal (V) baterai yang dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut.

$$V = V_{OCV}(SoC) - \left(R_0 + \frac{R_1}{1+sR_1C_1} + \frac{R_2}{1+sR_2C_2} \right) * I \quad (3)$$

Persamaan (3) dapat disederhanakan menjadi:

$$V = V_{OCV}(SoC) - (R_0 * I) + \left(\frac{K * (1+sK_1)}{(1+sK_2) * (1+sK_3)} \right) * I \quad (4)$$

Pada penelitian yang dilakukan oleh Codeca⁶ terhadap baterai jenis litium didapatkan hasil estimasi parameter sebagai berikut.

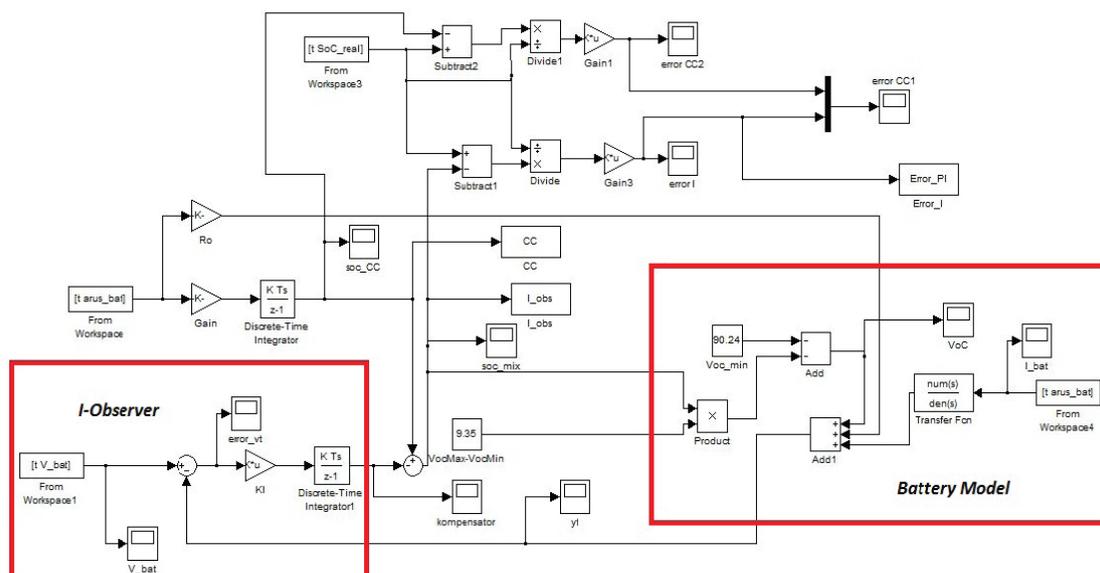
- K = - 0.047288
- K₁ = 597.56
- K₂ = 32.668
- K₃ = 1996.7

Dengan demikian, blok fungsi alih *simulink* $\left(\frac{\text{num}(s)}{\text{den}(s)} \right)$ berisi parameter Num(s)= [(597,56*-0,047) -0,047] dan Den(s)= [(32,67*1996,7) (32,67+1996,7) 1]. Codeca⁷ tidak menjelaskan bagaimana menghitung V_{OCV}(SoC). Salah satu cara menentukan V_{OCV}(SoC) adalah mengasumsikan bahwa fungsi relasi V_{OCV} terhadap SoC bersifat linier (meskipun pada kenyataannya tidak linier) sehingga dapat dirumuskan⁵ sebagai berikut.

$$V_{OCV}(SoC) = (SoC \times (V_{max} - V_{min})) + V_{min} \quad (5)$$

Sementara itu, untuk menentukan R₀ (hambatan dalam baterai) digunakan metode regresi linier seperti yang dilakukan oleh Nugroho.¹¹

Gambar 4 adalah blok diagram *simulink* dari metode *Coloumb counting + integral observer*. Awalnya SoC diestimasi menggunakan metode CC yang menghasilkan tebakan awal SoC (SoC hasil estimasi dengan metode CC). Kemudian SoC diumpan balik untuk menghitung persamaan (3). Hasil perhitungan persamaan (3) adalah nilai tebakan tegangan terminal (\hat{V}). Nilai \hat{V} kemudian dibandingkan dengan hasil pembacaan tegangan terminal baterai sebenarnya. Jika terdapat galat antara \hat{V} dan V_{baterai} galat tersebut digunakan sebagai masukan untuk *integral observer*. Keluaran dari *integral observer* akan digunakan untuk mengoreksi perhitungan SoC selanjutnya.



Gambar 4. Blok Diagram Simulink Metode Coloumb Counting + Integral Observer

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada penelitian ini hasil estimasi *SoC* dengan metode *CC* dan metode *CC + integral observer* direkam kemudian dibandingkan dengan hasil data simulasi sebagaimana yang tertera pada Tabel 2.

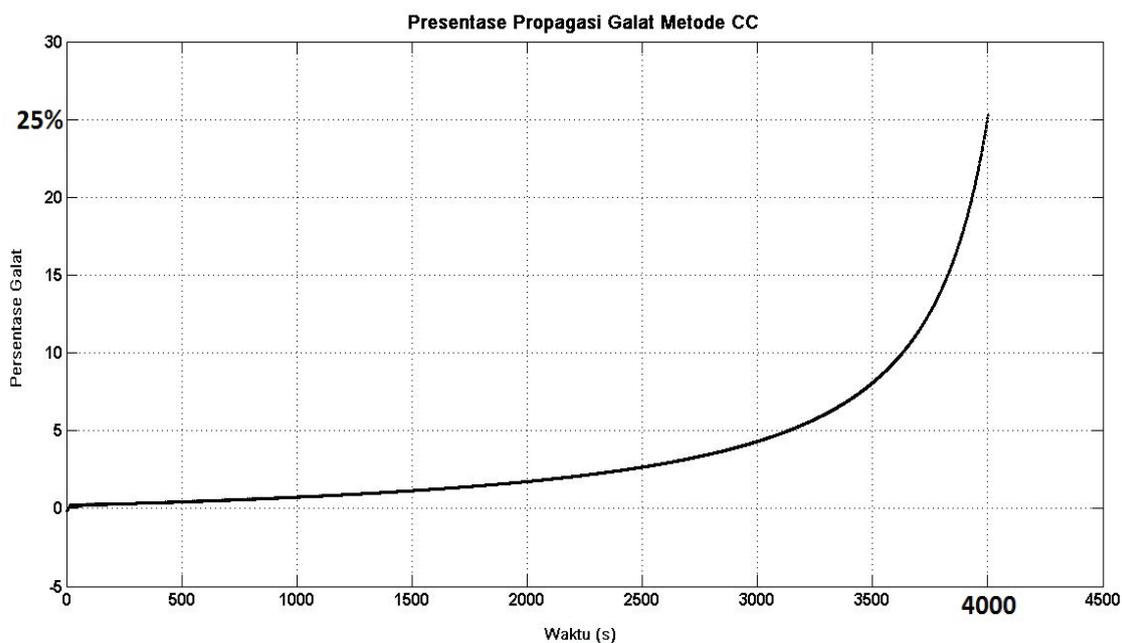
Pada Tabel 2 dapat dilihat bahwa pada saat waktu (detik) ke-12 tidak terjadi perbedaan cukup signifikan antara pengukuran dengan metode *CC* dan metode *CC + integral observer*. Akan tetapi pada waktu ke-3924 terjadi perbedaan pengukuran yang cukup signifikan. Persentase galat pada metode *CC* naik secara drastis. Adapun persentase pada metode *CC + integral observer* mengalami kenaikan juga namun masih biasa ditekan di bawah 3%.

Gambar 5 memperlihatkan bahwa akan terjadi propagasi galat yang kecenderungannya akan semakin membesar seiring dengan waktu. Ada tiga kondisi utama yang berperan sebagai penyumbang galat terbesar pada *CC*, antara lain:

1. Kesalahan saat memperhitungkan *SoC* awal, atau $SoC(t_0)$. Kesalahan ini paling banyak terjadi dan peluang galatnya akan semakin meningkat seiring dengan umur baterai. Metode paling umum untuk menentukan $SoC(t_0)$ adalah dengan menggunakan *look-up table* yang berisi data fungsi $V_{ocv}(SoC)$ sehingga ketika terjadi penyimpangan struktur elektrokimia *look-up table* akan terjadi kesalahan estimasi. Salah satu teknik yang digunakan untuk meminimalkan kesalahan

Tabel 2. Perbandingan Data Pembaca *SoC*

Detik ke-	Error CC (%)	Error CC	CC	SoC Real	I_obs	Error I_obs	Error I_obs (%)
12	-0,15%	-0,0015	0,975	0,9735	0,975	-0,0015	-0,15%
16	-0,06%	-0,00058	0,974	0,9734	0,9739	-0,0005	-0,054%
.....
.....
3920	18,51%	0,01477	0,065	0,0797	0,0788	0,00095	1,20%
3924	18,74%	0,01479	0,0641	0,0789	0,0779	0,000955	1,21%



Gambar 5. Propagasi Galat Hasil Estimasi Menggunakan Metode *CC*

ini adalah dengan melakukan kalibrasi secara reguler. Periode kalibrasi *look-up table* berdasarkan jumlah *cycle* baterai; pada umumnya setiap kelipatan 100-200 *cycle*.

2. Kesalahan dalam pembacaan nilai arus pengisian/pelucutan baterai. Dalam implementasinya hal ini tidak dapat dihindari karena setiap sensor arus mempunyai keakuratan yang terbatas. Kesalahan pembacaan ini juga disebabkan oleh derau dari sistem terutama sistem yang mengandung unsur *RLC* (resistor, induktor, dan kapasitor). Kesalahan pembacaan ini dapat diminimalkan dengan menambahkan rangkaian tapis secara perangkat keras atau dengan menggunakan algoritma tapis adaptif (perangkat lunak).
3. Kesalahan pada saat proses perhitungan integrasi dikarenakan proses perhitungan komputasi numerik maupun akibat masukan data yang tidak kontinu (data diskret). Idealnya waktu pencuplikan yang digunakan harus mendekati $\lim_{t \rightarrow 0}$ sehingga jumlah data yang berhasil dicuplik mendekati tak hingga (∞). Akan tetapi, pada implementasinya mendapatkan cuplikan data sekecil mungkin mendekati $\lim_{t \rightarrow 0}$ tidak dapat diwujudkan karena keterbatasan teknologi konverter analog-digital dan teknologi komputasi.

Pada simulasi ini kesalahan perhitungan *SoC* awal atau $SoC(t_0)$ dianggap nol. Begitu juga sensor arus dianggap ideal—tidak mengandung derau—sehingga kontribusi galat akibat kesalahan pembacaan nilai arus saat pengisian/pelucutan

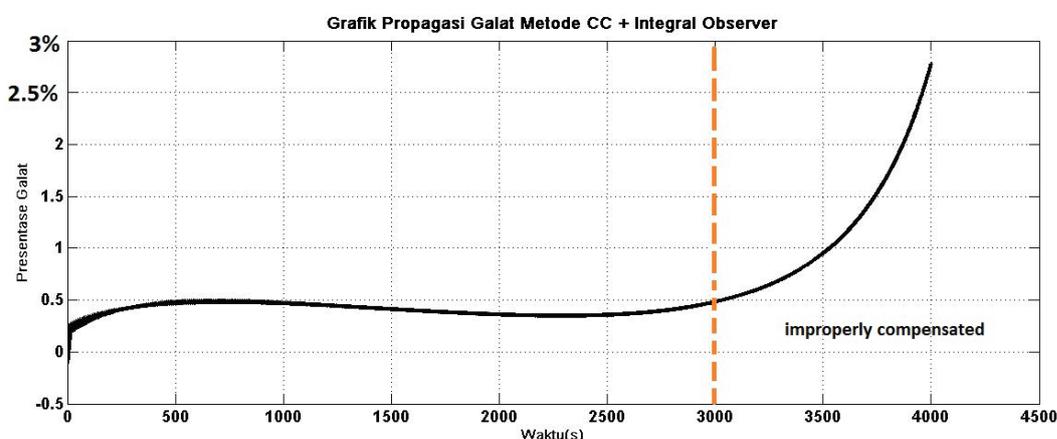
baterai dianggap tidak ada atau nol. Satu-satunya faktor galat adalah dari proses perhitungan komputasi dan akibat pencuplikan data diskret.

Pada Gambar 6 terlihat bahwa terjadi penurunan galat yang cukup signifikan jika metode *CC* dioptimasi dengan *integral observer*. Teori ilmu kontrol Ogata¹² menyatakan bahwa jika dalam suatu sistem masih terdapat *steady state error* antara keluaran (perhitungan *SoC* dan \hat{v}) dan referensinya (V_{baterai}), penambahan *integral observer* dapat mengurangi *steady state error* tersebut.

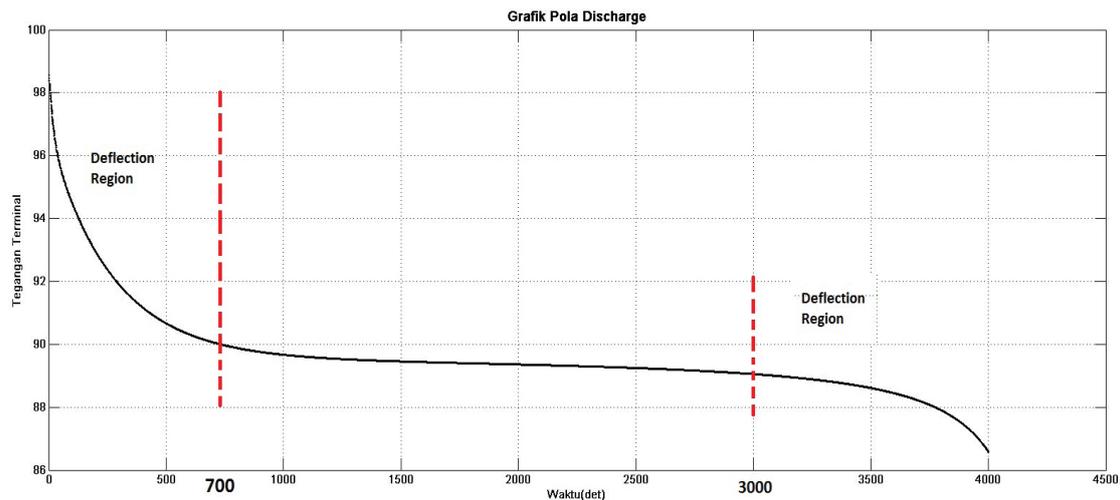
Jika diamati lebih teliti, pada Gambar 6 ada daerah yang tidak bisa dikompensasi dengan baik. Hal ini dinyatakan dengan kenaikan galat secara eksponensial pada detik ke-3000 ke atas. Jika dihubungkan dengan grafik pola pengosongan baterai yang tercantum pada Gambar 7 ketidaktepatan kompensasi terjadi saat tegangan terminal mengalami penurunan dengan titik belok yang tajam (penurunan tegangan yang tidak linier).

Ada beberapa faktor yang memengaruhi performa *integral observer*.

1. Ketepatan dalam menentukan model sel baterai. Semakin mendekati keadaan aslinya semakin bagus, karena model tersebut akan digunakan sebagai umpan balik. Dalam hal ini ketepatan penentuan model matematis baterai berpengaruh pada penentuan orde fungsi alih $\frac{\text{num}(s)}{\text{den}(s)}$ dan nilai parameter *K*. Dalam penelitian ini orde yang digunakan adalah fungsi alih orde 2. Kesalahan penentuan parameter fungsi alih dapat berakibat sistem tidak



Gambar 6. Propagasi Galat Hasil Estimasi Menggunakan Metode *CC* + *Integral Observer*



Gambar 7. ?????

stabil dan bersifat *divergen* sehingga hasil pembacaan SoC dapat lebih buruk dibandingkan ketika menggunakan metode CC yang konvensional.

2. Ketepatan dalam penentuan konstanta bobot *integrator*. Kesalahan dalam penentuan konstanta ini juga akan berpengaruh pada kestabilan sistem. Dalam penelitian ini penentuan konstanta *gain integrator* dilakukan dengan metode penalaan secara *trial and error*. Salah satu metode yang cukup baik dalam penentuan konstanta bobot *integrator* adalah algoritma pembobotan terjadwal atau *fuzzy logic*. Metode ini menyesuaikan besarnya bobot berdasarkan karakteristik data masukan.
3. Ketepatan menentukan kondisi awal. Dalam penelitian ini ternyata metode *integral observer* belum cukup baik mengompensasi galat akibat kesalahan penentuan *SoC* awal, atau $SoC(t_0)$. Metode *integral observer* hanya mampu mengoreksi galat dari proses perhitungan komputasi dan input data diskret.

KESIMPULAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan *integral observer* dapat secara signifikan mengoreksi galat dari proses perhitungan komputasi dan input data diskret metode CC. Pada CC galat pada waktu (detik) ke-4000 mencapai 25%. Galat

tersebut dapat dikoreksi oleh *integral observer* menjadi sekitar <3%. Akan tetapi metode *integral observer* ini belum cukup baik mengompensasi galat pada daerah *deflection* (tegangan terminal yang mengalami penurunan dengan titik belok yang tajam). Kompensasi galat saat penentuan *SoC* awal belum mampu diatasi oleh *integral observer*. Metode ini cukup layak untuk ditanamkan pada BMS, tentunya dengan beberapa perbaikan agar lebih *robust* terhadap data yang lebih dinamis dan berderau tinggi.

Perbaikan yang perlu ditambahkan sebelum algoritma ini ditanamkan pada BMS antara lain:

- algoritma ini perlu dikombinasikan dengan *fuzzy logic* atau pembobotan terjadwal (*gain scheduling*) agar lebih adaptif;
- diperlukan tambahan algoritma untuk melakukan pembatasan daerah operasional baterai agar selalu dalam zona *safe operating area*.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Dr. Sunit Hendrana atas bimbingan dan sarannya dalam penulisan KTI ini. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada kepala Puslit Telimek dan juga rekan-rekan peneliti dari laboratorium sarana transportasi.

DAFTAR PUSTAKA

- ¹Lu, L. 2013. A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles. *Journal of Power Sources* 226 (2013): Elsevier.
- ²Xing, Y. 2011. Battery management systems in electric and hybrid vehicles. *Journal Energies*, Vol. 4, 2011.
- ³Pop, V. and H. J. Bergveld. 2008. *Battery Management Systems: An Accurate State-of-Charge Indication for Battery-Powered Applications*. Eindhoven: Springer.
- ⁴Christopher, D. 2013. *Battery Systems Engineering*. Wiley: Pennsylvania State University .
- ⁵Vairamohan, B. 2002 State of Charge Estimation for Batteries. *Master Thesis*. Knoxville: University of Tennessee.
- ⁶Rijanto, E., dan K. Ismail. 2006. Pemodelan dan identifikasi baterai *lead acid* untuk mobil robot. *Prosiding Seminar Nasional Tenaga Listrik dan Mekatronik*, Bandung.
- ⁷Codeca, F. 2008. *On battery state of sharge estimation: a new mixed algorithm*. San Antonio: IEEE International Conference on Control Applications.
- ⁸Codeca, F. 2009. *The mix estimation algorithm for battery state-of-charge: analysis of the sensitivity to measurement errors*. Shanghai: IEEE Conference on Decision and Control.
- ⁹Xu, J. 2014. The state of charge estimation of lithium-ion batteries based on a proportional integral observer. *Journal of IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 63, No. 4.
- ¹⁰He, H. 2011. Evaluation of lithium-ion battery equivalent circuit models for state of charge estimation by an experimental approach. *Journal Energies*, Vol. 4, 2011.
- ¹¹Nugroho, A. 2013. Estimasi OCV berbasis pendekatan regresi linier. *Prosiding Seminar Ilmu Pengetahuan Teknik*, Yogyakarta.
- ¹²Ogata, K. 2010. *Modern Control Engineering*. Fifth Edition. New Jersey: Prentice Hall.

