

SISTEM IDENTIFIKASI MODEL DINAMIK PROTON EXCHANGE MEMBRANE FUEL CELL (PEMFC) DALAM STRUKTUR BLOK WIENER

Dharma Aryani¹⁾, Muhammad Thahir¹⁾

¹⁾ Dosen Jurusan Teknik Elektro Politeknik Negeri Ujung Pandang, Makassar

ABSTRACT

This paper deals with dynamics characterization of Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) in Wiener structure. Linier and nonlinear dynamics are estimated in parametric and non-parametric function. Frequency Sampling Filter (FSF) function and discrete ARX are used to estimate the linier dynamic and a polynomial function for the nonlinear dynamic. Nonlinearity of PEM Fuel Cell is compensated in an inverse static nonlinearity model. This approach will eliminate the effect of nonlinearity when the real application of energy generation is integrated with PEM fuel cell.

Keywords: PEM fuel cell, Wiener block, nonlinear compensation

1. PENDAHULUAN

Dari sekian banyak alternatif energi, fuel cell menjadi salah satu solusi terbaik sebagai pembangkit listrik alternatif. Pada fuel cell konversi energi terjadi dengan adanya reaksi elektrokimia dari bahan bakar (hidrogen) dan oksidan (oksigen) yang akan mengubah energi kimia menjadi energi listrik. Tegangan keluaran yang dihasilkan oleh Fuel cell juga dipengaruhi oleh adanya rugi-rugi dari proses yang terjadi, baik dari proses kimia maupun mekanis. Polymer electrolyte membrane (PEM) fuel cell adalah jenis fuel cell yang paling umum digunakan dan menggunakan hidrogen sebagai bahan bakar.

Karakteristik dari sistem fuel cell adalah tegangan yang dihasilkan akan semakin menurun jika terjadi penambahan beban. Sehingga dibutuhkan penambahan pengendali agar PEMFC dapat menghasilkan tegangan ideal. Namun, penerapan sistem pengendali pada PEMFC membutuhkan model proses yang secara akurat merepresentasikan dinamika sesungguhnya dari sebuah sistem nyata. Model pada umumnya diperoleh melalui dua metode yaitu dengan pemodelan fisik dan identifikasi suatu sistem. Pemodelan fisik digunakan untuk mendapatkan model dengan menggunakan prinsip dasar persamaan differensial dan melakukan linierisasi pada suatu titik operasi. Sedangkan, identifikasi sistem adalah metode yang digunakan untuk mendapatkan model berdasarkan kumpulan data masukan dan keluaran dengan terlebih dahulu menetapkan struktur model sebelum parameter model ditentukan.

Sistem dinamik PEMFC memiliki karakteristik dinamik yang nonlinear pada operating range tertentu. Untuk mengatasi hal tersebut, umumnya dilakukan linierisasi terhadap model nonlinier. Namun, linierisasi memiliki keterbatasan karena hanya dapat memprediksi perilaku lokal sistem nonlinier di sekitar titik operasi tertentu. Sehingga, dinamika sistem nonlinier jauh lebih lengkap daripada dinamika sistem linier karena pat fenomena nonlinier yang tidak dapat diprediksi oleh model linier.

Pada penelitian ini akan dilakukan penurunan model dinamik sistem PEMFC melalui sistem identifikasi dalam struktur Wiener blok. Struktur ini memformulasikan sebuah sistem dinamik dalam dua elemen yaitu fungsi linier dan nonlinier. Untuk mengatasi masalah karakteristik nonlinearitas, formulasi model nonlinear dibuat sebagai fungsi inverse nonlinearity. Hal ini akan menjadi solusi dan acuan pada tahap penelitian selanjutnya untuk aplikasi sistem kendali karena nonlinearitas sistem PEMFC dapat dikompensasi melalui model inverse.

Fuel cell adalah salah satu sumber energy 'green' atau ramah lingkungan serta berkualitas tinggi. Keunggulan dari Fuel cell adalah bobotnya yang ringan, ukurannya yang ringkas, perawatan rendah, efisiensi tinggi dan kehandalan. Ini berfungsi sebagai sumber energi potensial untuk pembangkit tenaga listrik untuk *standalone* dan juga untuk aplikasi *grid-connected* [Wang, C., Nehrir, M.H. and Shaw, S.R., 2005]. Dibandingkan dengan jenis sel bahan bakar lainnya, PEMFC menunjukkan hasil yang menjanjikan dengan kelebihan seperti suhu rendah, kepadatan daya tinggi, respon cepat, dan emisi nol jika dijalankan dengan hidrogen murni, dan sangat sesuai untuk digunakan pada catu daya portabel, dan pembangkit listrik perumahan dan terdistribusi [Spiegel, C., 2011].

Tiap unit sistem fuel cell terdiri atas 4 komponen utama, yaitu **Anoda** (fuel electrode, **Katoda** (oxygen electrode, **Elektrolit** sebagai penghantar yang mengalirkan ion yang berasal dari bahan bakar di

¹ Korespondensi penulis: Dharma Ayani, Telp 08884888000 dharma.aryani@poliupg.ac.id

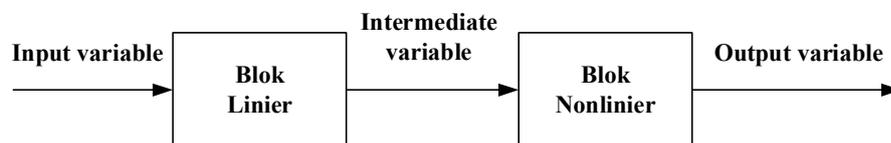
anoda menuju katoda, dan **Katalis** yaitu material atau bahan khusus untuk mempercepat reaksi kimiawi atau reduksi-oksidasi [Larminie, J., Dicks, A. and McDonald, M.S., 2003]. Tekanan parsial dari hidrogen, oksigen dan air pada sisi katoda didefinisikan sebagai variabel keadaan (state variable) sistem. Pada hukum gas ideal dinyatakan bahwa tekanan parsial setiap gas adalah proporsional terhadap banyaknya gas dalam cell, yang mana dari ketiga kontribusi tersebut relevan dan tergantung dari flow rate masukan, konsumsi gas dan flow rate keluaran gas [Yusivar, F, et al. 2009].

Studi terdahulu tentang estimasi model dinamik fuel cell telah ditemukan di beberapa literatur. [Amphlett, J. C., et al. 1995; Cownden, R., Nahon, M. and Rosen, M. A. 2001.; Rowe, A. and Li, X., 2001.; Maggio, G., Recupero, V. and Pino, L., 2001] meneliti tentang model steady-state fuel cell berdasarkan persamaan empiris dan reaksi elektromekanis dalam fuel cell. Saat ini telah berkembang studi tentang model dinamik fuel cell dengan penekanan pada karakteristik elektrisnya, seperti yang dilakukan oleh [Amphlett, J. C., et al. 1996; Hamelin, J., et al. 2001; Wang, M. and Nehrir, M. H., 2001]. Selanjutnya, pada [Wang, C., Nehrir, M.H. and Shaw, S.R., 2005], model dinamik fuel cell dipresentasikan dalam bentuk rangkaian listrik. Sistem identifikasi karakteristik nonlinier semakin banyak diterapkan untuk menghasilkan model yang mampu merepresentasikan perilaku sistem yang sesungguhnya dan untuk meningkatkan kinerja pengendalian sebuah proses dinamik. Struktur model nonlinear yang paling populer adalah model nonlinear state space [Paduart, 2008; Schon et al., 2011], model NARX dan NARMAX [Leontaritis & Billings, 1985; Chen & Billings, 1989], serta block-oriented model.

Namun, untuk memodelkan sistem dengan keterbatasan pengetahuan dan informasi dasar (*first-principle*), maka estimasi model dinamik dapat diidentifikasi dengan metode '*black-box*'. Metode ini memanfaatkan variabel input dan output dari sebuah sistem untuk diolah dengan menggunakan fungsi estimasi parameter model.

2. METODE PENELITIAN

Blok Wiener adalah salah satu struktur *block-oriented* model yang digunakan untuk pemodelan sistem dinamik. Model ini terdiri dari komponen linear dinamis dan nonlinier statis sehingga cukup mudah dipahami dan mudah digunakan.



Gambar 1. Block-oriented model dalam struktur Wiener

Struktur model kombinasi linier dan nonlinier telah banyak diaplikasikan pada beberapa *plant* yang berbeda, seperti yang telah dilakukan oleh [Hellerstein, J. L., Diao, Y., Parekh, S. and Tilbury, D. M., 2004.]; Patikirikoral, T., Colman, A., Han, J. and Wang, L., 2011; Aryani, D., Wang, L. and Patikirikoral, T., 2016.]. Untuk sistem identifikasi PEM Fuel Cell, estimasi model dilakukan dengan metode *one step estimation*, yaitu karakterisasi model linier dan nonlinier dalam satu langkah identifikasi. Pada model linier, sinyal input adalah u dan output y , yang dinyatakan dalam fungsi $x=f(u)$. Sedangkan elemen nonlinier diestimasi dalam fungsi *inverse nonlinearity*, dengan sinyal y yang berfungsi sebagai input dan output x yang dirumuskan dalam fungsi $x=f(y)$. Untuk melakukan identifikasi secara serentak untuk model pada kedua blok tersebut, titik output pada proses identifikasi adalah x (*intermediate variable*). Keuntungan dari pemodelan blok nonlinier dalam fungsi *inverse* adalah dapat digunakan sebagai kompensasi nonlinieritas PEM Fuel Cell pada saat perancangan sistem kendali.

Pada makalah ini, model linier dibuat dalam persamaan *non-parametric* yaitu fungsi Frequency Sampling Filter (FSF), dan dalam bentuk *parametric* melalui fungsi Auto-Regressive eXogenous (ARX). Selanjutnya, model nonlinier inverse dinyatakan dalam fungsi *polynomial*. FSF model adalah fungsi dalam frequency domain yang merupakan transformasi dari model Finite Impulse Response (FIR). FSF model merepresentasikan sebuah sistem dengan jumlah parameter model yang lebih sedikit dibandingkan dengan FIR dengan estimasi yang lebih akurat dalam hal pengurangan pengaruh *noise*. Fungsi alih model FSF dalam orde filter M adalah:

$$G(z) = \sum_{l=-\frac{m-1}{2}}^{\frac{m-1}{2}} G(e^{j\frac{2\pi l}{M}}) \frac{1}{M} \frac{1-z^{-M}}{1-e^{j\frac{2\pi l}{M}}z^{-1}} \tag{1}$$

Pada pemodelan fungsi parametrik, sistem dinamik linier diestimasi dalam fungsi ARX untuk model multi input dengan struktur model berikut:

$$y(t) + A_1y(t - 1) \dots + A_{na}y(t - na) = B_0u(t) + B_1u(t - 1) + \dots + B_{nb}u(t - nb) \tag{2}$$

Model nonlinier diformulasikan dalam fungsi polynomial berikut ini:

$$f(x) = a_nx^n + a_{n-1}x^{n-1} + a_{n-2}x^{n-2} + \dots + a_1x + a_0 \tag{3}$$

Prosedur sistem identifikasi dilakukan dengan metode *orthogonal decomposition* untuk menurunkan model linier dan nonlinier dengan satu langkah estimasi. Untuk validasi hasil estimasi, evaluasi terhadap keakuratan model dilakukan berdasarkan perhitungan nilai *Mean Squared Error (MSE)* yang menghitung rata-rata nilai kuadrat error atau deviasi estimasi terhadap nilai sebenarnya. Analisa keakuratan model juga dievaluasi berdasarkan nilai *R-squared (R²)* yang merupakan koefisien determinasi untuk menunjukkan tingkat kesesuaian model prediksi.

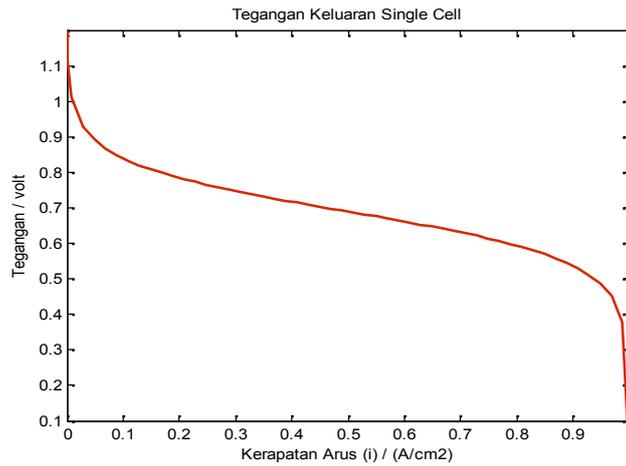
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada sistem PEM Fuel Cell, input variabel adalah *flow H2*, *flow O2*, dan kerapatan arus (*i*), sedangkan input variabel adalah tegangan keluaran sistem yang telah dilewatkan pada beban. Dari persamaan perubahan tekanan parsial gas-gas yang digunakan, dapat dituliskan persamaan variabel keadaan dan keluaran model nonlinier sistem dinamik fuel cell PEM, yang dinyatakan dalam persamaan (4) dan persamaan (5).

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{RT}{V_A} \left(1 - \frac{x_1}{P_{op}}\right) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u_1 + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{RT}{V_C} \left(1 - \frac{x_2}{P_{op}}\right) \\ -\frac{RT}{V_C P_{op}} x_3 \end{bmatrix} u_2 + \begin{bmatrix} \frac{RT}{V_A} \left(-2K_r A_c \left(1 - \frac{x_1}{P_{op}}\right)\right) \\ \frac{RT}{V_C} \left(-K_r A_c \left(1 - \frac{x_2}{P_{op}}\right)\right) \\ \frac{RT}{V_C} \left(2K_r A_c \left(1 - \frac{x_3}{P_{op}}\right)\right) \end{bmatrix} u_3 \tag{4}$$

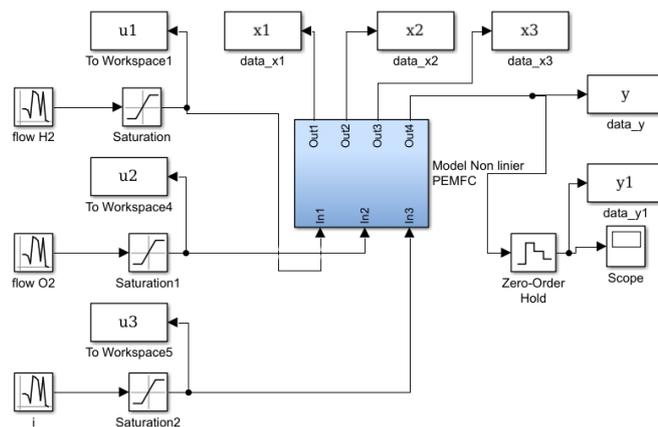
$$y = V = N(E^0 + \frac{RT}{2F} \ln \left\{ \frac{pH_2 (pO_2 / P_{std})^{0.5}}{pH_2O} \right\} - L) \tag{5}$$

$$x = [pH_2 \quad pO_2 \quad pH_2O_c]^T, \quad u = [H_{2-in} \quad O_{2-in} \quad i]^T, \quad y = V$$



Gambar 2. Karakteristik *single-cell* PEM Fuel Cell

Sistem dinamik PEM Fuel Cell disimulasikan untuk menurunkan model karakteristik yang menunjukkan hubungan antara variable input dan output. Gambar 3.1. menunjukkan simulasi sistem nonlinier dalam Simulink.

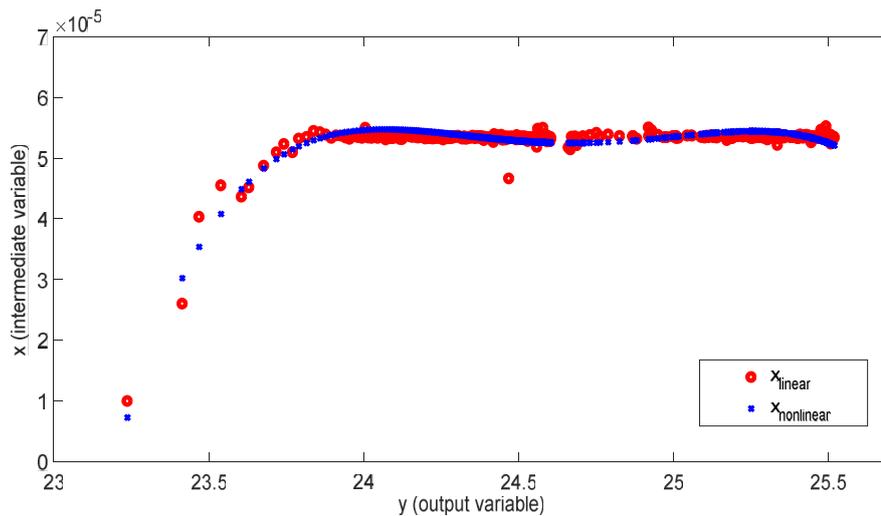


Gambar 3. Simulasi Sistem Dinamik PEM Fuel Cell

Data set yang digunakan untuk proses identifikasi adalah hasil simulasi sistem dinamik pada Gambar 3. Model estimasi adalah model MISO (Multi Input Single Output) yang terdiri atas model linier dan nonlinier. Pada estimasi model linier, orde fungsi FSF adalah 7, dan dihasilkan fungsi inverse nonlinier hasil identifikasi adalah :

$$x = -1.6665y^4 + 0.6616y^3 - 0.0608y^2 + y - 6.1632 \tag{6}$$

Hasil estimasi dengan metode *orthogonal decomposition* menunjukkan tingkat akurasi estimasi yang sangat signifikan. Hal ini terlihat dari besaran nilai MSE 8.11×10^{-13} dengan nilai R-squared 0.99. Selanjutnya, evaluasi lanjut dilakukan untuk membandingkan output model linier dan inverse nonlinier yang merupakan nilai intermediate variable. Hasil yang didapatkan adalah nilai R-squared yang lebih kecil yaitu 0.87.



Fungsi parametric model linier dalam bentuk diskrit ARX model $A(z)x(t) = B(z)u(t) + e(t)$ adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 A(z) &= 1 - 0.9587z^{-1} - 0.01042z^{-2} + 0.006487z^{-3} \\
 B_1(z) &= -10.17 + 4.223z^{-1} \\
 B_2(z) &= 6.326 - 3.095z^{-1} \\
 B_3(z) &= -0.7475 + 3.32z^{-1}
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

Model fit yang didapatkan dari model linier ARX ini adalah 91% dengan nilai MSE 0.002147.

4. KESIMPULAN

Karakterisasi sistem dinamik Proton Exchange Membrane Fuel Cell dilakukan melalui pendekatan blok Wiener dengan identifikasi nonlinieritas dalam menggunakan fungsi inverse. Hasil identifikasi menunjukkan bahwa metode parametrik dan non-parametrik pada estimasi model linier memberikan tingkat akurasi hasil prediksi yang sangat baik. Hal ini ditunjukkan oleh presentasi nilai evaluasi error. Pemodelan nonlinieritas dalam bentuk inverse sangat bermanfaat untuk mengeliminasi pengaruh ketidaklinieran pada kestabilan sistem. Pada tahap perancangan pengendali, model inverse tersebut digunakan sebagai kompensator nonlinier.

5. DAFTAR PUSTAKA

Amphlett, J. C., Baumert, R. M., Mann, R. F., Peppley, B. A. and Roberge, P. R., 1995. "Performance modeling of the Ballard Mark IV solid polymer electrolyte fuel cell, I. Mechanistic model development," *J. Electrochem. Soc.*, vol. 142, no. 1, pp. 1-8

Amphlett, J. C., Baumert, R. M., Mann, R. F., Peppley, B. A. and Roberge, P. R., and Rodrigues, A., 1996. "A model predicting transient responses of proton exchange membrane fuel cells," *J. Power Sources*, vol. 61, no. 1-2, pp. 183-188

Aryani, D., Wang, L. and Patikirikorala, T., 2016. "On identification of hammerstein and wiener model with application to virtualised software system," *International Journal of Systems Science*, vol. 48, no. 6, pp. 1146-1161.

Larminie, J., Dicks, A. and McDonald, M.S., 2003. *Fuel cell systems explained* (Vol. 2). Chichester, UK: J. Wiley.

Leontaritis, I.J. and Billings, S.A., (1985). Input-output parametric models for non-linear systems part I: deterministic non-linear systems. *International journal of control*, 41(2), pp.303-328.

Paduart, J., Schoukens, J., Pintelon, R. and Coen, T. (2006). Nonlinear state space modelling of multivariable systems. *IFAC Proceedings Volumes*, 39(1), pp.565-569.

Spiegel, C., 2011. *PEM fuel cell modeling and simulation using MATLAB*. Academic press.

Wang, M. and Nehrir, M. H., 2001, "Fuel cell modeling and fuzzy logic-based voltage control," *Int. J. Renewable Energy Eng.*, vol. 3, no. 2.

Yusivar, F., Subiantoro, A., Aryani, D., Gunawan, R., and Priambodo, P.S., 2009. Miso Model Identification of proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEM-FC) using Least Square Method, *International Workshop on Material for New and Renewable Energy*, E-FC3, DOI: 10.1063/1.3243263