DISAIN SISTEM KONTROL DAN OPERASI UNTUK PROTON EXCHANGE MEMBRANE FUEL CELL

Design of Control and Operation System for Proton Exchange Membrane Fuel Cell

Anton Rahmawan, Abdul Hamid Budiman, Kurniawan, dan Ferri Hermawan

Balai Besar Teknologi Konversi Energi (B2TKE)

Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT)

Gedung 625 Klaster Energi Kawasan Puspiptek Serpong

E-mail: anton.rahmawan@bppt.go.id

Abstract

Fuel cell is an electrochemical device that converts hydrogen and oxygen into water, which simultaneously produces electrical energy continuously and heat as waste. Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) operates with polymer electrolytes which are thin and permeable. By designing the control system, it is expected that the fuel cell operation could be in accordance with the predetermined process parameter design. In addition to the control system for fuel cell operations, a fuel cell protection or security system design is also carried out during operation. Referring to the block diagram or control system architecture and fuel cell operations that have been made, a detailed design will be made as a reference for the prototype of the control and protection system for operational and fuel cell testing. Making Standard operation procedure (SOP) is very helpful in the operation and avoids operating errors that can damage and harm caused.

Keyword: PEMFC, control system, architecture diagram, prototype, SOP

Abstrak

Fuel cell atau sel bahan bakar adalah alat atau divais konversi energi elektrokimia yang akan mengubah hidrogen dan oksigen menjadi air, dimana secara bersamaan menghasilkan energi listrik secara kontinyu dan panas sebagai buangan dalam prosesnya. *Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC)* beroperasi dengan elektrolit polimer yang bentuknya tipis dan bersifat permeable. Dengan dilakukannya desain sistem kontrol ini diharapkan operasional *fuel cell* dapat sesuai dengan desain parameter proses yang telah ditentukan. Selain sistem kontrol untuk pengoperasian *fuel cell* juga dilakukan desain sistem proteksi atau keamanan *fuel cell* pada saat pengoperasiannya. Mengacu pada diagram blok/arsitektur sistem kontrol dan operasi *fuel cell* yang sudah dibuat, selanjutnya akan dibuat desain detil sebagai acuan untuk pembuatan prototipe sistem kontrol dan proteksi untuk keperluan operasional serta pengujian *fuel cell*. Pembuatan SOP (*standard operation procedure*) sangat membantu dalam pengoperasian dan menghindari kesalahan operasi yang dapat mengakibatkan kerusakan serta bahaya yang ditimbulkan.

Kata Kunci: PEMFC, sistem kontrol, proteksi, diagram arsitektur, prototipe, SOP

1. PENDAHULUAN

Fuel cell adalah alat konversi energi elektrokimia yang dapat mengubah hidrogen dan oksigen menjadi air, secara bersamaan akan menghasilkan energi listrik dan panas dalam prosesnya. *Fuel cell* merupakan suatu bentuk teknologi sederhana seperti baterai yang dapat diisi bahan bakar untuk mendapatkan energinya kembali, dalam hal ini yang menjadi bahan bakar adalah oksigen dan hidrogen.

Seperti halnya sebuah baterai, semua jenis *fuel cell* memiliki elektroda positif yang disebut katoda dan elektroda negatif yang disebut anoda. Pada elektroda tersebut terjadi reaksi kimia yang menghasilkan listrik. Pada *fuel cell* terdapat elektrolit yang akan membawa muatan listrik dari satu elektroda ke elektroda lain, serta katalis yang akan mempercepat reaksi di elektroda. Pada

umumnya yang membedakan tipe *fuel cell* adalah material elektrolit yang digunakan. Arus listrik serta panas yang dihasilkan setiap jenis *fuel cell* merupakan produk samping reaksi kimia yang terjadi di katoda dan anoda (Fuel Cell Hand Book, 2000).

Secara prinsip, *fuel cell* beroperasi seperti baterai, hanya saja *fuel cell* tidak memerlukan proses *charging*. *Fuel cell* akan terus menghasilkan energi listrik sepanjang adanya suplai bahan bakar yang masuk ke dalam sistem.

Proses konversi energi yang terjadi dalam *fuel cell* adalah melalui proses elektrokimia, sehingga prosesnya bersih, tidak ada kebisingan dan mempunyai efisiensi yang tinggi.

1.1. Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC)

Proton Exchange Membrane Fuel Cell atau

Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell memiliki densitas *power* yang tinggi, ringan dan volume yang rendah dibanding tipe *fuel cell* lainnya. Menggunakan polimer *solid* sebagai elektrolitnya dan elektroda karbon berpori yang mengandung katalis platina.

Gambar 1. Skema PEMFC (<https://www.researchgate.net>)

PEMFC hanya memerlukan hidrogen, oksigen dari udara dan air sehingga bersifat tidak korosif. Karena beroperasi pada temperatur rendah, PEMFC dapat beroperasi dengan cepat, waktu pemanasannya rendah (*Start Quickly, less warm up*) akibatnya memiliki durabilitas yang tinggi (Fuel Cell Handbook, 2000).

Kelemahan PEMFC adalah katalisnya mahal dan bersifat sensitif terhadap racun CO (carbon monoksida). Oleh karena itu jika hidrogennya berasal dari alkohol, hidrokarbon dan turunannya, diperlukan tambahan reaktor untuk mengurangi kadar CO, dan tentunya akan menambah biaya. Akhir-akhir ini katalis yang bersifat resistan terhadap CO mulai dikembangkan seperti Pt/Ru (Camara, 2002).

Fuel cell tipe PEM beroperasi dengan elektrolit polimer yang bentuknya tipis dan bersifat permeable. Efisiensinya 40-50 % dan temperatur operasinya 80 °C. Output dari *fuel cell* tipe ini adalah 50-250 kW. Karena elektrolitnya bersifat solid, fleksibel, elektrolit PEMFC tidak akan bocor ataupun patah, serta dapat beroperasi pada temperatur yang cukup rendah sehingga sangat cocok untuk diterapkan pada kendaraan dan rumah tangga. Sayangnya bahan bakar *fuel cell* tipe ini harus murni dan menggunakan katalis platina pada kedua sisi membrannya, akibatnya biaya yang diperlukan menjadi mahal (Carrette, 2001).

PEMFC diaplikasikan pada kendaraan dan stationair. Untuk aplikasi pada kendaraan, diperlukan adanya *hydrogen storage* (tangki

penyimpan hidrogen). Karena hidrogen mempunyai densitas energi yang rendah, hal ini menyebabkan adanya sedikit kesusahan untuk menyimpan *hidrogen on board*, oleh karena itu penggunaan metanol, etanol, ataupun natural gas menjadi pertimbangan.

Namun bila digunakan metanol, etanol ataupun natural gas diperlukan sebuah *reformer* untuk mengubahnya menjadi hidrogen. Tentu saja hal ini akan meningkatkan biaya dan perlu adanya perawatan khusus. Selain itu *reformer* akan menghasilkan polutan CO₂.

1.2. Teknologi dan Spesifikasi PEMFC

Anoda sebagai kutub negatif *fuel cell* merupakan elektroda yang akan mengalirkan elektron yang lepas dari molekul hidrogen sehingga elektron tersebut dapat digunakan di luar sirkuit. Pada materialnya terdapat saluran agar gas hidrogen dapat menyebar ke seluruh permukaan katalis.

Katoda sebagai kutub elektroda positif *fuel cell* juga memiliki saluran yang akan menyebarkan oksigen ke seluruh permukaan katalis. Katoda juga berperan dalam mengalirkan elektron dari luar sirkuit ke dalam sirkuit sehingga elektron-elektron tersebut dapat bergabung dengan ion hidrogen dan oksigen untuk membentuk air.

Katalis yang digunakan umumnya terbuat dari lembaran kertas karbon yang diberi selapis tipis bubuk platina. Permukaan katalis selalu berpori dan kasar sehingga seluruh area permukaan platina dapat dicapai hidrogen dan oksigen. Adapun spesifikasi dan teknologi PEMFC adalah sebagai berikut pada Tabel 1.

2. BAHAN DAN METODE

2.1. Penentuan Paramater Sistem Kontrol dan Proteksi Operasi PEMFC

Penentuan parameter proses yang akan dikontrol merupakan langkah awal dari desain sistem kontrol dan operasi PEMFC. Berdasarkan spesifikasi PEMFC dan prosesnya terdapat beberapa parameter yang digunakan acuan dalam membuat desain, yaitu meliputi temperatur operasi, tekanan inlet suplai hidrogen ke modul PEMFC, tekanan outlet H₂O dari modul PEMFC, *flowrate* bahan bakar, tegangan yang dihasilkan PEMFC, arus listrik, tegangan baterai, temperatur udara untuk keperluan pendinginan, *flow* aliran suplai udara untuk PEMFC.

Untuk keperluan keamanan pada saat operasi dipasang beberapa sensor yang dapat mendeteksi kebocoran gas hidrogen dan beberapa komponen aktuator yang berfungsi memproteksi pada saat operasi PEMFC berjalan tidak benar.

2.2. Desain Sistem Kontrol dan Proteksi PEMFC

Pembuatan desain sistem kontrol dan proteksi akan menghasilkan gambar desain berupa Diagram Blok (Arsitektur) Sistem Kontrol PEMFC. Diagram blok/arsitektur menerangkan tentang

Tabel 1. Spesifikasi dan Teknologi PEMFC

Elektrolit	Elektrolit	Resin pertukaran kation, membrane terhidrasi (nafion, XUS 13204.10)
	Ion Konduktor	H ⁺
	Temperatur Operasi	80 – 120 °C
	Penggunaan	Pada lapisan membrane yang tipis
Elektroda	Katalis	Basis Pt
	Material Anoda	Pelat karbon, lapisan Niobium, pelat titanium
	Pembentuk Katoda	Idem
	Elektroda	
	Lapisan Pelindung Air	Grafrit dan layer PTFE di katoda
	Reaksi di Anoda	H ₂ → 2H ⁺ + 2e
	Reaksi di Katoda	½ O ₂ + 2H ⁺ + 2e → H ₂ O
	Reaksi Total	H ₂ + ½ O ₂ → H ₂ O
Bahan Bakar (Gas Anoda)		H ₂ (kandungan CO ₂ dibolehkan, tapi CO tidak)
Oksidan		O ₂ atau udara
Sumber Bahan Bakar		Gas bumi, turunan Nafta dan Metanol
Spesi Gas Lainnya	CO	Meracuni (>10 ppm)
	CH ₄	Diluents
	CO ₂ & H ₂ O	Diluents
	S sebagai H ₂ S dan COS	Belum diketahui
Proses Reformasi Internal		Tidak dimungkinkan
Reformasi Eksternal untuk CH ₄		Ya
Manajemen air hasil produksi		Evaporatif
Manajemen panas produksi		Gas proses + medium pendingin
Densitas energi per unit sel	Hidrogen, Oksigen	600 x 0.8
	Hidrogen/udara tereformasi	400 x 0.7
Efisiensi Sistem (HHV)		50 %
Tahap Pengembangan		10 kW pada penggunaan khusus
Keuntungan		Arus listrik dan densitas energi tinggi, waktu operasi lama, operasi pada temperature ruang
Kekurangan		Tidak toleran CO, manajemen air, penggunaan katalis logam mulia

sistem operasi dan kontrol *fuel cell* yang akan dilakukan pembuatan prototipenya.

Desain diagram arsitektur memuat beberapa komponen yang digunakan dalam pengoperasian *fuel cell* baik untuk keperluan kontrol proses maupun sistem proteksinya.

Untuk dapat beroperasi dengan baik maka perlu dilakukan pengontrolan beberapa parameter proses seperti tekanan, temperatur, waktu *purging*, dan beberapa besaran elektikal. Untuk melakukan pengontrolan tersebut digunakan sistem kontrol yang terdiri dari sensor/transmitter, kontroler dan aktuatur dalam satu *loop* atau rangkaian beberapa *loop control* (Ogata, 1997).

Untuk mengontrol kebutuhan temperatur udara pendingin maka dipasang sensor/transmitter temperatur udara pada bagian *intake* udara di dalam panel yang akan mengukur temperatur udara yang kemudian memberikan sinyal input kepada kontroler.

Di dalam kontroler sinyal input akan diolah dan diproses sesuai dengan nilai set point yang telah ditentukan dan akan dihasilkan sinyal output untuk menggerakkan aktuatur agar diperoleh temperatur udara pendingin yang diinginkan sesuai dengan kebutuhan proses pendinginan (Gunterus, 1994).

Dengan dilakukannya desain sistem kontrol ini diharapkan operasional *fuel cell* dapat sesuai

dengan desain parameter proses yang telah ditentukan.

Selain sistem kontrol untuk pengoperasian *fuel cell* juga dilakukan desain sistem proteksi atau keamanan *fuel cell* pada saat pengoperasiannya. Sistem proteksi ini terdiri dari sensor, kontroler dan aktuatur yang membentuk satu *loop* logika kontrol (Goble, 1998).

Sistem proteksi berfungsi untuk mengamankan alat, operator dan lingkungan sekitar sistem *fuel cell* dari kegagalan pengoperasian yang dapat mengakibatkan efek ledakan, kebakaran dan lainnya. Desain sistem proteksi *fuel cell* menjadi satu kesatuan dengan sistem kontrol proses dalam prototipe yang akan dibuat.

Selain itu dari sisi sistem kelistrikan juga dibuat desain power monitoring yang bertujuan memantau energi listrik yang dihasilkan *fuel cell* dan memantau kondisi baterai serta peralatan elektrikal lainnya.

2.3. Desain Standard Operational Procedure (SOP) PEMFC

Untuk melakukan pengoperasian dan pengujian kinerja *fuel cell*, dibuat SOP sebagai panduan dalam melakukan proses pengoperasian PEMFC.

Desain SOP berupa diagram alir (*Flowchart*) yang menerangkan secara bertahap proses

operasi dan pengujian pada saat persiapan, *start*, *running* dan *stop* PEMFC (Florida Energy Center, 2009). Dengan dibuat panduan berupa SOP maka proses pengoperasian dapat dilakukan secara benar dan aman

2.4. Pembuatan Prototipe Sistem Kontrol dan Pengujian Prototipe

Mengacu pada diagram blok/arsitektur sistem kontrol dan operasi *fuel cell* yang sudah dibuat, selanjutnya akan dibuat desain detil sebagai acuan untuk pembuatan prototipe sistem kontrol dan proteksi untuk keperluan operasional serta pengujian *fuel cell*. Pembuatan desain detail meliputi desain panel, *wiring*, serta *layout* komponen prototipe.

Setelah pembuatan prototipe sistem kontrol *fuel cell* selesai kemudian dilakukan pengujian *wiring*, *loop control*, *logic control*, proteksi/*emergency* dan *start/stop* sistem *fuel cell*.

Dengan simulasi parameter proses melalui komponen peralatan sistem kontrol dilakukan proses simulasi operasional *fuel cell*. Pada saat simulasi dilakukan perubahan-perubahan parameter proses dan melihat efek yang terjadi pada saat operasi *fuel cell*. Dengan melakukan simulasi proses didapatkan data-data operasional prototipe sistem *fuel cell* yang diharapkan mendekati kondisi proses operasional *fuel cell* yang sebenarnya sesuai data-data dan informasi yang telah diperoleh pada sistem *fuel cell* yang telah terpasang.

Selain itu untuk keamanan sistem *fuel cell* dibuat sistem proteksi dan *emergency* yang akan diuji pada saat simulasi operasional *fuel cell*.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini menghasilkan desain konsep dan detail dari sistem kontrol dan operasi PEMFC. Salah satunya yang utama berupa diagram blok (arsitektur) seperti pada gambar 2 di bawah ini untuk selanjutnya dikembangkan dengan simulasi dan pembuatan prototipe.

Dari hasil desain yang telah dikerjakan sebelumnya dilanjutkan dengan pembuatan prototipe pengoperasian *fuel cell* dalam skala laboratorium yang terdiri dari: sistem kontrol, elektrik, mekanikal dan modul *fuel cell*.

Prototipe ini terdiri dari panel kontrol, panel *fuel cell* dan suplai gas hidrogen. Untuk menghasilkan listrik gas hidrogen yang dialirkan ke dalam modul *fuel cell* yang sebelumnya telah dilakukan pengaturan tekanan melalui *pressure regulator* dan kontroler agar sesuai dengan spesifikasi parameter proses yang telah ditentukan yaitu tekanan operasi modul *fuel cell* sebesar 0,2 – 0,4 bar.

Sistem kontrol dan *interlocking* serta *emergency* yang terpasang panel kontrol digunakan untuk menjaga agar pengoperasian *fuel cell* sesuai dengan desain proses dan aman dari bahaya atau resiko yang dapat menimbulkan

kerusakan alat dan bahaya terhadap operator atau lingkungan laboratorium (Vipin, 2017).

PEMFC CONTROL SYSTEM BLOCK DIAGRAM

Gambar 2. Diagram arsitektur sistem kontrol PEMFC

Jenis *prototipe* yang dibuat merupakan *prototipe* skala laboratorium yang meliputi sistem kontrol, elektrik, mekanikal dan *modular fuel cell* menjadi sebuah kesatuan sistem yang berfungsi untuk melakukan pengoperasian *fuel cell*.

Prototipe ini telah dilakukan pengujian dan pengoperasian yang meliputi beberapa pengujian yaitu pengujian panel kontrol, panel *fuel cell* dan pengoperasian *fuel cell* seperti yang dijelaskan berikut ini:

3.1. Pengujian Panel Kontrol

Panel kontrol telah dilakukan beberapa pengujian subsistem yaitu elektrik, kontrol dan interlocking/*emergency*. Pengujian elektrik dilakukan dengan cara mengalirkan power AC (*alternating current*) ke panel yang kemudian didistribusikan melalui MCB (*master circuit breakout*) utama ke MCB lainnya untuk keperluan power AC dan DC (*Direct Current*) pada masing-masing alat dan komponen dalam panel.

Setelah semua MCB di-On posisinya kemudian dilakukan pengukuran tegangan pada masing-masing MCB dan terminasi kabel untuk penyaluran suplai *power* listrik pada setiap komponen panel kontrol. Pengujian kontrol dilakukan dengan cara melakukan setting pada kontroler Honeywell yang telah terpasang pada panel. Kontroler ini berfungsi untuk mengatur tekanan gas inlet ke modul *fuel cell* agar sesuai dengan desain proses dan operasinya.

Dengan melakukan simulasi proses dan operasi dilakukan pengujian kontrol tekanan gas inlet *fuel cell*. Simulasi gas dilakukan dengan menggunakan udara dari kompresor dengan mengubah-ubah tekanannya. Dengan kontroler tersebut tekanan gas inlet ke *fuel cell* dapat terjaga dan digunakan untuk pengoperasian *fuel cell* (Daud, 2017).

Pengujian *interlocking* dan *emergency*

dilakukan dengan cara melakukan simulasi tekanan gas inlet dengan udara dari kompresor dan menyetting kontroler untuk memutus suplai gas dengan memberikan perintah menutup jika tekanan gas inlet berbahaya jika digunakan untuk pengoperasian *fuel cell*. Untuk keperluan *emergency* dapat ditekan tombol *emergency* yang akan mematikan proses pengoperasian *fuel cell* secara langsung.

3.2. Pengujian Panel *Fuel Cell*

Panel *fuel cell* terdiri dari beberapa komponen yaitu *modul fuel cell* dan sistem mekanikal. Pengujian modul *fuel cell* dengan cara dilakukan pemeriksaan fisik secara visual dan dilakukan pengukuran hambatan, tegangan dan kebocoran pada modul *fuel cell* tersebut. Setelah dinyatakan tidak ada kebocoran maka dilanjutkan dengan pengkondisian *stack fuel cell*.

Pengkondisian ini sangat penting sekali untuk dilakukan untuk mencegah kerusakan pada *stack fuel cell*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa modul masih bagus dan berfungsi. Pengujian pada sistem mekanikal dilakukan dengan mengalirkan udara menggunakan kompresor melalui *tubing* dan *fitting* yang telah terpasang pada panel. Dilakukan uji kebocoran dan ketahanan sistem mekanikal dan suplai dengan tekanan udara kompresor sebesar 1 bar dan ditahan tekanannya terjaga hingga selama 2 jam.

3.3. Pengujian dan Pengoperasian *Fuel Cell*

Pada tahap ini dilakukan pengujian dan pengoperasian dari keseluruhan subsistem yang digunakan, yaitu sistem suplai gas hidrogen, sistem kontrol, dan modul *fuel cell* yang dirangkai menjadi satu kesatuan. Pengujian dilakukan dengan mengaktifkan panel kontrol dan panel *fuel cell* serta menyiapkan gas hidrogen dari tabung dengan tekanan 0,4 bar yang telah diatur menggunakan pressure regulator. Dengan mengamati parameter-parameter temperatur, tekanan, tegangan, arus dan status komponen terlebih dahulu dan memastikan tidak ada kebocoran gas sebelumnya maka pengujian dapat dilakukan (Wang, 2013).

Setelah semua kondisi dan parameter untuk pengujian terpenuhi maka pengujian dapat dilakukan sesuai diagram pada gambar 3 di bawah, dengan cara membuka katup solenoid untuk mengalirkan gas hidrogen ke dalam modul *fuel cell*. Setelah gas hidrogen dialirkan ke dalam modul *fuel cell* dilakukan pengamatan tekanan gas inlet tersebut.

Tekanan operasi gas inlet dijaga antara 0,2 - 0,4 bar. Selain itu juga diamati temperatur modul *fuel cell* melalui display temperatur pada panel yang tidak boleh melebihi 40° Celcius. Dilakukan pengamatan dan pengukuran tegangan serta arus pada modul *fuel cell* melalui display indikator pada panel *fuel cell*. Pengujian ini dilakukan kurang lebih selama 2 jam selama proses pengoperasian tersebut.

Gambar 3. Diagram Sistem Pengujian *Fuel Cell*

4. KESIMPULAN

Desain sistem kontrol dan operasi untuk PEMFC memegang peranan penting dalam pengoperasian agar proses yang berjalan pada PEMFC dapat berjalan dengan benar. Aspek keselamatan pada saat pengoperasian sangat diperlukan oleh karena itu dibuat sistem *interlocking* untuk menghindari efek dari kegagalan pengoperasian. Dengan membuat prototipe sistem kontrol dapat dilakukan pengujian desain sistem kontrol serta operasi PEMFC. Pembuatan *Standard operation procedure (SOP)* sangat membantu dalam pengoperasian dan menghindari kesalahan operasi yang dapat mengakibatkan kerusakan serta bahaya yang ditimbulkan.

DAFTAR PUSTAKA

- Camara, G.A., Ticianelli, E.A., Mukerjee, S., Lee, S.J., McBreen, J., (2002). The CO poisoning mechanism of the hydrogen oxidation reaction in proton exchange membrane fuel cells. *Journal of the Electrochemical Society*. 149 (6), A7.48-53.
- Carrette L., K.A. Friedrich, K.A., Stimming, U., (2001). *Fuel Cells – Fundamentals and Applications*, Fuel Cells, 1(1), 5-39.
- Daud, W.R.W., Rosli, R.E., Majlan, E.H., Hamid, S.A.A., Mohamed, R., Husaeni, T., (2017). PEM Fuel Cell System Control; A Review. *Renewable Energy* (113), 620-638.
- Florida Energy Center., (2009). *Procedure for Performing PEM Single Testing*.
- Fuel Cell Hand Book, 5th edition (2000). EG&G Services Parsons, Inc. Science Application International Corporation.
- Goble, William M., (1998). *Control System, Safety Evaluation and Reliability*, ISA (The International Society of Automation), Durham.
- Gunterus, Frans., (1994). *Falsafah dasar sistem pengendalian proses*. Elex Media Komputindo, Jakarta.
- Ogata, Katsuhiko., (1997). *Teknik Kontrol Automatik*. Jilid 1, Erlangga, Jakarta.
- Vipin, D., Sanjeevikumar, P., Karthikeyan V., Rajasekar, S., Frede, B., Pierluigi, S., (2017) Recent advances and challenges of fuel cell based power system architectures and control – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (73), 10-18.
- Wang, F.C., Kuo, P. C., Chen, H.j., (2013). *Control design and power management of a stationary PEMFC hybrid power*

system. International Journal of Hydrogen Energy (38),
5845-5856.

<http://www.researchgate.net/figure/Proton-Exchange-Membran-Fuel-Cell-schematic-representation-Based-on-the-polarization-I-fig1-271156635>. Akses 30 Oktober 2018.