

## PERAMALAN KAPASITAS BATERAI PADA KENDARAAN LISTRIK DENGAN METODA COULOMETRI

<sup>1</sup>Bambang Sri Kaloko

<sup>1</sup>Jurusan Teknik Elektro, Universitas Jember

Masuk: 16 April 2009 2009, revisi masuk : 21 Juli 2009, diterima: 25 Juli 2009

### ABSTRACT

*This article proposes a new coulometric approach to calculate the state of charge of a lead acid battery in electric vehicles. The main existing state of charge algorithms have two major defects: a state of charge definition not adapted to electric vehicle applications and the nonoptimal use of static performance of the accumulator to estimate its state under dynamic stresses. In order to improve these two weaknesses, we propose a new coulometric algorithm linked to the performance of the electric vehicle and where the ampere hours virtually discharged are obtained by applying statistical equivalence coefficients to the real current profile. The evaluation of this new algorithm on real discharges reveals a significant improvement with less than 5% errors in all cases studied.*

**Keywords:** *state of charge, coulometry, electric vehicle*

### INTISARI

Artikel ini memperkenalkan suatu pendekatan coulometri untuk menghitung kapasitas muatan suatu baterai asam (Pb), digunakan kendaraan listrik. Algoritma yang sudah ada dalam penentuan kapasitas muatan suatu baterai memiliki dua kekurangan, yaitu pertama tidak adaptif untuk digunakan pada kendaraan listrik dan kedua tidak optimal bila digunakan dengan beban yang dinamis. Untuk memperbaiki dua kekurangan tersebut maka metode coulometri digunakan untuk menentukan kapasitas baterai/Ah dengan menerapkan persamaan statistik. Evaluasi terhadap algoritma baru ini memberikan perbaikan dengan tingkat ke-salahan tidak kurang dari 5%.

**Kata kunci:** kapasitas muatan, coulometri, kendaraan listrik

### PENDAHULUAN

Kendaraan listrik membutuhkan suatu energi listrik yang memiliki dimensi tidak besar, dapat dipindah tempat, dapat diisi ulang dan dapat didaur ulang. Berbagai jenis sumber energi listrik ini dikembangkan untuk menjalankan kendaraan listrik, tetapi namun baterai masih sangat populer untuk kendaraan jenis ini. Baterai yang digunakan untuk kendaraan listrik harus memiliki daya tinggi, energi besar, kapasitas muatan ini besar, memiliki masa pakai yang panjang, memiliki masa kerja yang panjang dan dapat didaurulang serta harga yang tidak terlalu tinggi. Sampai saat ini baterai yang digunakan untuk kendaraan listrik memiliki usia kerja yang pendek dan harganya masih tinggi (Husein, 2003). Baterai yang

digunakan untuk kendaraan listrik harus memiliki karakteristik listrik dan karakteristik kerja. Karakteristik listrik meliputi kapasitas baterai, arus baterai/laju discharge, pengisian state of charge, pemakaian baterai ini, efisiensi, daya dan energi suatu baterai (Dhameja, 2002).

Penelitian tentang kendaraan listrik diperlukan seiring dengan tingginya harga minyak dunia, isu pemanasan global dan pencemaran udara. Disamping itu diperlukan juga pengaturan energi untuk menjalankan kendaraan listrik. Model matematis baterai asam Pb telah dibangun untuk menentukan rugi internal baterai, kapasitas baterai/Ah dan tegangan. Model menggunakan komponen nonlinier dengan menggunakan bahasa pemrograman BASIC. Model ini cukup akurat me-

<sup>1</sup>b\_srikaloko@yahoo.com

menentukan performa baterai untuk kondisi temperatur yang bervariasi, arus pengisian/*charge* dan arus pemakaian bervariasi (Salameh, et al, 1992). Kelemahan dari model ini adalah suatu konsentrasi elektrolit dianggap konstan sehingga belum bisa menggambarkan baterai secara utuh.

Metode *Coulometry* merupakan suatu cara untuk menentukan jumlah muatan yang ada pada baterai. Metode ini dapat digunakan untuk menentukan pengisian baterai ini yang digunakan pada mobil listrik (Caumont, et al, 2000; Bagotsky, 2006). Metode coulometry memungkinkan untuk menentukan kapasitas baterai/Ah berdasarkan konsentrasi elektrolit yang ada pada baterai. Metode ini memiliki kelebihan yaitu dapat menentukan pengisian baterai pada mobil listrik dan juga dapat mengestimasi kapasitas muatan baterai bila diberi beban dinamis. Algoritma ini memiliki kesalahan tidak kurang dari 5% terhadap nilai aktual.

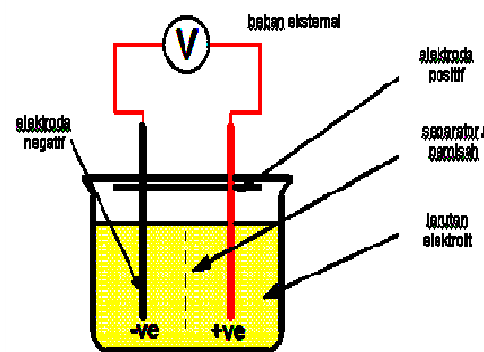
Nilai energi, efisiensi dan pengisian baterai sangat penting untuk kendaraan listrik. Suatu pendekatan model reaksi elektrokimia digunakan untuk menentukan besarnya pengisian baterai pada kendaraan listrik. Metode ini mengukur pengisian baterai berdasarkan reaksi elektrode, rugi-rugi internal dan konsentrasi elektrolit dalam baterai (Ying, et al, 2008). Pemodelan matematis ini baterai berdasarkan proses fisika kimia pada elektrode dan elektrolit telah dibangun (Ledovskikh, et al, 2003). Model mensimulasikan besarnya tegangan, tekanan gas dan temperatur baterai selama bekerja. Model didasarkan pada pengaruh termodinamika, kinetika dan proses difusi dalam baterai.

Baterai terdiri dari satu atau lebih sel elektrokimia. Sel elektrokimia ini suatu bentuk baterai dengan terhubung secara seri atau paralel sesuai dengan kebutuhan. Satu sel baterai berisi empat komponen dasar ditunjukkan pada Gambar 1 yaitu:

- Elektrode positif yang menerima elektron dari rangkaian eksternal ketika sel baterai melepas energi listrik,
- Elektrode negatif yang memberikan elektron ke rangkaian eksternal ketika sel baterai melepas energi listrik.

- Elektrolit, yaitu larutan kimia yang berfungsi untuk menghantarkan ion antara elektrode positif dan negatif,
- Separator/pemisah berfungsi untuk mengisolasi secara elektrik elektrode positif dan negatif.

Dalam beberapa desain baterai jarak fisik antar elektrode memberikan isolasi elektrik, sehingga tidak diperlukan pemisah. Ketika sel baterai disisipkan dalam rangkaian yang lengkap maka muatan elektron mengalir di sekitar rangkaian. Muatan elektron yang mengalir dalam rangkaian eksternal ini menimbulkan arus listrik. Sedang dalam sel muatan mengalir dalam bentuk ion dari satu elektrode ke elektrode lainnya. Elektrode positif menerima elektron dari rangkaian eksternal ini saat melepas energi listrik. Elektron-elektron ini selanjutnya bereaksi dengan bahan aktif elektrode positif disebut sebagai reaksi reduksi. Reaksi dilanjutkan aliran muatan menuju elektrode negatif melalui larutan elektrolit. Pada elektrode negatif terjadi reaksi oksidasi antara bahan aktif elektrode negatif dengan muatan yang mengalir melalui larutan elektrolit, mengakibatkan terjadinya kelebihan elektron yang selanjutnya akan diberikan ke rangkaian eksternal.



Gambar 1. Sel tunggal baterai elektrokimia.

Perlu untuk diingat bahwa dalam sistem tertutup masing-masing elektron yang dihasilkan dalam reaksi oksidasi di elektrode negatif ini akan diikuti dengan konsumsi elektron disisi elektrode positif melalui reaksi reduksi. Proses akan berlanjut pada bahan aktif sampai reaksi menjadi lambat, sehingga baterai tidak mampu lagi menyediakan elektron.

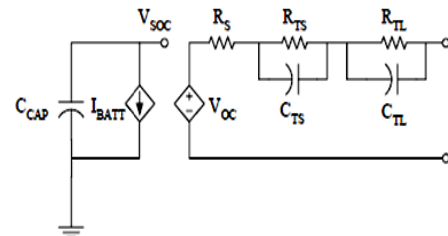
Baterai asam Pb banyak digunakan sebagai media penyimpanan energi elektrokimia. Banyak penelitian tentang baterai jenis ini, namun pokok permasalahan yang ada pada baterai ini masih belum terjawab. Hal ini yang menjadi permasalahan dalam pabrikasi baterai jenis ini karena sulitnya memahami kondisi spesifik yang ada. Baterai jenis ini telah digunakan sejak lama, namun permasalahan mendasar yang menjadi landasan dalam menentukan performa baterai belum terpecahkan. Performa baterai akan diketahui dengan baik jika dioperasikan dalam kondisi statis (arus dan temperature konstan), padahal penggunaan baterai untuk kendaraan listrik membutuhkan kondisi yang bervariasi (Caumont, et al, 2000).

Mobil listrik umumnya menggunakan baterai sebagai sumber energi utamanya (Larminie, 2003). Namun baterai pada mobil listrik memiliki kelemahan yaitu kapasitas muatan (Ah) yang terbatas sehingga perlu dilakukan pengisian kembali. Baterai juga mempunyai masa pakai yang terbatas ketika dilakukan pengisian yang berulang-ulang atau jika diberi beban dinamis yang bervariasi. Perlu dilakukan pengaturan pembebanan agar baterai tidak bekerja keras.

Untuk menerapkan baterai pada kendaraan listrik, perlu diketahui bagaimana karakteristik baterai yang akan dipakai. Ada dua karakteristik utama baterai yaitu karakteristik listrik dan karakteristik kerja. Karakteristik listrik baterai meliputi tegangan sumber baterai, kapasitas baterai (Ah), besarnya daya dan energi suatu baterai. Karakteristik kerja baterai untuk menentukan lama pemakaian baterai. Untuk menganalisis permasalahan tersebut perlu digunakan suatu pendekatan. Pendekatan ini diperlukan untuk mendapatkan data-data tentang baterai yang akan digunakan untuk kendaraan listrik. Pendekatan yang dipakai adalah pendekatan model dan pendekatan eksperimen. Pemodelan dilakukan dengan membuat model ini persamaan rangkaian listrik dan analisis model. Sedangkan eksperimen dilakukan dengan mengukur kerapatan larutan elektrolit, mengukur tegangan baterai dan mengu-

kur impedansi baterai (Nugues, 1996 dan Smimite, 1997).

Penelitian tentang penggunaan baterai pada kendaraan listrik telah banyak dilakukan. Baterai dimodelkan menjadi dua rangkaian listrik yang berbeda, satu rangkaian merepresentasikan kapasitas baterai dan rangkaian yang lain merepresentasikan karakteristik transien dan tahanan internal baterai seperti pada Gambar 2 (Knauff, Singh et al, 2007). Hasil simulasi model *tesbed* baterai terhadap data eksperimen mempunyai tingkat kesalahan sebesar 0,19%. Model ini cukup bagus untuk memodelkan suatu baterai, namun tidak adaptif terhadap perubahan suhu/temperatur dan konsentrasi elektrolit.



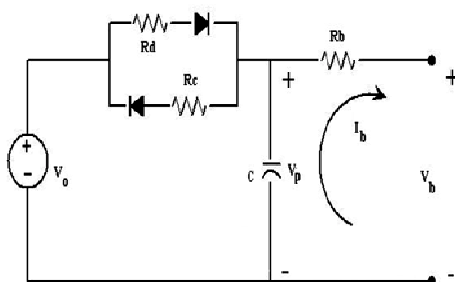
Gambar 2. Model Rangkaian Baterai (Singh et al, 2007).

Model baterai juga dikembangkan dari persamaan Butler-Volmer dengan mengukur terminal output baterai. Model ini cocok untuk mengestimasi tegangan dan arus baterai, tetapi memiliki kelemahan karena baterai harus dalam kondisi terisi antara 60% ~ 80% (Yun, et al, 2004).

Simulator untuk menentukan optimasi pengisian muatan baterai dibuat dengan menggunakan metode Euler dan Peukerts maka dapat ditentukan besarnya tegangan dan arus baterai (Lee, et al, 2001). Baterai dibagi dalam dua mode yaitu mode pengisian muatan dan mode pemakaian energi. Sedangkan cara menentukan pengisian muatan baterai dan lama pemakaian baterai telah dibangun dengan menggunakan metode logika *fuzzy* (Wang dan Singh, 2001). Model ini cukup efektif untuk baterai asam yang memiliki kerugian kapasitas baterai karena pengaruh temperatur yang rendah, rugi internal yang tinggi, berkurangnya jumlah elektrode dan pembentukan sulfasi pada elektroda karena reaksi kimia de-

ngan larutan asam sulfat. Sedangkan implementasi logika *fuzzy* untuk menentukan pengisian muatan baterai dan lama pemakaian baterai juga telah dilakukan (Singh dan Reisner, 2001). Pengembangan logika *fuzzy* dengan metode *coulometri* untuk menentukan pengisian muatan baterai juga telah dikembangkan (Gaddam, et al, 2000). Input yang diukur dalam eksperimen, adalah temperatur dan arus pemakaian. Outputnya adalah efisiensi pemakaian. Estimasi pengisian muatan baterai untuk Scooters listrik dengan metode *fuzzy neural network* telah dikembangkan. Estimasi ini digunakan untuk menentukan jumlah energi yang dibutuhkan oleh scooters. Kelemahan metode ini adalah belum adaptif untuk temperatur yang bervariasi (Lee, Shiah dan Wang, 2007). Penelitian lain tentang estimasi pengisian muatan baterai pada baterai asam Pb dengan metode *coulometri* dan *radial basis function*. Model ini lebih adaptif terhadap perubahan temperatur pada baterai (Sauradip, et al, 2001).

Model matematis untuk melakukan estimasi pengisian muatan pada baterai telah juga dikembangkan (Chiasson, et al, 2005). Persamaan matematis dikembangkan dari model Thevenin baterai, untuk mendapatkan respon dinamis ini seperti Gambar 3.



Gambar 3. Model dinamis baterai (Chiasson, et al, 2005).

Persamaan dinamis dari model baterai tahap *charging* dan *discharging* adalah dengan: ( $R_c$ : tahanan charging,  $R_d$ : tahanan *discharging*,  $I_b$ : Arus baterai,  $C$ : kapa-sitas polarisasi baterai,  $V_{oc}$ : tegangan open circuit,  $V_c$ : tegangan

kapasitor internal,  $V_b$ : tegangan terminal).

$$\begin{aligned} \frac{dV_p}{dt} &= -V_p \frac{1}{R_d C} + V_{oc} \frac{1}{R_d C} - I_b \frac{1}{C}, \quad V_p \leq V_{oc} \\ \frac{dV_p}{dt} &= -V_p \frac{1}{R_c C} + V_{oc} \frac{1}{R_c C} - I_b \frac{1}{C}, \quad V_p > V_{oc} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (1)$$

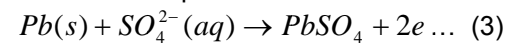
dan

$$I_b = \frac{V_p - V_{oc}}{R_b} \quad \dots\dots\dots (2)$$

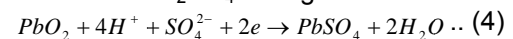
Model pemakaian baterai asam Pb dengan membagi beban secara bertingkat telah dibangun oleh Igor Papić, 2006. Model disimulasikan ini dengan menggunakan teknik besaran arus discharge konstan. Kelebihan energi listrik disimpan kedalam baterai ketika beban rendah, dan mengembalikan energi tersebut ke beban apabila kebutuhan beban sangat tinggi. Metode ini dikenal dengan nama *battery energy storage system* (BESS). Model ini dapat digunakan untuk meramal daya yang diperlukan oleh beban, tetapi memiliki kekurangan yaitu tidak dapat digunakan untuk kondisi temperatur yang bervariasi.

Prinsip kerja baterai berdasarkan reaksi redoks, yang terdiri dari reaksi oksidasi dan reduksi. Reaksi oksidasi adalah reaksi yang melibatkan pelepasan elektron oleh suatu zat, sedangkan reaksi reduksi adalah reaksi yang melibatkan pengikatan elektron oleh suatu zat.

Atom timbal pada anoda ketika di-reaksikan pada larutan asam sulfat  $H_2SO_4$  akan melepaskan elektronnya ( $e^-$ ) dan menimbulkan ion timbal ( $Pb^{2+}$ ). Reaksi oksidasi pada sisi anode adalah :

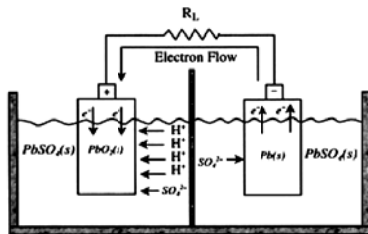


Elektron ( $e^-$ ) bermuatan negatif dan ion timbal ( $Pb^{2+}$ ) bermuatan positif. Pada kondisi standar ( $25^\circ C$ , 1 atm), potensial di anoda dengan reaksi seperti persamaan (3) adalah  $-0,31$  volt. Pada katode terjadi pengikatan elektron oleh ion  $Pb^{4+}$  menjadi ion  $Pb^{2+}$ . Reaksi dengan larutan asam sulfat  $H_2SO_4$  sebagai berikut:



Potensial reduksi standar yang dihasilkan pada katode dengan reaksi seperti persamaan (4) adalah 1,7 volt. Potensial sel ( $E_{sel}$ ) merupakan beda potensial yang terjadi antara katode dan anode. Apabila anode dan katode dihubungkan dengan sebuah penghantar listrik, maka akan mengalir elektron ( $e^-$ ) dari anode ke katode, sehingga mengalir arus listrik dari katode ke anode. Oleh karena itu kutub positif terjadi pada katode dan kutub negatif terjadi pada anode. Besarnya beda potensial untuk satu sel baterai asam Pb adalah:

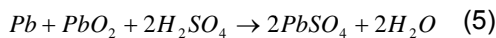
$$E_{sel} = E_{katoda} - E_{anoda} = 1,7 - (-0,31) = 2,01 \text{ volt}$$



Gambar 4. Prinsip kerja baterai asam Pb (Husein, 2003).

Elektron ( $e^-$ ) yang mengalir ke katode melalui penghantar akan membentuk ion  $Pb^{2+}$ , ion ini bereaksi dengan larutan asam sulfat membentuk molekul  $PbSO_4$  dan membentuk air ( $H_2O$ ).

Prinsip dasar baterai adalah sebuah reaksi kimia antara elektrode negatif dan elektroda positif dengan suatu larutan elektrolit:



Baterai akan memberikan energi listrik selama kedua elektrode masih memiliki beda potensial. Setelah kedua elektrode tidak lagi memiliki beda potensial maka dikatakan baterai tersebut kosong atau tidak bermuatan. Untuk itu perlu dilakukan proses pengisian baterai dengan memberikan arus listrik agar berlangsung reaksi redoks kembali.

Usaha listrik maksimum ( $W_{el}$ ) suatu baterai yang beroperasi pada temperatur dan tekanan konstan diberikan oleh perubahan energi bebas Gibbs dari suatu reaksi kimia, yaitu:

$$W_{el} = \Delta G = -e.F.E_{sel} \dots\dots\dots (6)$$

F = konstanta Faraday (96485 C/mol),  $E_{sel}$  = tegangan sel ideal (V), Perubahan energi bebas Gibbs diberikan oleh persamaan:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \dots\dots\dots (7)$$

$\Delta H$  = perubahan *enthalpy* (J/mol),  $\Delta S$  = perubahan *entropy* (-163,25 J/mol K), T = temperatur (K).

Besar  $\Delta H$  pada operasi standar dengan temperatur 25°C dan tekanan 1 atm dengan hasil reaksi berupa air adalah -285,8 kJ/mol. Perbedaan antara  $\Delta H$  dan  $\Delta G$  menghasilkan  $T.\Delta S$ , yaitu pengaruh panas timbal balik. Perbedaan tersebut merepresentasikan panas yang muncul disekeliling ketika proses berlangsung timbal balik, yang berarti keadaan berlangsung dalam kondisi setimbang. Jika  $T.\Delta S$  positif, proses elektrokimia memerlukan energi, ditandai dengan suasana lingkungan yang dingin.  $T.\Delta S$  berharga negatif, bila proses elektrokimia membebaskan energi, ditandai suasana lingkungan yang panas.

Persamaan kesetimbangan tegangan sel  $E_0(V)$  adalah:

$$E_0 = -\frac{\Delta G}{n.F} \dots\dots\dots (8)$$

dengan n: jumlah muatan elektron yang dihasilkan; F: konstanta Faraday, sama dengan 96485 As/equiv.; n.F berarti jumlah muatan listrik hasil reaksi elektrokimia 1.F=26,802Ah/equiv; 2.F=53,604 Ah /equiv);  $n.F.U^0$  e-nergi listrik yang timbul (kJ). Model Shepherd merupakan model baterai yang paling sering digunakan untuk menganalisa baterai, menguraikan tentang perilaku elektrokimia baterai. Model ini digunakan bersama dengan persamaan Peukert untuk mendapatkan tegangan baterai dan pengisian muatan baterai:

$$V_T = E_0 - R_I I - \frac{K_I}{1-f} \dots\dots\dots (9)$$

dengan  $V_T$  tegangan terminal baterai (volt),  $E_0$  tegangan rangkaian terbuka ketika baterai diisi penuh (volt),  $R_I$  ham-

batan internal baterai (ohm),  $K$ , hambatan polarisasi (ohm),  $I$  arus sesaat (ampere).

$$f = \int \frac{I}{Q_0} dt \quad \dots\dots\dots (10)$$

dengan  $f$  adalah ampere jam yang terkumpul dibagi dengan kapasitas baterai penuh ( $Q_0$ ).

Rugi tegangan polarisasi adalah rugi-rugi yang diakibatkan oleh reaksi kimia yang terjadi pada elektrode. Besar rugi tegangan polarisasi dapat dicari dari persamaan (9) dan persamaan (10) berikut:

$$V_p = K \frac{Q}{Q - it} \quad \dots\dots (11)$$

dimana :

$K$ : konstanta polarisasi,  $Q$ : kapasitas baterai (Ah),  $i$ : arus beban (A),  $t$ : lama wak-

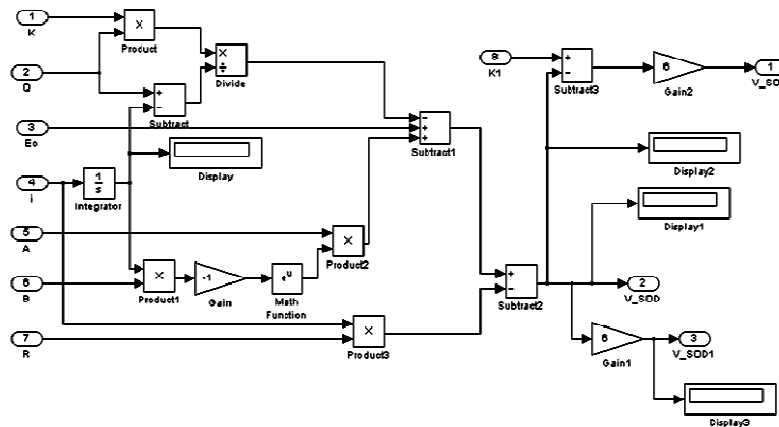
tu pengisian (detik).

Dengan memasukkan persamaan (10) dan (11) ke dalam persamaan (9) dan dengan memasukkan tegangan jatuh pada saat baterai bekerja maka menghasilkan persamaan tegangan keluaran ( $V_{out}$ ) per-selnya sebagai berikut:

$$V_t = E_0 - K \frac{Q}{Q - it} + Ae^{-Bit} - iR_{int} \dots (12)$$

dengan  $A$  dan  $B$  adalah suatu konstanta.

Model tegangan keluaran bebahan dalam bentuk blok diagram dibuat berdasarkan persamaan (12), seperti pada Gambar 5. Model ini diperlukan untuk mengetahui tegangan keluaran baterai terhadap perubahan arus beban.



Gambar 5. Model baterai pada kendaraan listrik.

Model baterai pada gambar 5 menjelaskan performa baterai ketika baterai sedang diisi muatan dan ketika baterai sedang memberikan muatan/energi ke beban. Dari kedua fase itu maka model dibuat menjadi dua mode yaitu mode kapasitas baterai/*State of Charge* dan mode besarnya muatan yang dilepaskan/*State of discharge*.

*State of Charge* adalah besarnya kapasitas baterai pada suatu waktu  $t$  tertentu. Arus yang mengalir merupakan perubahan muatan per satuan waktu.

$$dSoC_T = -dq \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$SoC_T(t) = Q_T - \int_0^t i(\tau) d\tau \quad \dots\dots\dots (14)$$

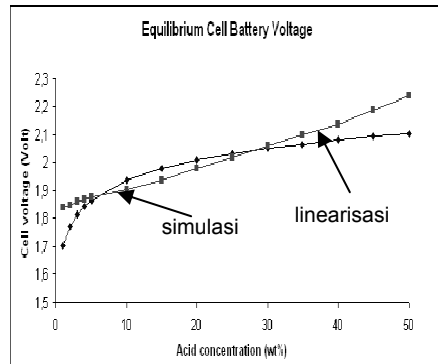
*State of discharge* adalah besarnya muatan yang telah dikeluarkan dari baterai pada waktu tertentu. Persamaan matematis *state of discharge* diperoleh dari kapasitas maksimum baterai dikurangi dengan kapasitas baterai pada waktu tertentu.

$$SoD_T(t) = \Delta q = \int_0^t i(\tau) d\tau \quad \dots\dots\dots (15)$$

$$SoD_T(t) = Q_T - SoC_T(t)$$

**PEMBAHASAN**

Simulasi model ini telah dilakukan menggunakan data (Kiehne, 2003). Hasil simulasi dengan menggunakan Si-mulink dijelaskan pada Gambar 6.



Gambar 6. Tegangan sel baterai vs konsentrasi larutan.

Hasil simulasi program MATLAB/SIMULINK terhadap tegangan satu sel baterai asam  $H_2SO_4$  berkisar antara nilai 1,7 volt sampai 2,1 volt dengan konsentrasi larutan sebesar 1wt%(1g/cm<sup>3</sup>) - 50wt% (1,4g/cm<sup>3</sup>). Linearisasi tegangan sel baterai secara praktis ditentukan menurut persamaan(16) (Kiehne, 2003):

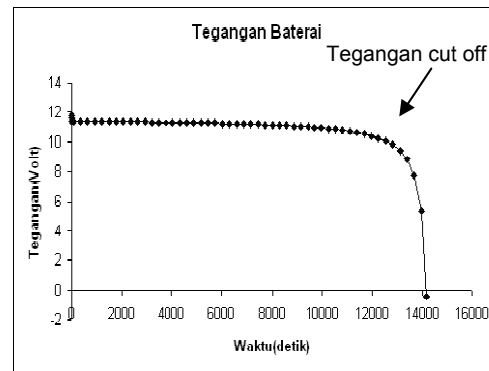
$$V_{sel} = \text{konsentrasi larutan} + 0,84 \dots (16)$$

Pendekatan linear pada konsentrasi tersebut memberikan nilai tegangan satu sel baterai asam Pb sebesar 1,84volt untuk konsentrasi larutan 1g/cm<sup>3</sup> ~ 2,24volt untuk konsentrasi larutan 1,4g/cm<sup>3</sup>. Penyimpangan model Matlab/SIMULINK terhadap model linear rata-rata sebesar 3,63% (kurang dari 5%).

Gambar 7 menjelaskan tegangan baterai asam Pb ketika sedang bekerja dengan simulasi terhadap enam sel elektrode menghasilkan tegangan maksimum 12 volt dan tegangan cut off 9,6 volt. Tegangan cut off adalah tegangan baterai dimana baterai sudah tidak boleh lagi dibebani. Tegangan baterai sendiri tergantung dari banyaknya sel elektrokimia yang tersusun secara seri. Dengan n sel elektrokimia maka be-

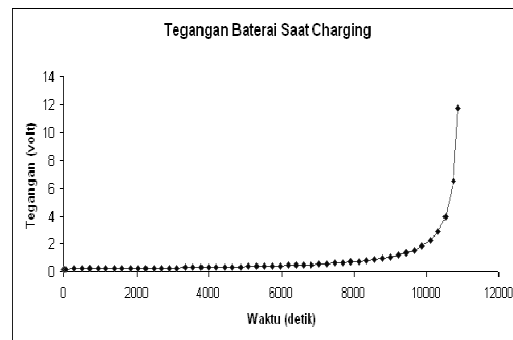
sar tegangan keluaran baterai menjadi :

$$V_{baterai} = n \cdot V_t \dots \dots \dots (17)$$



Gambar 7. Tegangan baterai vs waktu ketika baterai bekerja

Model diatas diperoleh dari enam buah sel elektrokimia jenis Pb yang tersusun secara seri.

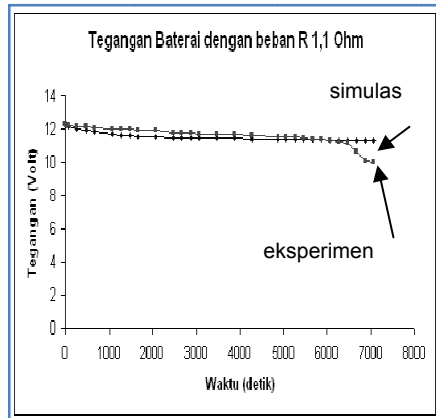


Gambar 8. Tegangan baterai vs waktu ketika baterai diisi.

Gambar 8 menjelaskan tentang tegangan baterai asam Pb saat dilakukan pengisian muatan. Dari simulasi model tegangan baterai asam Pb diperlukan waktu pengisian selama 10900 detik dengan arus pengisian 0,45 ampere untuk mendapatkan tegangan baterai sebesar 12 volt dan kapasitas 5 Ah.

Gambar 9 menjelaskan pengujian baterai asam Pb 12 volt, 5 Ah dengan beban R 1,1 ohm, memberikan nilai tegangan baterai sebesar 12,5 volt sampai 10 volt saat cut off. Waktu mencapai cut off adalah 7069 detik.





Gambar 9. Tegangan baterai vs waktu.

### KESIMPULAN

Kapasitas baterai ini sangat penting bagi kendaraan listrik. Nilai kapasitas ini dapat ditentukan dari besarnya muatan suatu baterai. Nilai kapasitas muatan dapat didekati dari dua perhitungan. Pertama dengan menentukan integrasi terhadap arus konstan yang digunakan untuk mengisi baterai sampai diperoleh suatu tegangan nominal baterai. Kedua dengan metoda coulometri yaitu penentuan kapasitas baterai berdasarkan jumlah muatan yang ada pada baterai. Hasil simulasi dengan MATLAB/Simulink terhadap data eksperimen memberikan nilai yang mendekati dengan kesalahan tidak lebih dari 5%.

### DAFTAR PUSTAKA

- Caumont, O, Le Moigne, P, Rombaut, Muneret, X., Lenain, P., *Energy Gauge for Lead-Acid Batteries in Electric Vehicles*, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol 15, No3. September 2000, pp.354-360.
- Chiasson, J, Vairamohan, B, *Estimating the state of charge of a battery*, IEEE Transactions on Control System Technology, Volume 13, Issue 3, May 2005, pp.465-470.
- Dhameja, S., 2002, *Electric Vehicle Battery Systems*, Newnes, United Stated.
- Gaddam, V. R, Wang, X.Q., Arey, S., Yang, Z.J. and Singh, P, *Fuzzy Logic Based Internal and External SOC Meters for Li/SO<sub>2</sub> Cells*, 2000, [www.ece.villanova.edu/~singh/PAPER/IE\\_SOCLi.pdf](http://www.ece.villanova.edu/~singh/PAPER/IE_SOCLi.pdf).
- Husain, I., 2003, *Electric and Hybrid Vehicles Design Fundamentals*, Pertama, CRC Press, United Stated.
- Kiehne, A, 2003, *Battery Technology Handbook*, Second Edition, Marcel Dekker, NY.
- Knauff, M., McLaughlin, J., Dafis, C., Niebur, P., Singh, P., Kwatny, Nwankpa, C., *Simulink Model of a Lithium-Ion Battery for the Hybrid Power System Testbed*, 2007, [www.power.ece.drexel /Students/Knauff .pdf](http://www.power.ece.drexel /Students/Knauff .pdf)
- Kunzli, N., *Public-Health Impact of Outdoor and Traffic-Related Air Pollution: A European Assessment*, The Lancet, Vol. 356, September 2000, pp. 795-801.
- Larminie, J, Lowry, J, 2003, *Electric Vehicle Technology Explained*, John Wiley & Son, USA.
- Lee, W, Sunwoo, M, *Vehicle Electric Power Simulator for Optimizing the Electric Charging System*, *International Journal of Automotive Technology*, Vol. 2, No. 4, 2001, pp. 157-164.
- Lee, D.T., Shiah, S.J., Lee, C.M. and Wang, Y.C., *State of Charge Estimation for Electric Scooters by Using Learning Mechanisms*, IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 56, No. 2, March 2007, pp. 544-556.
- Lew, F., 2004, *Reducing Oil Consumption in Transport: Combining Three Approaches*, Office of Energy Efficiency, Technology and R&D International Energy Agency.
- Nugues, S., *Mesure de l'état de charge d'une batterie par coulométrie corrigée par impédancemétrie*, Thèse de doctorat, Octobre 1996, INPG.
- Papic, I., *Simulation Model for Discharging a Lead Acid Battery Energy Storage System for Load Leveling*, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol 21, No. 2, JUNE 2006, pp. 608-615.
- Patterson, P., 2002, *Quantifying the Fuel Use and GHG Reduction Potential of EVs and HEVs*, Available April



- 26 , 2002:<http://www.ott.doe.gov/pdfs/evsl7.pdf>
- Sauradip, M.S., Sinha, K., Muthukumar, K., *Estimation of State of Charge of Lead Acid Battery using Radial Basis Function*, IECON'01: The 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2001, pp.131-136.
- Singh, P., Reisner, D.E., *Development of Fuzzy Logic Based Lead Acid Battery Management Techniques with Applications to 42V Systems*, [www.ece.villanova.edu/~singh/PAPER/DMT42v.pdf](http://www.ece.villanova.edu/~singh/PAPER/DMT42v.pdf).
- Smimite, H., *Etude du comportement et gestion d'une batterie au plomb à recombinaison équipant un véhicule électrique*, Thèse de doctorat, November 1997, Université de Montpellier.
- Wang, X., Singh, P., *Preliminary Design of a Smart Battery Controller for SLI Batteries*, 2001, [www.ece.vill.edu/singh/PAPER/PDSBCLI.pdf](http://www.ece.vill.edu/singh/PAPER/PDSBCLI.pdf).
- Yun, H.S., Lee, J.H., B.H. Cho, "Modeling of 36V Lead Acid Battery for the 42V Automotive System Simulation", 2004, [www.pearlx.snu.ac.kr/Publication/icpe\\_0407.pdf](http://www.pearlx.snu.ac.kr/Publication/icpe_0407.pdf).