



MODELLING AND IDENTIFICATION OF OXYGEN EXCESS RATIO OF SELF-HUMIDIFIED PEM FUEL CELL SYSTEM

PEMODELAN DAN IDENTIFIKASI RASIO KELEBIHAN OKSIGEN PADA SISTEM SELF-HUMIDIFIED PEM FUEL CELL

Edi Leksono ^{a,*}, Justin Pradipta ^a, Tua Agustinus Tamba ^b

^a Laboratorium Manajemen Energi, Teknik Fisika – Institut Teknologi Bandung
Gedung TP Rahmat Lt.3, Jl. Ganesha No. 10 Bandung, Jawa Barat 40132, Indonesia

^b Department of Electrical Engineering – University of Notre Dame
275 Fitzpatrick Hall of Engineering, Notre Dame, IN 46556, USA

Received 6 June 2012; received in revised form 9 July 2012; accepted 9 July 2012

Published online 31 July 2012

Abstract

One essential parameter in fuel cell operation is oxygen excess ratio which describes comparison between reacted and supplied oxygen number in cathode. Oxygen excess ratio relates to fuel cell safety and lifetime. This paper explains development of air feed model and oxygen excess ratio calculation in commercial self-humidified PEM fuel cell system with 1 kW output power. This modelling was developed from measured data which was limited in open loop system. It was carried out to get relationship between oxygen excess ratio with stack output current and fan motor voltage. It generated fourth-order 56.26% best fit ARX linear polynomial model estimation (loss function = 0.0159, FPE = 0.0159) and second-order ARX nonlinear model estimation with 75 units of wavenet estimator with 84.95% best fit (loss function = 0.0139). The second-order ARX model linearization yielded 78.18% best fit (loss function = 0.0009, FPE = 0.0009).

Key words: PEM fuel cell, self-humidified, oxygen excess ratio, system identification, polynomial model.

Abstrak

Salah satu parameter pengoperasian fuel cell adalah rasio kelebihan oksigen yang menggambarkan perbandingan antara jumlah oksigen yang bereaksi dengan jumlah oksigen yang dipasok pada katode fuel cell. Rasio kelebihan oksigen penting untuk diperhatikan karena berkaitan dengan keselamatan operasi dan usia penggunaan fuel cell. Makalah ini memaparkan teknik penentuan model masukan udara dan perhitungan rasio kelebihan oksigen pada self-humidified PEM fuel cell komersial dengan daya keluaran 1 kW. Pemodelan dilakukan berdasarkan data hasil pengukuran yang relatif terbatas pada sistem loop terbuka. Persamaan rasio kelebihan oksigen kemudian ditentukan dengan menggunakan model pasokan udara. Identifikasi loop terbuka dengan model ARX dilakukan untuk memperoleh hubungan antara rasio kelebihan oksigen terhadap nilai arus stack dan tegangan motor fan. Berdasarkan hasil identifikasi sistem diperoleh bahwa estimasi polinomial linier ARX orde 4 menghasilkan tingkat kecocokan 56,26% (loss function = 0,0159; final prediction error (FPE) = 0,0159) dan estimasi model non linier ARX orde 2 dengan estimator wavenet 75 unit menghasilkan tingkat kecocokan 84,95% (loss function = 0,0139). Untuk kemudahan perancangan sistem kontrol, linearisasi dilakukan pada model non linier ARX dan menghasilkan model ARX orde 2 dengan tingkat kecocokan 78,18% (loss function 0,0009; FPE 0,0009).

Kata kunci: PEM fuel cell, self-humidified, rasio kelebihan oksigen, identifikasi sistem, model polinomial.

I. PENDAHULUAN

Seiring dengan perkembangan dan kemajuan teknologi, kebutuhan akan ketersediaan energi dan perangkat konversi energi juga semakin meningkat. Hal ini mendorong berbagai upaya penelitian dan pengembangan dalam perangkat

baru konversi energi. Salah satu alternatifnya adalah *fuel cell* yang dianggap memiliki prospek yang baik sebagai solusi perangkat dan sistem konversi energi. *Fuel cell* merupakan suatu perangkat yang membangkitkan energi listrik berdasarkan reaksi elektrokimia bahan bakarnya. *Fuel cell* tidak menghasilkan gas emisi seperti yang sering ditemukan pada proses pembakaran dan hanya menghasilkan air serta energi panas

* Corresponding Author. Tel: +62-22-2509161
E-mail: edi@tf.itb.ac.id

sebagai hasil sampingan. *Fuel cell* dapat diklasifikasikan berdasarkan bahan elektrolitnya, yaitu: *alkaline fuel cell* (AFC), *phosphoric acid fuel cell* (PAFC), *molten carbonate fuel cell* (MCFC), *solid oxide fuel cell* (SOFC), *proton exchange membrane fuel cell* (PEMFC), *direct methanol fuel cell* (DMFC), *regenerative fuel cell* (RFC), dan *zinc-air fuel cell* (ZAFC). Di antara berbagai macam *fuel cell* tersebut, yang dipilih menjadi objek kajian dalam makalah ini adalah *proton exchange membrane* (PEM) *fuel cell*, yang telah banyak digunakan dalam berbagai aplikasi.

Hingga saat ini terdapat beberapa penelitian yang dihasilkan tentang pembuatan model dan sistem kontrol untuk sistem *fuel cell*, di antaranya [1-15]. Penurunan model analitis secara ekstensif yang mencakup dinamika seluruh perangkat pendukung sistem *fuel cell* telah diteliti pada [1]. Walaupun karakteristik operasi *fuel cell*-nya lengkap, model tersebut tidak cocok digunakan untuk aplikasi praktis karena banyaknya jumlah parameter operasi yang dapat mengakibatkan proses analisis menjadi rumit serta komputasi menjadi sangat kompleks.

Penelitian pada makalah [3] mengusulkan model *fuel cell* yang lebih praktis dengan menggabungkan penurunan model analitis dan verifikasi secara eksperimen. Model PEM *fuel cell* berorientasi kontrol yang menjelaskan fenomena kelaparan hidrogen atau oksigen (*oxygen/hydrogen starvation*) pada *stack* dipaparkan pada [2] dan [4]. Teknik identifikasi sistem dipaparkan di [5] untuk menurunkan hubungan linier *input-output* pada sistem *fuel cell* pada beberapa titik operasi. Model yang diperoleh kemudian digunakan untuk simulasi perancangan kontrol adaptif pada *fuel cell*.

Kontrol umpan balik dan model *predictive control* yang mengatur kecepatan suplai oksigen dari kompresor untuk menjaga rasio kelebihan oksigen (perbandingan antara oksigen yang bereaksi dan oksigen yang dipasok ke katode) pada nilai yang diinginkan dijelaskan pada [2] dan [6].

Pada penelitian [7] dijelaskan pentingnya memberikan masukan oksigen yang mencukupi pada *fuel cell* jenis *open cathode* untuk menjaga performa *fuel cell*, dan penelitian pada [8] dinyatakan bahwa tekanan parsial oksigen pada katode mempengaruhi usia pakai membran *fuel cell*. Meskipun telah banyak kemajuan yang dihasilkan sejauh ini, beberapa masalah pada perancangan kontrol *fuel cell* masih belum terpecahkan, salah satunya adalah pemilihan pasangan variabel proses/kontrol dan pemilihan algoritma kontrol.

Makalah ini memaparkan penentuan model dinamik suatu sistem PEM *fuel cell* komersial. Sistem *fuel cell* yang ditinjau merupakan jenis *self-humidified* dan *open cathode*, dimana empat *fan* yang disusun secara paralel berperan sebagai pemasok oksigen (suplai reaktan) dan udara pendingin (sistem pendingin). Rancangan *open cathode* membedakan sistem yang ditinjau dari jenis sistem *fuel cell* umumnya dimana suplai oksigen kebanyakan dialirkan secara khusus dari tabung oksigen. Meskipun menghasilkan sistem yang lebih modular dan ekonomis, rancangan *open cathode* juga mengakibatkan analisis menjadi lebih kompleks karena jumlah variabel yang dapat diukur dan digunakan untuk pemodelan dan pengontrolan menjadi terbatas.

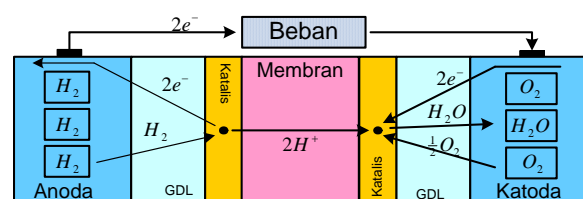
Kontribusi dari makalah ini adalah pengembangan prosedur sistematis untuk pemodelan sistem *fuel cell* jenis *open cathode* berdasarkan jumlah variabel pengukuran yang terbatas. Model yang diajukan diperoleh dengan menggabungkan metode analitis (berdasarkan reaksi elektrokimia dan dinamika *fuel cell*) dan metode identifikasi sistem *black box*. Model ini selanjutnya dapat digunakan untuk pengembangan sistem *fuel cell* lebih lanjut (perancangan sistem kontrol, optimasi, dll).

II. DESKRIPSI SISTEM

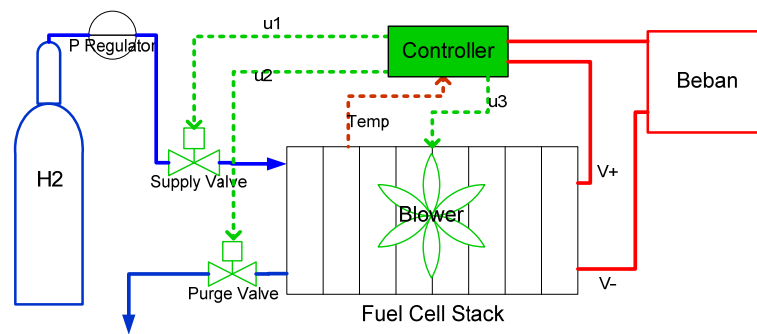
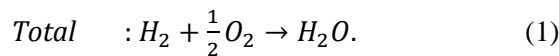
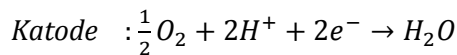
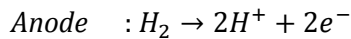
A. PEM Fuel Cell

Suatu perangkat *fuel cell* umumnya terdiri dari anode dan katode yang dipisahkan oleh elektrolit. Dalam PEM *fuel cell*, membran polimer berfasa padat digunakan sebagai elektrolit. Keunggulan PEM *fuel cell* dibandingkan *fuel cell* jenis lainnya antara lain mampu beroperasi pada temperatur yang relatif lebih rendah dengan respon *start-up* yang cepat, mudah dimanufaktur dan tidak mudah terkorosi.

Gambar 1 menunjukkan operasi perangkat PEM *fuel cell*. Bahan bakar hidrogen yang diumpankan pada sisi anode dan gas oksigen (atau udara yang mengandung oksigen) yang diumpankan pada sisi katode akan bereaksi secara elektrokimia di dalam sel dengan bantuan katalis. Reaksi elektrokimia dasar yang berlangsung secara simultan pada kedua sisi membran dapat dinyatakan sebagai berikut.



Gambar 1. Skema operasi *fuel cell*.

Gambar 2. Sistem *fuel cell* Horizon H-1000.

selama reaksi berlangsung, membran elektrolit berperan sebagai jalur konduktif yang melewati ion H^+ dari anode untuk bergabung dengan ion O^- di katode dan membentuk molekul air (H_2O). Akibat sifat alami dari membran yang tidak melewati elektron untuk melintas, maka elektron akan melintas melalui sirkuit elektrik eksternal yang kemudian dapat digunakan untuk menghasilkan arus listrik. *Fuel cell* akan menghasilkan arus listrik secara kontinyu selama pasokan hidrogen dan oksigen tersedia. Hasil sampingan dari reaksi di dalam sel adalah panas dan air.

B. PEM Fuel Cell Horizon H-1000

Sistem yang didiskusikan dalam makalah ini adalah *fuel cell* komersial model H-1000 buatan Horizon Fuel Cell Technologies. *Fuel cell* ini merupakan tipe *self-humidified* dan *open cathode*, menggunakan hidrogen sebagai bahan bakar dan udara sebagai sumber oksidan. Hidrogen dipasok dari tangki penyimpanan eksternal, sedangkan oksigen diperoleh dari udara bebas dengan bantuan putaran *fan*. Susunan *fuel cell* terdiri dari 72 sel yang dapat menghasilkan daya keluaran hingga 1 kW dengan tegangan nominal antara 39-69 volt. Gambar 2 menunjukkan sistem *fuel cell* terdiri dari modul susunan *fuel cell* dan modul pengontrol yang terhubung dengan konektor 8 kabel. Modul pengontrol berfungsi sebagai pengatur laju putaran *fan* (berdasarkan umpan balik pengukuran temperatur *stack* dan daya keluaran *fuel cell*) dan bukaan periodik *purging valve* dan *valve* pasokan hidrogen. Pengontrol juga dirancang untuk melakukan *shut-down* jika daya yang digunakan oleh beban melebihi daya keluaran maksimum *fuel cell* [19].

Proses pengukuran dan akuisisi data pada sistem PEM FC H-1000 dilakukan dengan

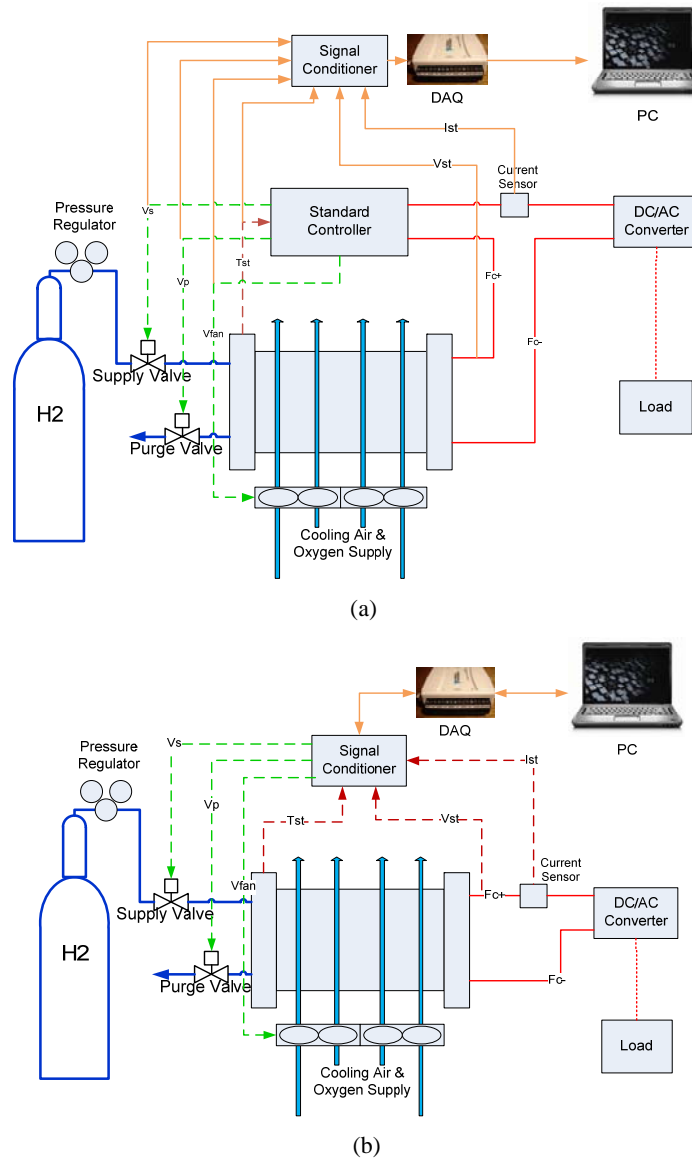
menggunakan modul akuisisi data NI DAQ USB 6008 serta aplikasi program LabView seperti ditunjukkan pada Gambar 3. Pengukuran dan akuisisi data dilakukan pada dua kondisi operasi PEM FC H-1000. Kondisi pertama adalah pengoperasian pada *loop* tertutup dimana PEM FC H-1000 dijalankan secara normal dengan menggunakan modul pengontrol asli buatan pabrik (Gambar 3(a)). Kondisi kedua adalah pengoperasian pada *loop* terbuka dimana modul pengontrol asli PEM FC H-1000 tidak digunakan dan sistem dijalankan secara manual dengan perintah langsung dari komputer (Gambar 3(b)).

Operasi pada *loop* terbuka bertujuan untuk menganalisis respon sistem terhadap perubahan input agar sistem dapat dimodelkan. Variabel proses yang diukur meliputi tegangan pada *valve* suplai hidrogen $V_{H_2, supply}$, tegangan pada *purging valve* hidrogen $V_{H_2, purge}$, tegangan suplai pada motor *fan* V_{fm} , tegangan keluaran *stack* V_{st} , dan arus *stack* I_{st} .

III. PEMODELAN DAN IDENTIFIKASI

Beberapa objek dan fokus pemodelan dan pengontrolan sistem *fuel cell* telah dilaporkan pada berbagai literatur yang antara lain mencakup pemodelan dan pengontrolan jumlah pasokan bahan bakar dan oksidan yang tepat ke dalam *stack*, temperatur *stack* optimal, atau tekanan operasi *stack* optimal. Secara khusus, pemodelan dan pengaturan jumlah reaktan yang disuplai dan bereaksi pada *stack* merupakan faktor penting karena berhubungan dengan efisiensi kerja dan keselamatan operasi *fuel cell*. Selain itu, kesalahan dalam pengaturan jumlah pasokan reaktan *fuel cell* dalam jangka panjang dapat mengakibatkan terjadinya fenomena *membrane starvation* (kelaparan membran) yang pada akhirnya akan merusak membran *fuel cell* [2,3,4].

Termotivasi oleh kondisi tersebut, maka teknik pemodelan yang diajukan pada makalah ini difokuskan pada model pasokan jumlah reaktan yang tepat pada *fuel cell* demi menjamin



Gambar 3. Pengaturan pengukuran; (a) Pengaturan pengukuran *loop* tertutup; (b) Pengaturan pengukuran *loop* terbuka.

efisiensi dan keselamatan operasi *fuel cell*. Akibat suplai hidrogen pada sistem yang ditinjau beroperasi dengan mode *dead-end*, maka pemodelan difokuskan pada sistem pasokan oksigen, yang disesuaikan dengan daya keluaran *fuel cell*.

A. Rasio Kelebihan Oksigen

Rasio kelebihan oksigen λ_{O_2} merupakan perbandingan antara jumlah oksigen yang dipasok ke katode dengan jumlah oksigen yang diperlukan pada reaksi di dalam PEMFC untuk membangkitkan energi listrik. Rasio kelebihan oksigen merupakan variabel terkumpul yang tidak dapat diukur langsung dan harus diestimasi melalui pengukuran lainnya. Estimasi λ_{O_2} dapat dilakukan berdasarkan data pengukuran laju aliran udara masuk katode, arus *stack*, tekanan masuk katode, kelembaban relatif udara masuk, dan temperatur masukan katode.

Rasio kelebihan oksigen merupakan salah satu variabel unjuk kerja yang penting pada *fuel cell* karena berhubungan dengan keselamatan membran pada *fuel cell*. Nilai rasio kelebihan oksigen yang terlalu rendah dapat memicu terjadinya fenomena kelaparan oksigen pada membran.

Berdasarkan [6], nilai rasio kelebihan oksigen yang aman adalah $\lambda_{O_2} > 4$. Rasio kelebihan oksigen didefinisikan pada [1] sebagai persamaan (2):

$$\lambda_{O_2} = \frac{W_{O_2,ca,in}}{W_{O_2,reaksi}} \quad (2)$$

dengan laju aliran massa oksigen $W_{O_2,ca,in}$ merupakan fungsi dari laju aliran massa udara kering $W_{a,ca,in}$ menuju katode dan fraksi massa oksigen $x_{O_2,ca,in}$ sebagai persamaan (3). Sedangkan fraksi massa oksigen $x_{O_2,ca,in}$ dinyatakan oleh persamaan (4)

$$W_{O_2,ca,in} = x_{O_2,ca,in} W_{a,ca,in} \quad (3)$$

$$x_{O_2,ca,in} = \frac{y_{O_2,ca,in} M_{O_2}}{y_{O_2,ca,in} M_{O_2} + (1 - y_{O_2,ca,in}) M_{N_2}} \quad (4)$$

dengan M_{N_2} dan M_{O_2} menyatakan massa molar dari oksigen dan nitrogen. Oksigen diasumsikan mempunyai fraksi mol $y_{O_2,ca,in} = 0,21$. Laju aliran massa udara kering pada masukan katode didefinisikan sebagai persamaan (5). dengan rasio kelembaban $\omega_{ca,in}$ dinyatakan oleh persamaan (6)

$$W_{a,ca,in} = \frac{W_{ca,in}}{1 + \omega_{ca,in}}, \quad (5)$$

$$\omega_{ca,in} = \frac{M_v}{M_{a,ca,in}} \frac{p_{v,ca,in}}{p_{a,ca,in}} \quad (6)$$

dengan M_v adalah massa molar uap air. Massa molar dari udara pada masukan katode ditentukan dengan persamaan (7):

$$M_{a,ca,in} = y_{O_2,ca,in} M_{O_2} + (1 - y_{O_2,ca,in}) M_{N_2} \quad (7)$$

tekanan uap air $p_{v,ca,in}$ dan tekanan udara kering $p_{a,ca,in}$ yang digunakan pada perhitungan rasio kelembaban $\omega_{ca,in}$ dinyatakan sebagai berikut:

$$p_{v,ca,in} = \phi_{ca,in} P_{sat}(T_{ca,in}) \quad (8)$$

$$p_{a,ca,in} = p_{ca,in} - p_{v,ca,in} \quad (9)$$

dengan $\phi_{ca,in}$ menyatakan kelembaban relatif pada masukan katode dan $p_{ca,in}$ menyatakan tekanan saturasi uap air pada temperatur dan tekanan tertentu. Laju konsumsi oksigen proporsional dengan arus yang dibangkitkan,

$$W_{O_2,reaksi} = M_{O_2} \frac{n I_{st}}{4F}, \quad (10)$$

dengan $n = 72$ menyatakan jumlah sel pada *stack* dan $F = 96485$ adalah konstanta Faraday.

Akibat bentuk susunan *fuel cell* yang digunakan tidak memungkinkan dilakukannya pengukuran tekanan masukan katode $p_{ca,in}$

secara langsung, maka $p_{ca,in}$ ditentukan dengan model matematis [3]. Tekanan masukan katode terdiri atas beberapa persamaan diferensial yang membutuhkan komputasi kompleks. Untuk memperoleh model yang lebih sederhana, maka model $p_{ca,in}$ pada [3] digunakan pada penelitian ini. Model tersebut secara eksplisit menyatakan bahwa tekanan udara masukan pada katode berhubungan langsung dengan laju aliran udara $W_{ca,in}$ pada masukan katode dan reaksi di dalam susunan *fuel cell*. Dengan demikian hubungan antara tekanan udara masukan katode $p_{ca,in}$ dan arus *stack* I_{st} dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$p_{ca,in} = 1,0033 + 2,1 \times 10^{-4} W_{ca,in} - 475,7 \times 10^{-6} I_{st} \quad (11)$$

B. Pemetaan Fungsi Fan

Laju aliran udara $W_{ca,in}$ pada masukan katode dapat ditentukan berdasarkan suplai udara kering dari *fan*. Akibat data pengukuran tegangan *fan* V_{fm} tidak dapat langsung digunakan pada perhitungan rasio kelebihan oksigen, maka hubungan antara tegangan *fan* V_{fm} dengan laju aliran masa udara $W_{ca,in}$ dilakukan dengan pemetaan.

Fan yang terpasang pada sistem *fuel cell* Horizon H-1000 berfungsi sebagai pendingin dan sekaligus sebagai pemasok oksigen untuk kebutuhan reaksi *fuel cell*. Untuk memetakan fungsi tegangan masukan *fan* terhadap laju aliran massa udara, maka dilakukan variasi tegangan masukan pada *fan* (0-12 V). Pada setiap kenaikan tegangan masukan *fan*, kecepatan udara yang melewati *fan* diukur dengan menggunakan anemometer. Hasil pengukuran ditampilkan pada Tabel 1. Luas penampang total *fan* ditentukan berdasarkan data pengukuran diameter nominal pada masing-masing *fan* (Gambar 4) sebagai berikut:

$$R = D/2 \quad (12)$$

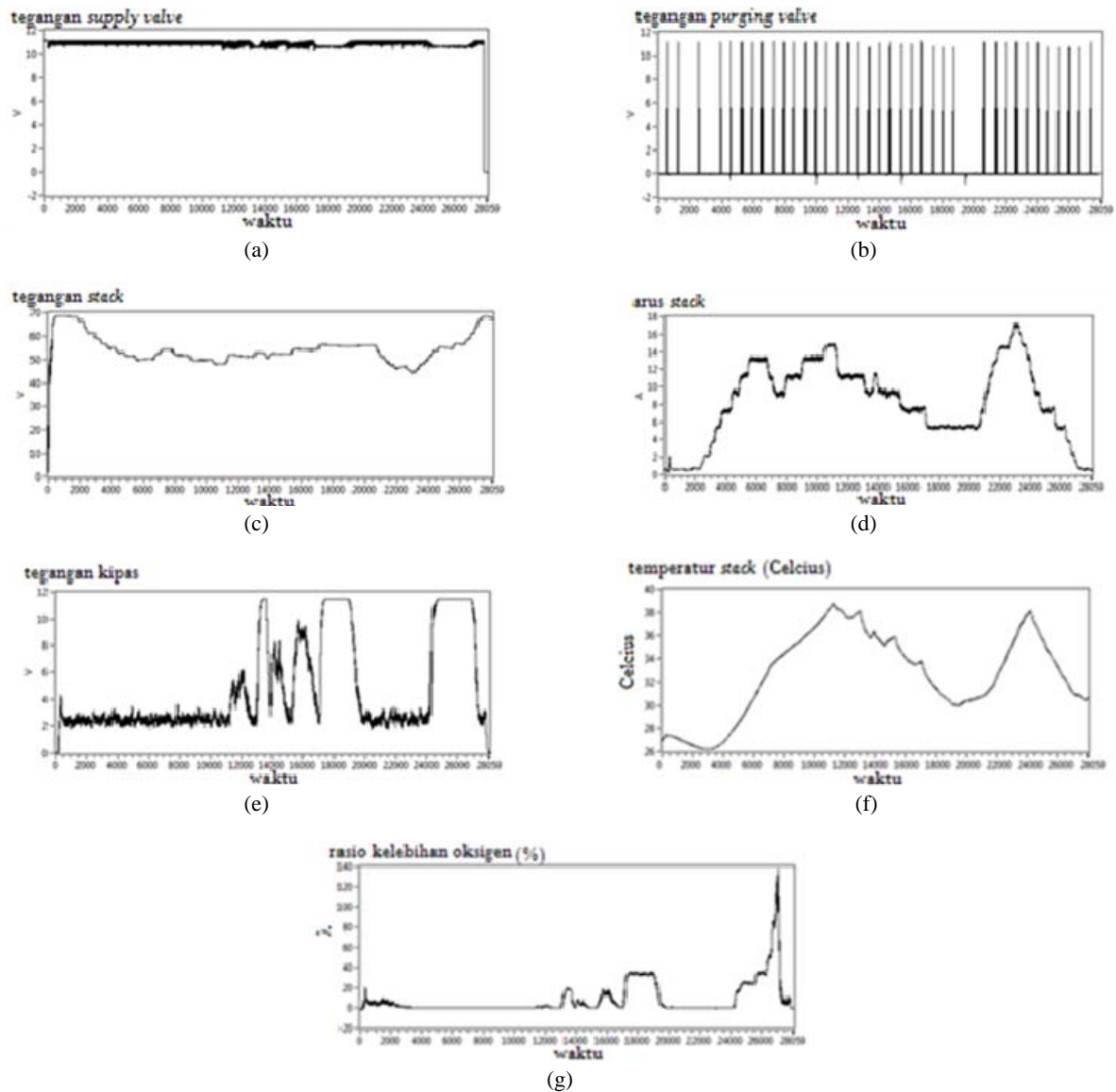
Tabel 1

Tegangan *input* dan kecepatan udara *fan*.

Tegangan masukan (V)	Kecepatan udara (m/s)
0	0
1	0
2	0
3	0,6
4	1
5	1,4
6	1,9
7	2,3
8	2,8
9	3,2
10	3,7
11	4,1



Gambar 4. *Fan* untuk pendinginan sekaligus pasokan oksigen.



Gambar 5. Grafik kerja *fuel cell*; (a) Tegangan listrik pada *supply valve*; (b) Tegangan listrik pada *purging valve*; (c) Tegangan listrik pada *stack*; (d) Arus listrik pada *stack*; (e) Tegangan listrik pada kipas; (f) Temperatur *stack*; (g) Rasio kelebihan oksigen.

$$A = \pi R^2 - \pi r^2 \quad (13)$$

berdasarkan nilai luas penampang total pada *fan* serta kecepatan udara yang melewati penampang tersebut, laju volumetrik dari udara pada *fan* dapat ditentukan seperti persamaan (14):

$$\dot{V} = vA \quad (14)$$

dengan menggunakan asumsi nilai massa jenis udara = 1,19 gram/liter pada temperatur 25°C dan tekanan 1 atm, maka laju aliran massa udara yang dipergunakan untuk perhitungan rasio kelebihan oksigen adalah

$$W_{a,ca,in} = \rho \dot{V} \quad (15)$$

berdasarkan data hasil pengukuran dan perhitungan, hubungan antara tegangan masukan motor *fan* terhadap kecepatan aliran massa udara

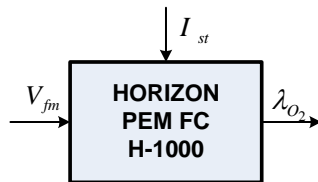
(gram/detik) yang melalui *fan* diperoleh sebagai fungsi polinomial orde 3 sebagai berikut.

$$W_{ca,in}(v) = -0,0966v^3 + 1,965v^2 + 0,77v - 2,21 \quad (16)$$

C. Operasi Kontrol dari Horizon

Unit kontrol Horizon digunakan untuk memberikan gambaran kerja normal *fuel cell*. Pada awal sebelum beroperasi, tekanan hidrogen harus dibuat diantara 7-9 PSI untuk menjamin ketersediaan hidrogen dalam *stack*. Jika hidrogen tidak mencukupi untuk menghasilkan daya yang dibutuhkan, maka pengontrol secara otomatis melakukan *shut-down* pada sistem *fuel cell*.

Modul pengontrol juga memungkinkan dilakukannya arus singkat pada *stack* sesaat untuk mengembalikan performa *fuel cell* ketika



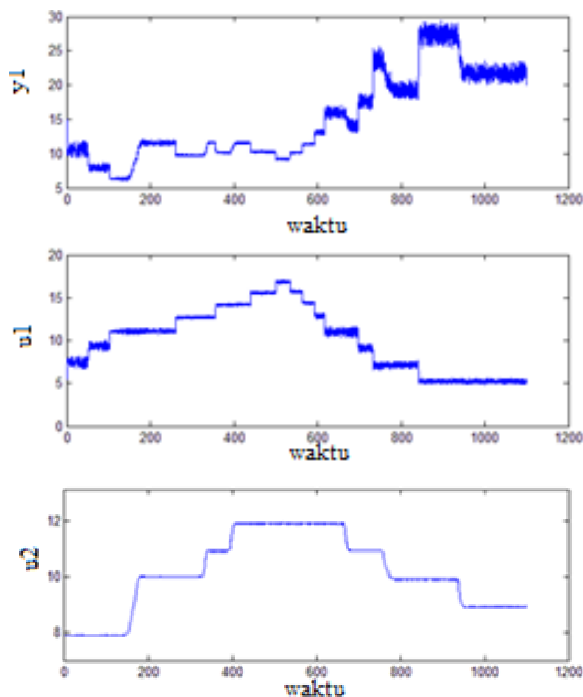
Gambar 6. Diagram blok identifikasi sistem PEM FC H-1000.

terjadi *drop* tegangan (hingga nol) pada *stack* atau apabila terjadi kejenuhan di dalam *stack*. Gambar 5(a)–(g) menampilkan grafik kerja *fuel cell* dalam kondisi normal menggunakan modul pengontrol dari Horizon.

D. Identifikasi Sistem

Data untuk proses identifikasi dikumpulkan berdasarkan skema operasi *loop* terbuka. Ada tiga variabel proses utama yang digunakan pada proses identifikasi yaitu tegangan masukan pada *fan* V_{fm} , arus *stack* I_{st} , dan rasio kelebihan oksigen λ_{O_2} . Proses identifikasi dilakukan dengan menganggap sistem PEM FC H-1000 sebagai *black box* dengan dua masukan (V_{fm} dan I_{st}) dan satu keluaran (λ_{O_2}), seperti ditunjukkan pada Gambar 6 [3,7].

Sinyal hasil pengukuran kemudian dibagi menjadi dua, masing-masing untuk proses estimasi dan validasi. Data untuk estimasi ditampilkan pada Gambar 7 dan untuk validasi pada Gambar 8. Proses identifikasi kemudian dilakukan dengan menggunakan *System Identification Toolbox* di MATLAB [16].



Gambar 7. Data untuk estimasi model, output: y_1 =rasio kelebihan oksigen, input : u_1 =arus *stack*, u_2 =tegangan *fan*.

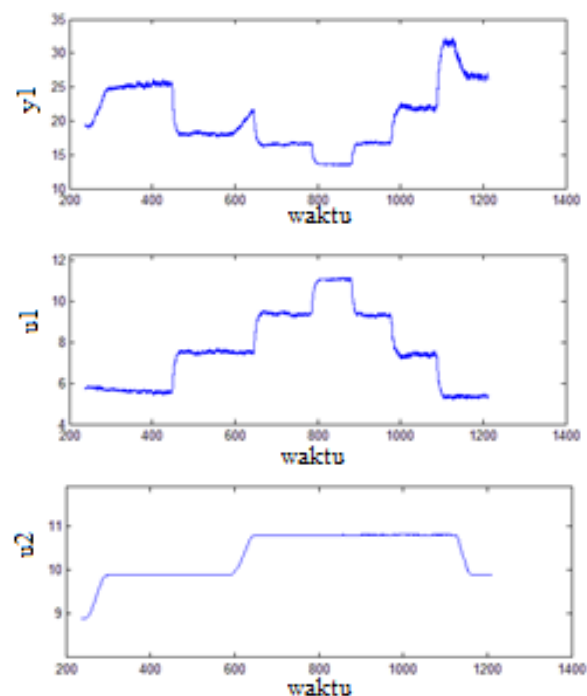
Tabel 2

Validasi model dengan beberapa kriteria.

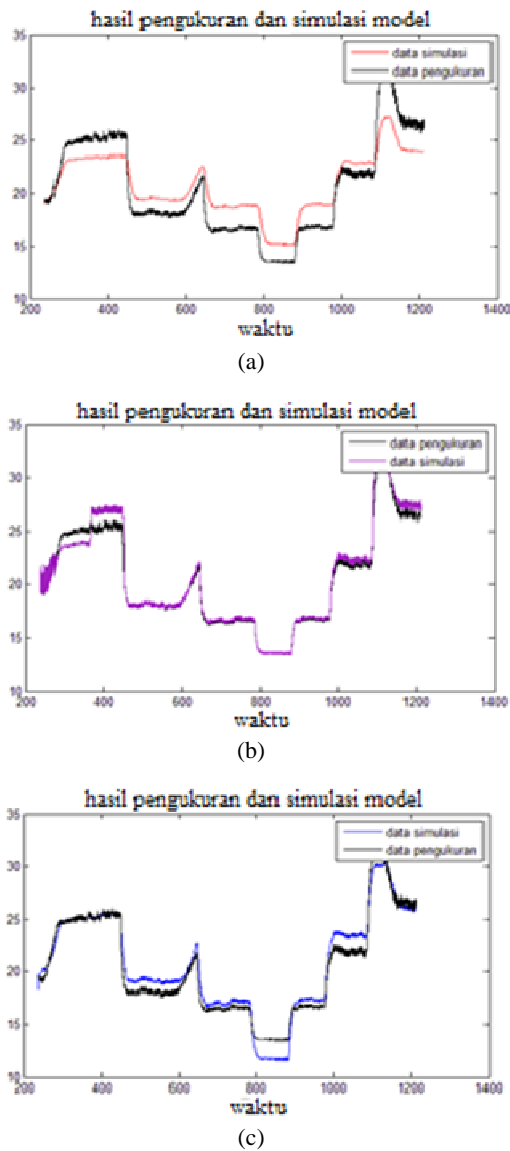
Model	Kriteria		
	<i>Best fit</i>	<i>Loss function</i>	<i>FPE</i>
ARX orde 4	56,26 %	0,0159	0,0159
ARX non linier orde 2	84, 95 %	0,0139	-
Linierisasi ARX non linier orde 2	78, 18%	0,0009	0,0159

Oleh karenanya, identifikasi model parametrik dengan estimator non linier diharapkan mampu memberikan hasil yang lebih baik. Estimator non linier yang digunakan pada penelitian ini adalah estimator non linier *wavenet* 75 unit, dan model yang diperoleh adalah model parametrik ARX non linier orde 2 dengan *regressor* standar [$y_1(t-1)$; $y_1(t-2)$; $u_1(t-1)$; $u_1(t-2)$; $u_2(t-1)$; $u_2(t-2)$]. Hasil simulasi identifikasi dengan model non linier pada Gambar 9 (b) menunjukkan bahwa model nonlinier yang diperoleh dapat mewakili karakteristik sistem, tetapi membutuhkan komputasi yang rumit dan kurang efisien ketika digunakan pada aplikasi praktis. Untuk mendapatkan model yang dapat digunakan untuk aplikasi praktis, maka dilakukan linierisasi pada model non linier yang diperoleh.

Linierisasi model hasil identifikasi dapat dilakukan dengan menggunakan fungsi linierisasi *linapp* pada *System Identification Toolbox* MATLAB. Fungsi *linapp* pada dasarnya meminimalkan *mean square error* pada batasan data tertentu. Dengan menggunakan data validasi sebagai batasan, proses linierisasi menghasilkan



Gambar 8. Data untuk validasi hasil estimasi model.



Gambar 9. Hasil pengukuran dan simulasi; (a) Model ARX; (b) Model ARX non linier; (c) Model ARX linier hasil linierisasi.

model ARX linier orde dua pada (18). Perbandingan hasil pengukuran dan simulasi model ditampilkan pada Gambar 9 (c).

Estimator non linier yang digunakan pada penelitian ini adalah estimator non linier *wavenet* 75 unit, dan model yang diperoleh adalah model parametrik ARX non linier orde 2 dengan *regressor* standar [$y_1(t-1)$; $y_1(t-2)$; $u_1(t-1)$; $u_1(t-2)$; $u_2(t-1)$; $u_2(t-2)$]. Hasil simulasi identifikasi dengan model non linier pada Gambar 9 (b) menunjukkan bahwa model nonlinier yang diperoleh dapat mewakili karakteristik sistem. Akan tetapi, model non linier membutuhkan komputasi yang rumit dan kurang efisien ketika digunakan pada aplikasi praktis.

Untuk mendapatkan model yang dapat digunakan untuk aplikasi praktis, maka dilakukan linierisasi pada model non linier yang diperoleh. Linierisasi model hasil identifikasi dapat

dilakukan dengan menggunakan fungsi linierisasi *linapp* pada *System Identification Toolbox* MATLAB.

Fungsi *linapp* pada dasarnya meminimalkan *mean square error* pada batasan data tertentu. Dengan menggunakan data validasi sebagai batasan, proses linierisasi menghasilkan model ARX linier orde dua pada (18). Perbandingan hasil pengukuran dan simulasi model ditampilkan pada Gambar 9.

$$y(t) - 0,9981y(t-1) = 0,003888u_1(t-4) + 2,405u_2(t) - 1,531u_2(t-1) - 0,7859u_2(t-2) - 0,0809u_2(t-3) \quad (17)$$

$$y(t) - 1,337y(t-1) + 0,399y(t-2) = -1,123u_1(t-1) + 1,118u_1(t-2) - 4,127u_2(t-1) + 4,134u_2(t-2) \quad (18)$$

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

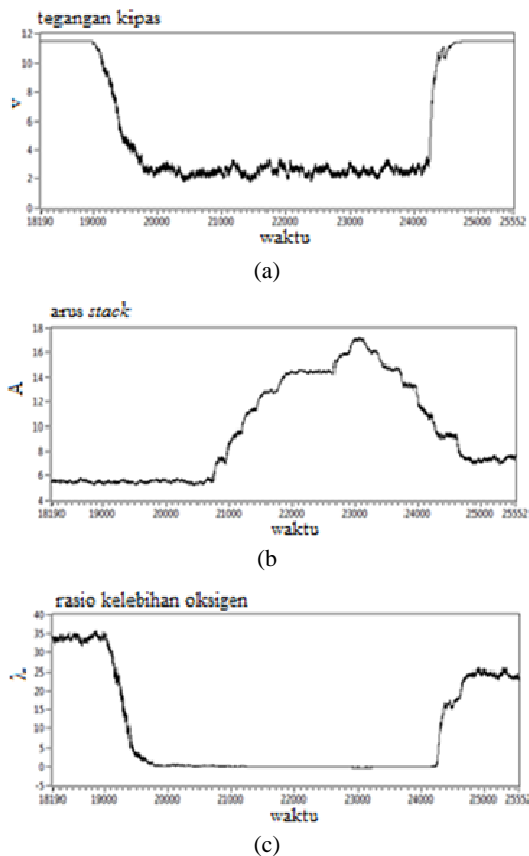
A. Validasi model dengan kriteria

Model yang didapat dari operasi *loop* terbuka divalidasi dengan menggunakan kriteria *best fit*, *loss function*, dan FPE. % *best fit* menunjukkan derajat kesesuaian antara respon model dengan keluaran terukur. *Loss function* memberikan nilai determinan dari matriks *covariance* kesalahan. Semakin kecil *loss function* berarti model yang diperoleh semakin baik. FPE merupakan indikator identifikasi sistem yang dihitung dari *loss function*, banyak parameter dan banyak data yang digunakan.

Berdasarkan hasil validasi model yang diperoleh, dapat diamati bahwa model ARX non linier menghasilkan nilai *best fit* yang paling baik, namun untuk tujuan kontrol, model hasil linierisasi dengan nilai *best fit* 78,18% sudah cukup baik untuk digunakan dengan catatan kisaran kerja kontrol berada di sekitar data validasi yaitu nilai rasio kelebihan oksigen $\lambda_{O_2} = 15 - 30$.

B. Rasio kelebihan oksigen

Perhitungan nilai rasio kelebihan oksigen pada kondisi operasi normal menggunakan pengontrol standar ditunjukkan pada Gambar 10. Dapat diamati pada gambar tersebut bahwa terdapat rentang waktu dimana nilai rasio kelebihan oksigen $\lambda_{O_2} > 4$ yang merupakan nilai kritis. Hal ini dapat mengakibatkan fenomena kelaparan oksigen yang akan berdampak pada kerusakan permanen membran *fuel cell*, dan mengurangi umur pakai *fuel cell*. Berdasarkan Gambar 5(e)-(g) dapat diamati bahwa pengontrol standar hanya bekerja berdasarkan temperatur



Gambar 10. Rasio kelebihan oksigen pada operasi normal dengan pengontrol standar; (a) Tegangan kipas; (b) Arus *stack*; (c) Rasio kelebihan oksigen.

stack dan tidak memperhitungkan rasio kelebihan oksigen dalam operasinya. *Fan* hanya akan bekerja apabila temperatur meningkat. Dengan demikian, perancangan pengontrol yang baru pada sistem *fuel cell* dapat dilakukan untuk mengatur rasio kelebihan oksigen demi mencegah kerusakan membran *stack* dan memperpanjang umur pakai *stack*.

V. PENUTUP

A. Kesimpulan

Pada makalah ini telah disampaikan metode sistematis perancangan platform *loop* terbuka sistem PEM *fuel cell* Horizon H-1000 yang dapat dikembangkan untuk penelitian selanjutnya. Hasil percobaan dan analisis menunjukkan bahwa nilai rasio kelebihan oksigen sangat dipengaruhi oleh tekanan parsial oksigen pada katode. Berdasarkan beberapa percobaan identifikasi, didapatkan beberapa model-model polinomial.

- Model ARX linier orde 4 dengan nilai *best fit* 56,26% (*loss function* = 0,0159, FPE = 0,0159),
- Model ARX non linier orde 2 dengan estimator *wavenet* 75 unit dengan nilai *best fit* 84,95% (*loss function* = 0,0139).

- Model hasil linierisasi ARX non linier orde 2 dengan nilai *best fit* = 78,18% (*loss function* = 0,0009, FPE = 0,0009).

B. Penelitian Selanjutnya

Penelitian selanjutnya dapat dilakukan dengan penambahan instrumen pengukuran (misalnya *hydrogen mass flow meter*) agar model yang diperoleh lebih akurat. Di samping itu, penelitian dapat dilanjutkan untuk merancang sistem kontrol rasio kelebihan oksigen berdasarkan model yang diperoleh.

REFERENSI

- [1] J. T. Pukrushpan, *Modeling and Control of Fuel Cell Systems and Fuel Processors*, Ph. D. Thesis, The University of Michigan, Ann Arbor, Michigan, 2003.
- [2] J. Pukrushpan, A. G. Stefanopoulou, and H. Peng, "Control of fuel cell breathing," *IEEE Contr. Syst. Mag.*, vol. 24, no. 2, pp. 30-46, 2004.
- [3] J. del Real, A. Arce, and C. Bordons, "Development and experimental validation of a PEM fuel cell dynamic model," *J. Power Sources*, vol. 173, no. 1, pp. 310-324, 2007.
- [4] J. Pukrushpan, A. G. Stefanopoulou, S. Varigonda, J. Eborn, and C. Haugstetter, "Control-oriented model of fuel processor for hydrogen generation," *Control Eng. Pract.*, vol. 14, no. 3, 2006, pp. 277-293.
- [5] Y.-P. Yang, F.-C. Wang, H.-P. Chang, Y.-W. Ma, and B.-J. Weng, "Low power proton exchange membrane fuel cell system identification and adaptive control," *J. Power Sources*, vol. 164, no. 2, pp. 761-771, 2007.
- [6] J. K. Gruber, M. Doll, and C. Bordons, "Design and experimental validation of a constrained MPC for the air feed of a fuel cell," *Control Eng. Pract.*, vol. 17, no. 8, 2009, pp. 874-885.
- [7] D.T. Santa Rosa, D.G. Pinto, V.S. Silva, R.A. Silva, and C.M. Rangel, "High performance PEMFC stack with open-cathode at ambient pressure and temperature conditions," *Int. J. Hydrogen Energ.*, vol. 32, pp. 4350-4357, 2007.
- [8] H. Liu, F. D. Coms, J. Zhang, H. A. Gasteiger, and A. B. LaConti, "Chemical Degradation: Correlation Between Electrolyzer and Fuel Cell Findings;" *Polymer Electrolyte Fuel Cell Durability*, Springer Science, 2009.
- [9] F. Gasser, *An Analytical, Control-Oriented State Space Model For A PEM Fuel Cell*

- System*, Master Thesis, École Polytechnique Fédérale De Lausanne, 2006.
- [10] F. Barbir, *PEM Fuel Cells Theory and Practice*, Elsevier Academic Press, 2005.
- [11] R. O'Hayre, S. W. Cha, W. Colella, and F. B. Prinz, *Fuel Cell Fundamental*, Wiley, 2009.
- [12] L. Ljung, *System Identification Toolbox User's Guide*, Mathworks, 2010.
- [13] A. Su, "Experimental Investigation Of The Performance Of A Single Proton Exchange Membrane Fuel Cell Using Dry Fuel," *Exp. Heat Transfer*, vol. 16, 2003, pp.97-109.
- [14] J. M. Hoy, *Convection-Type PEM Fuel Cell Control System Performance Testing and Modeling*, Master Thesis, West Virginia University, West Virginia, 2008.
- [15] Y. Tang, W. Yuan, M. Pan, J. Li, G. Chen, and Y. Li, "Experimental investigation of dynamic performance and transient responses of a kW-class PEM fuel cell stack under various load changes," *Appl. Energ.*, vol. 87, pp. 1410-1417, 2010.
- [16] L. Ljung, *System Identification: Theory for the User*, Prentice Hall, New Jersey, 1999.
- [17] R. Johansson, *System Modeling and Identification*, Prentice Hall International Ed., New Jersey, 1993.
- [18] J. Larminie and A. Dicks, *Fuel Cell System Explained: Second Ed.*, J. Wiley & Sons, West Sussex, UK, 2003.
- [19] Horizon Fuel Cell Technologies, *H-1000 Fuel Cell Stack: User Manual v. 1.3*, 2009