

LEAD ACID BATTERY MODELING FOR ELECTRIC CAR POWER SOURCES

Pemodelan Baterai Asam (Lead Acid Battery) Sebagai Sumber Energi Mobil Listrik

Bambang Sri Kaloko

Department of Electrical Engineering, Jember University, Jl. Slamet Riyadi 62 Jember

Received March 13, 2009; Accepted October 12, 2009

ABSTRACT

Successful commercialization of electric vehicles will require a confluence of technology, market, economic, and political factors that transform EVs into an attractive choice for consumers. The characteristics of the traction battery will play a critical role in this transformation. The relationship between battery characteristics such as power, capacity and efficiency, and EV customer satisfaction are discussed based on real world experience. A general problem, however, is that electrical energy can hardly be stored. In general, the storage of electrical energy requires its conversion into another form of energy. Electrical energy is typically obtained through conversion of chemical energy stored in devices such as batteries. In batteries the energy of chemical compounds acts as storage medium, and during discharge, a chemical process occurs that generates energy which can be drawn from the battery in form of an electric current at a certain voltage. A computer simulation is developed to examine overall battery design with the MATLAB/Simulink. Battery modelling with this program have error level less than 5%.

Keywords: *Electrochemistry, lead acid battery, stored energy*

PENDAHULUAN

Mobil dengan bahan bakar minyak (BBM) berkembang seiring dengan rendahnya harga minyak dunia saat itu sehingga kebutuhan BBM untuk mobil semakin lama semakin meningkat. Sementara itu cadangan energi bahan bakar minyak (BBM) kian menipis [1-2]. Mobil yang digerakkan dengan mesin bakar (*internal combustion engine/ICE*) akan menghasilkan emisi gas buang yang berpotensi menimbulkan polusi udara sebagaimana disampaikan oleh *Environmental Protection Agency* (EPA). Gas buang yang dihasilkan oleh mobil dengan mesin bakar terdiri dari 18% partikel padat, 27% merupakan campuran bahan mudah menguap (terdiri 28% Pb, 32% NO dan 62% CO) serta CO₂ sebanyak 25% [3]. Polusi udara berdampak pada lingkungan [4] dan kesehatan manusia [5].

Penghematan bahan bakar minyak pada sektor transportasi serta isu *global warming* mendorong perlunya dikembangkan alat transportasi yang hemat BBM dan ramah lingkungan. Dari permasalahan ini perlu dicari sumber energi alternatif sebagai sumber energi yang digunakan untuk menggerakkan mobil serta teknologi penggerak mobil yang tidak menggunakan motor bakar. Salah satu upaya untuk mengurangi ketergantungan pada BBM dan mengurangi polusi lingkungan hidup adalah membuat mobil listrik.

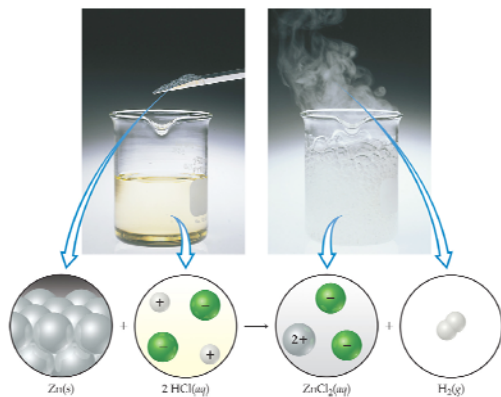
Mobil listrik umumnya mendapatkan sumber energi listrik dari baterai. Baterai tersebut adalah suatu sel elektrokimia yang terdiri dari empat komponen dasar

yaitu elektroda positif, elektroda negatif, larutan elektrolit, dan *separator*/pemisah yang berfungsi sebagai isolasi antara elektroda positif dan negatif. Reaksi kimia antara elektroda dengan larutan elektrolit akan menghasilkan potensial listrik. Beda potensial listrik antara elektroda positif dengan elektroda negatif akan menghasilkan tegangan sel baterai. Besarnya tegangan sel baterai ini ditentukan oleh jenis elektroda dan konsentrasi larutan elektrolit. Sedangkan kapasitas baterai adalah banyaknya muatan listrik yang dapat diperoleh dari suatu baterai yang nilainya tergantung pada banyaknya bahan aktif yang ada [6].

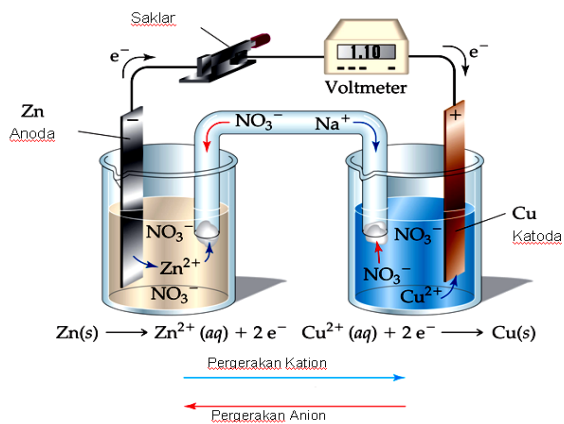
Baterai elektrokimia mempunyai arti penting dalam sistem energi listrik sebab mereka memberi makna dalam menyimpan energi dengan cara seketika. Sebagian dari penggunaan utama baterai yang tumbuh cepat berlangsung dalam dekade terakhir adalah sebagai sumber energi utama pada mobil listrik. Ada banyak jenis baterai yang sekarang ini digunakan atau dikembangkan untuk pemakaian praktis, yang semakin tersebar luas pemakaiannya adalah baterai asam Pb [7-10].

Prinsip dari baterai pada umumnya adalah memanfaatkan reaksi elektrokimia [6,11]. Suatu logam yang bersentuhan dengan suatu larutan yang mengandung ion menyebabkan aktivitas ion dalam fase logam dan dalam fase larutan akan berbeda, perbedaan ini akan menimbulkan gaya dorong untuk hilangnya atau diperolehnya Zn⁺² oleh logam itu (gambar 1). Logam melepaskan Zn⁺² ke dalam larutan,

* Corresponding author. Tel/Fax : +62-331-7824522
Email address : b_srikaloko@yahoo.com

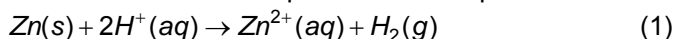


Gambar 1. Reaksi kimia pada elektroda tunggal[11]



Gambar 2. Reaksi kimia sel volta[11]

sehingga terjadi kelebihan elektron dalam logam, sementara larutan memperoleh muatan positif.



Penggabungan dua elektrode tunggal dalam larutan elektrolit membentuk sebuah sel. Keduanya dihubungkan dengan tabung U terbalik yang berisi suatu larutan garam, seperti kalium klorida, dengan sumbat agar-agar pada tiap ujung (gambar 2). Suatu arus akan mengalir melewati penghantar logam dan juga perpindahan ion lewat larutan. Sistem dua elektrode ini adalah sebuah sel elektrokimia dan merupakan contoh sebuah sel galvanik. Sebuah sel galvanik adalah sel dalam mana sejumlah energi yang dilepaskan secara spontan dalam suatu reaksi kimia diubah menjadi energi listrik [3,6,11]. Parameter dasar yang mempengaruhi reaksi sel elektrokimia ditentukan oleh persamaan termodinamika dan persamaan kinetika [3]. Kedua parameter tersebut menjelaskan tentang proses elektrokimia berlangsung dalam kesetimbangan yaitu seluruh reaksi berada dalam kondisi setimbang, serta proses elektrokimia mengalami perpindahan massa atau difusi larutan yang dibutuhkan untuk membawa unsur-unsur kimia ke permukaan elektroda [6,12-14].

Parameter termodinamika dalam reaksi elektrokimia adalah reaksi Enthalpy (ΔH), reaksi Pembebasan Enthalpy (ΔG), dan reaksi Entropy (ΔS). Hubungan penting ketiga parameter tersebut adalah:

$$\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S \quad \text{atau} \quad \Delta H - \Delta G = T \cdot \Delta S \quad (2)$$

dengan T: temperatur dalam K.

Jika $T \cdot \Delta S$ positif, proses elektrokimia memerlukan energi, ditandai dengan suasana lingkungan yang dingin. $T \cdot \Delta S$ berharga negatif, bila proses elektrokimia membebaskan energi, ditandai dengan suasana lingkungan yang panas.

Persamaan kesetimbangan tegangan sel U^0 (V) adalah:

$$U^0 = -\frac{\Delta G}{n \cdot F} \quad (3)$$

dengan n = jumlah muatan elektron yang dihasilkan; F = konstanta Faraday, sama dengan 96485 ampere detik/equiv.; $n \cdot F$ berarti jumlah muatan listrik hasil reaksi elektrokimia ($1 \cdot F = 26,802 \text{ Ah/equiv.}$; $2 \cdot F = 53,604 \text{ Ah/equiv.}$); $n \cdot F \cdot U^0$ energi listrik yang timbul (kJ).

Parameter kinetik sangat tergantung pada temperatur ketika reaksi kimia berlangsung. Ketergantungan ini dijelaskan oleh persamaan Arrhenius Dengan memanfaatkan energi aktivasi [6]:

$$\ln(k) = -\frac{E_A}{R \cdot T} + \ln(k_0) \quad \text{atau} \quad \ln(k) = -\frac{E_A}{R} \cdot \frac{1}{T} + \ln(k_0) \quad (4)$$

dengan k : laju reaksi (mol/detik); T : temperatur dalam K.

METODE PENELITIAN

Bahan

Penelitian ini menggunakan bahan utama satu unit baterai asam Pb (*lead acid battery*), tahanan R 1,1 ohm, dan motor dc.

Alat

Peralatan utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebuah *osilloscope*, ampere meter, volt meter, watt meter, sebuah komputer, software Matlab/Simulink versi 7.

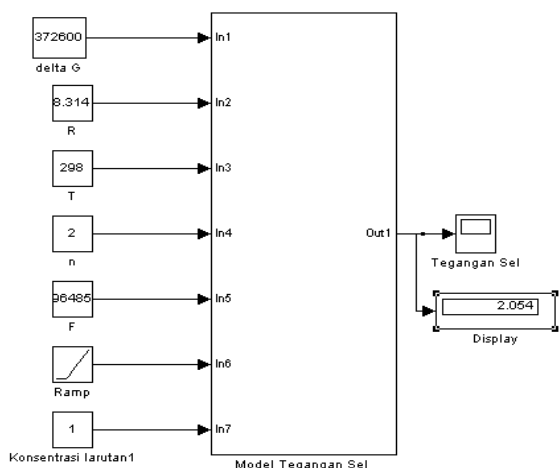
Prosedur Kerja

Pemodelan Elektrokimia Sel Baterai

Parameter termodinamika menguraikan nilai-nilai dasar suatu baterai yaitu keseimbangan tegangan dan kemampuan menyimpan energi (Tabel 1). Jumlah energi termodinamika seperti ΔH dan ΔG tergantung pada konsentrasi komponen [6]. Hubungan yang bersesuaian adalah:

Tabel 1. Data termodinamika beberapa baterai

No	Baterai	Elektroda positif	Elektroda negatif	Elektrolit	Reaksi sel	Uo
1	Lead acid	PbO ₂	Pb	H ₂ SO ₄	Pb+PbO ₂ +2H ₂ SO ₄ ⇌ 2PbSO ₄ +2H ₂ O	2
2	NiCd	NiOOH	Cd	KOH	Cd+2NiOOH+2H ₂ O ⇌ 2Ni(OH) ₂ +Cd(OH) ₂	1,3
3	NiMH	NiOOH	H ₂	KOH	2NiOOH+H ₂ ⇌ 2Ni(OH) ₂	1,3
4	Li ion	Li _(1-x) MnO ₂	Li _x C	carbon	Li _x C ₆ +Li _(1-x) Mn ₂ O ₄ ⇌ C ₆ +Li _x Mn ₂ O ₄	3,6



Gambar 3. Pemodelan tegangan sel baterai Pb dengan elektrolit H₂SO₄

$$\Delta G = \Delta G_S + R.T. \left(\sum \ln [(a_i)^{j_i}]_{prod} - \sum \ln [(a_i)^{j_i}]_{react} \right) \quad (5)$$

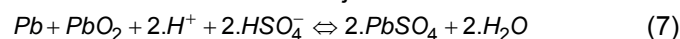
dengan a_i: aktifitas komponen reaksi i (mol.cm⁻³); j_i: jumlah komponen yang sesuai dalam reaksi; R: konstanta molar gas ideal (R=8,3145 J.K⁻¹mol⁻¹); T: temperatur (K).

Kombinasi persamaan (3) dan (5) menghasilkan persamaan "Nernst":

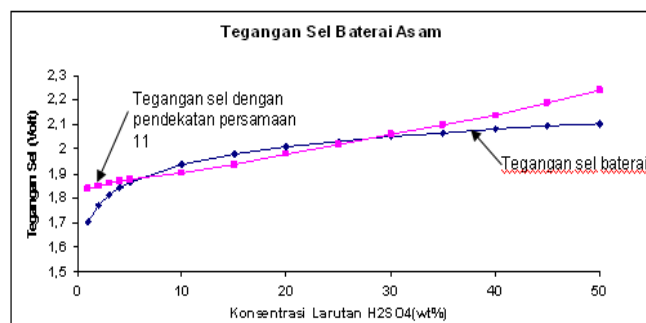
$$U^0 = U^{0,8} - \frac{R.T}{n.F} \ln \frac{\prod (a_i)_{react}^j}{\prod (a_i)_{prod}^j} \quad (6)$$

dengan mempertimbangkan ln(...) = 2,303log(...); R = 8,3145J/(K.mol); F = 8,3145 Ws/(K.mol); F = 96485 ampere detik/equiv.; maka R/F = 0,02569V.equiv. mol⁻¹.

Baterai asam menggunakan larutan H₂SO₄, larutan asam ini terurai menjadi ion H⁺ dan HSO₄⁻. Hanya 1% molekul H₂SO₄ terurai menjadi ion 2.H⁺ dan SO₄²⁻. Reaksi sel keseluruhan menjadi:



Reaksi pembebasan enthalpy sel adalah ΔG = -372,6 kJ. Jika nilai ini dimasukkan ke dalam persamaan (3) maka nilai kesamaan tegangan menjadi:



Gambar 4. Kurva tegangan kesetimbangan sel baterai asam

$$U^{0,8} = 1,931 \text{ V} \quad (8)$$

dengan aH⁺; aHSO₄⁻; aH₂O = 1 mol/L dan kerapatan larutan asam 1,066 g/cm³ atau konsentrasi larutan asam 1,083 mol/L.

Tegangan kesetimbangan baterai asam Pb menurut persamaan Nernst dijelaskan seperti pada gambar 3 menjadi:

$$U^0 = 1,931 + 0,0592 \cdot \log \frac{aH^+ \cdot aHSO_4^-}{aH_2O} \text{ V} \quad (9)$$

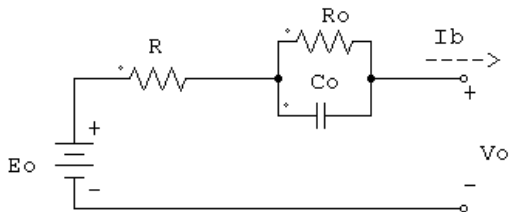
Hasil simulasi program MATLAB/SIMULINK untuk menjelaskan pengaruh konsentrasi larutan terhadap tegangan kesetimbangan tertera pada gambar 4. Linearisasi tegangan sel baterai secara praktis ditentukan menurut persamaan [6]:

$$\text{Kesetimbangan tegangan sel} = \text{konsentrasi elektrolit} + 0,84 \quad (10)$$

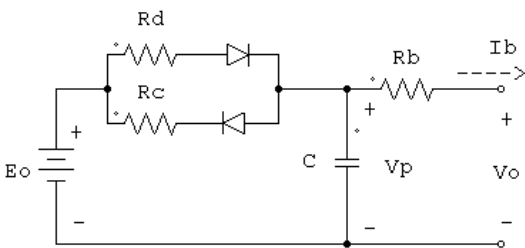
Pemodelan Kapasitas Baterai

Kapasitas baterai adalah jumlah muatan bebas yang dihasilkan oleh bahan-bahan aktif pada elektroda negatif dan yang digunakan oleh elektroda positif. Besarnya kapasitas baterai ditentukan oleh jumlah dan jenis elektroda serta konsentrasi larutan elektrolit [15].

$$Q_T = xnF = 0,278F \frac{n.m_R}{M_M} = \int i \cdot dt \quad (11)$$



Gambar 5. Model Baterai Thevenin [8]



Gambar 6. Model dinamis baterai [9-10]

dengan : Q_T = kapasitas baterai, ampere jam, x = banyaknya mol dari komponen reaktan, n = jumlah elektron yang dihasilkan oleh elektroda, m_R = jumlah massa reaktan, kg, M_M = jumlah massa molar reaktan, g/mol, $F = Le_0 = 96412$ C/mol, L = jumlah molekul atau atom dalam mole, e_0 = muatan elektron, i = arus pengisian baterai.

Pendekatan dengan konstanta Peukert [16] suatu kapasitas baterai dapat diperoleh dengan:

$$Q = I^k t \tag{12}$$

dengan k suatu konstanta dan t dalam waktu.

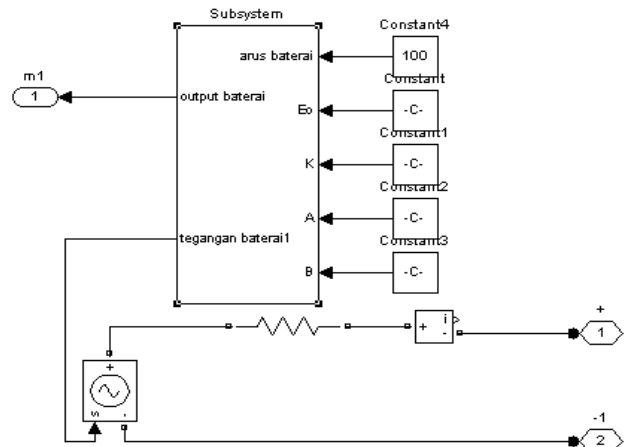
Usaha listrik maksimum (W_{el}) suatu baterai yang beroperasi pada temperatur dan tekanan konstan diberikan oleh perubahan energi bebas Gibbs dari suatu reaksi kimia, yaitu :

$$W_{el} = \Delta G = - e.F.E_{sel} \tag{13}$$

dengan e = jumlah elektron yang berpartisipasi dalam reaksi, F = konstanta Faraday (96485 C/mol), E_{sel} = tegangan sel ideal (V). Besar ΔH pada operasi standar dengan temperatur 25 °C dan tekanan 1 atm dengan hasil reaksi berupa air adalah -285,8 kJ/mol.

Pemodelan Matematis Baterai

Model baterai asam/lead acid battery telah dimuat dalam berbagai paper, salah satunya adalah model persamaan rangkaian Thevenin untuk menampilkan bentuk sederhana baterai (gambar 5). Model baterai terdiri dari sumber tegangan konstan E_0 , terminal tegangan tanpa beban V_0 , tahanan internal baterai R , kapasitansi baterai C . Kekurangan model Thevenin adalah semua unsur-unsur tersebut diasumsikan konstan, tetapi sesungguhnya semua nilai-nilai tersebut memiliki nilai sesuai kondisi baterai [8]. Untuk mengatasi kondisi tersebut model dinamis baterai dibuat dengan kemungkinan kondisi reversibel yang sesuai dengan kondisi baterai asam/lead acid battery seperti pada



Gambar 7. Pemodelan baterai asam Pb dengan MATLAB/SIMULINK



Gambar 8. Simulasi model karakteristik baterai asam Pb dengan Simulink/Matlab

gambar 6 [9-10]. Persamaan 14 menjelaskan kondisi nyata baterai asam dengan memasukkan konstanta polarisasi.

$$v_0 = v_p - \left(R_b + \frac{K}{SOC} \right) I_b \tag{14}$$

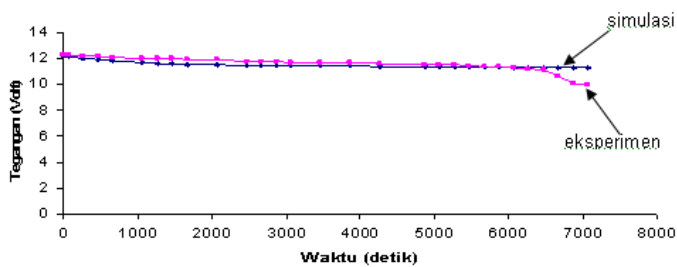
Dengan K = konstanta polarisasi, secara khas nilainya 0,1. Perbaikan model ini dapat digunakan untuk karakteristik yang tidak linear dalam hal ini komponen K/SOC

HASIL DAN PEMBAHASAN

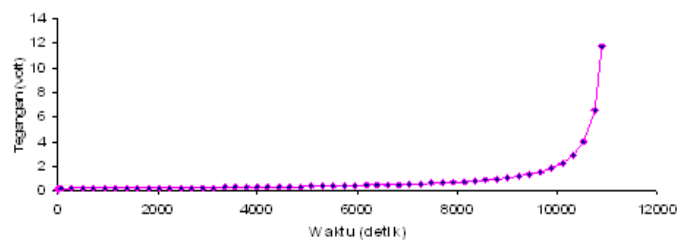
Simulasi Model Sel Baterai

Persamaan matematis baterai asam/lead acid battery (persamaan 14) disimulasikan dengan menggunakan program Matlab/Simulink seperti tertera pada gambar 7. Simulasi program MATLAB/SIMULINK untuk menjelaskan unjuk kerja baterai asam/lead acid battery tertera pada gambar 8.

Tegangan baterai asam Pb dengan simulasi terhadap enam sel elektroda 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. Pengujian



Gambar 9. Hasil simulasi dengan data eksperimen baterai asam dengan beban 1,1 ohm



Gambar 10. Tegangan baterai sebagai fungsi waktu ketika baterai diisi (state of charge)

baterai asam/lead acid battery 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 seperti dijelaskan pada gambar 9.

Simulasi Model Kapasitas Baterai

Simulasi model tegangan *state of charge* baterai pada baterai asam Pb dijelaskan pada gambar 10, diperlukan waktu pengisian selama 10900 detik dengan arus *charge* 0,45 A untuk mendapatkan tegangan baterai sebesar 12 volt dan kapasitas 5 Ah.

Dengan asumsi tegangan baterai asam sekitar 2 volt dengan tahanan internal sebesar 0,033 ohm, untuk keperluan daya mobil listrik sekitar 10 kW maka dibutuhkan sel baterai asam dengan kapasitas daya 208 Ah dan tegangan kerja 48 volt. Kebutuhan ini dipenuhi dengan menyusun sel-sel baterai asam secara seri dan paralel untuk memenuhi kapasitas daya yang diinginkan. Berdasarkan asumsi di atas maka dibutuhkan tidak kurang sebanyak 24 sel yang disusun secara seri dan sejumlah 266 sel yang disusun secara paralel. Sehingga secara keseluruhan dibutuhkan sel sebanyak kurang lebih 6400 sel baterai asam.

KESIMPULAN

Hasil simulasi program MATLAB/SIMULINK terhadap tegangan satu sel baterai asam H₂SO₄ berkisar antara nilai 1,7 volt sampai 2,1 volt dengan konsentrasi larutan sebesar 1wt% ~ 50wt%. Pendekatan linear pada konsentrasi tersebut memberikan nilai tegangan satu sel

baterai asam H₂SO₄ sebesar 1,84 volt ~ 2,24 volt. Penyimpangan model MATLAB/SIMULINK terhadap model linear kurang dari 5%. Dari pemodelan baterai dengan program MATLAB/SIMULINK dibutuhkan kurang lebih sebanyak 6400 sel baterai asam untuk mendapatkan daya sekitar 10 kW yang diperlukan oleh mobil listrik.

UCAPAN TERIMA KASIH

Kami ingin menyampaikan rasa terima kasih yang tulus kepada semua pihak yang telah membantu kami sehingga penelitian kami dapat diselesaikan dengan baik. Kami ucapkan terima kasih kepada seluruh karyawan di Laboratorium Konversi Energi Universitas Jember yang menyediakan seluruh fasilitas untuk pengujian di lapangan.

DAFTAR PUSTAKA

- 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>
- Wood, J.H., Long, G.R., and Morehouse, D.F., 2004, *Long-Term World Oil Supply Scenarios: The Future Is Neither as Bleak or Rosy as Some Assert*, US Department of Energy, 2004. Available Jan. 2008: http://www.eia.doe.gov/pub/oil_gas/petroleum/feature_articles/2004/worldoilsupply/oilsupply04.html
- Dhameja, S., 2002, *Electric Vehicle Battery Systems*, Newnes, United States.
- Bernstein, L. et. al., 2007, *Intergovernmental Panel on Climate Change Fourth Assessment Report—Climate Change 2007: Synthesis Report—Summary for Policymakers*, Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007. Available Jan. 2008: www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr.pdf.
- Künzli, N., Kaiser, R., Medina, S., Studnicka, M., Chanel, O., Filliger, P., M Herry, M., F Horak, F.Jr., Puybonnieux-Texier, V., Quénel, P., Schneider, J., Seethaler, R., J-C Vergnaud, J-C., and Sommer, H., 2000, *The Lancet*, 356, 9232,795-801.
- H. A. KIEHNE, 2003, *BATTERY TECHNOLOGY HANDBOOK* Second Edition, MARCEL DEKKER, NY.
- Ceraolo, M., 2000, *IEEE Trans. Power Syst.*, 15, 4, 1184-1190.
- Salameh, Z.M., Casacca, and Lynch, W., 1992, *IEEE Trans. Energy Convers.*, 7, 1, 93-98.
- Chan, H.L. and Sutanto, D., 2000, *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, 1, 470-475.

10. Stefano, B. and Ceraolo, M., 2002, *IEEE Trans. Energy Convers.*, 17, 1.
11. Theodore, L.B., LeMay, E., and Bruce, E. B., 2006, *Electrochemistry*, Prentice Hall, Inc, St. Charles Community College St. Peters, MO.
12. Caumont, O., Le Moigne, P., Rombaut, C., Muneret, X., and Lenain, P., 2000, *IEEE Trans. Energy Convers.*, 15, 3, 354-360.
13. Kozawa, A., Masaki, Y., and Yoshitake, H., 2003, *J. Asian Electr. Veh.*, 1, 2, 491-492.
14. Sugiwarra, M. and Tachibana, K., 2007, *J. Asian Electr. Veh.*, 2, 5, 1043-1048.
15. Husain, I., 2003, *Electric and Hybrid Vehicles Design Fundamentals*, CRC Press, United Stated.
16. Larminie, J. and Lowry, J., 2003, *Electric Vehicle Technology Explained*, John Wiley & Son.