

INTEGRASI POLYMER ELECTROLYTE MEMBRANE (PEM) FUEL CELL DAN ANALISIS PENGARUH JUMLAH SEL TERHADAP PERFORMANSI BERDASARKAN DATA KURVA KARAKTERISTIK

Nia Nur Malasari¹, Holia Onggo², Mamat Rokhmat³
^{1,3}Fakultas Teknik Elektro Universitas Telkom, Bandung
²Pusat Penelitian Fisika LIPI, Bandung

¹nianurmalasari@outlook.com, ²holi001@lipi.go.id,
³mamat.rokhmat76@gmail.com

Abstrak

Satu sel fuel cell menghasilkan tegangan kurang dari 1.16 volt, tegangan ini terlalu kecil untuk diaplikasikan. Tegangan yang tinggi dapat dihasilkan dengan cara menyusun secara seri sebuah fuel cell *stack*. Daya, potensial sel, dan arus yang dihasilkan oleh *stack* bergantung pada jumlah sel. Namun, potensial sel yang sebenarnya menurun dari potensial ideal karena beberapa jenis kerugian irreversibel. Penelitian ini mempelajari pengaruh jumlah sel dalam *stack* terhadap output dari Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC). Pada eksperimen ini, *temperature humidifier* diatur pada 45°C sedangkan suhu sel dijaga konstan pada suhu kamar. *Clamping force* adalah sebesar 20 kgf/cm², dan *backpressure* H₂/O₂ adalah 15 psi. *Flow rate* H₂ untuk satu, dua dan tiga sel masing-masing adalah 50ml/min, 100ml/min, 150ml.min. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa optimasi tekanan dan *flow rate* meningkatkan kinerja *stack* secara signifikan. Fungsi daya maksimum yang dihasilkan adalah $1.356n^{1.968}$ dimana n adalah jumlah sel.

Kata kunci : *polymer electrolyte membrane fuel cell*, kurva karakteristik, *overvoltage*, *stacking*, *irreversible loss*, jumlah sel, optimasi

Abstract

One fuel cell produces less than 1.16 volts of electricity which is too small for real application. A high voltage can be generated by assembling a serial fuel cells *stack*. The power, cell potential, and current generating from serial fuel cells *stack* depend on the number of fuel cells. However, the actual cell potential is decreased from its ideal potential because of several types of irreversible losses. This research studies the effect of the fuel *stack* numbers on the output of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFCs). In this experiments, the humidifier temperature is at 45°C while the cell temperature is kept constant at room temperature. The clamping force is 20 kgf/cm² and backpressure of H₂/O₂ is 15 psi. The flow rate of H₂ for one, two, and three cells are 50ml/min, 100 ml/min, 150ml/min respectively. The results showed that optimizing pressure and flow rate increase the performance of *stack* significantly. The function of maximum power is $1.356n^{1.968}$ which n is number of cell.

Keywords : *polymer electrolyte membrane fuel cell*, characteristic curve, *overvoltage*, *stacking*, *irreversible loss*, amount of cells, optimization

1. Pendahuluan

Salah satu tipe fuel cell yang sedang dikembangkan di banyak negara pada saat ini adalah Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell karena memiliki keunggulan *temperature range* atau suhu operasi yang relatif rendah (dibawah 100°C).

Prinsip kerja dari PEM fuel cell adalah mengkonversi hidrogen menjadi energi listrik dengan cara memecah hidrogen menjadi konfigurasi proton dan elektron yang dilakukan oleh katalis, selanjutnya proton dialirkan melalui membran dan elektron mengalir melalui *current collector* menghasilkan arus listrik searah. Kemudian proton dan elektron dari hidrogen bereaksi dengan udara sehingga menghasilkan air.

Satu sel PEM fuel cell akan menghasilkan tegangan ideal sebesar 1, 229 V. Namun pada kenyataannya terjadi *irreversible losses* atau rugi – rugi potensial yang terjadi pada tiga daerah yaitu *activation losses*, *ohmic losses* dan *mass transport losses* sehingga tidak dapat memenuhi kebutuhan listrik dalam skala besar. Oleh karena itu perlu dilakukan

upaya agar kapasitasnya bisa bertambah. Salah satunya dengan penambahan jumlah sel yang dirangkai seri yang disebut fuel cell *stack*. Potensi listrik dari setiap sel kemudian dijumlahkan untuk meningkatkan kapasitas daya *stack*.

Pada penelitian ini dilakukan optimasi parameter operasi *stack* seperti *temperature humidifier*, *flow rate*, *backpressure*, dan *clamping force* agar menghasilkan kapasitas daya yang optimal.

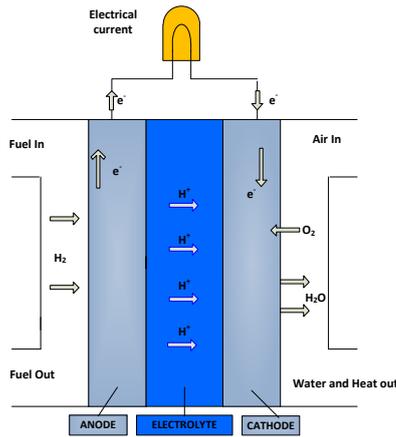
2. Dasar Teori

2.1 Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell

Polymer Electrolyte Membrane Fuel cell (PEMFC) juga dikenal sebagai *proton exchange membrane fuel cell*, Elektrolit dalam fuel cell ini adalah *polymer electrolyte membrane* (*fluorinated sulfonic acid polymer* atau polimer serupa lainnya) yang sangat baik sebagai konduktor proton. .

Struktur fisik dari PEMFC terdiri dari tujuh komponen diantaranya feeding channels di sisi anoda, sehingga tidak dapat memenuhi kebutuhan listrik dalam skala besar. Oleh karena itu perlu dilakukan

lapisan katalis di katoda, *diffusion layer dan feeding channel* di katoda.



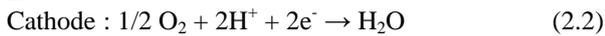
Gambar 2.1 Representasi *Polymer Electrolyte Membrane Fuel cell*

2.1 Open Circuit Voltage (OCV)

Reaksi utama yang terjadi pada PEMFC adalah sebagai berikut :



$$E^\circ = 0 \text{ V}$$



$$E^\circ = 1.23 \text{ V}$$

$$E^\circ_{\text{sel}} = E_{\text{cathode}} - E_{\text{anode}} \quad (2.3)$$

Pada reaksi tersebut kesetimbangan termodinamika dikarakteristikkan oleh potensial termodinamika minimum energi bebas Gibbs yaitu sistem dengan tekanan dan suhu tetap:

$$\Delta G_f = G_{f \text{ produk}} - G_{f \text{ reaktan}} \quad (2.4)$$

$$\Delta \bar{g}_f = (\bar{g}_f)_{\text{H}_2\text{O}} - (\bar{g}_f)_{\text{H}_2} - \frac{1}{2} (\bar{g}_f)_{\text{O}_2} \quad (2.5)$$

$$E = \frac{-\Delta \bar{g}_f}{2F}$$

Untuk kondisi volum isothermal (dianggap tetap) dan proses reversible, energi bebas Gibbs dapat diturunkan sebagai berikut :

$$d\bar{g}_f = VdP \quad (2.6)$$

$$\text{Dalam kondisi gas ideal, } PV = nRT \quad (2.7)$$

dengan kondisi tekanan udara tetap yaitu 1 atm.

$$\Delta \bar{g}_f = \bar{g}_f^0 + RT \ln \left(\frac{P_{\text{H}_2\text{O}}}{P_{\text{H}_2} (P_{\text{O}_2})^{0.5}} \right) \quad (2.8)$$

Dengan menggabungkan persamaan 2.9 dan persamaan 2.5 didapatkan :

$$E = E^0 + \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{P_{\text{H}_2\text{O}}}{P_{\text{H}_2} (P_{\text{O}_2})^{0.5}} \right) \quad (2.9)$$

dengan persamaan tekanan parsial H₂O, H₂ dan O₂ dinyatakan sebagai berikut :

$$\log P_{\text{H}_2\text{O}} = -2.1794 + 0.02953 T_c - 9.1837 \times 10^{-5} T_c^2 + 1.4454 \times 10^{-7} T_c^3 \quad (2.10)$$

$$P_{\text{H}_2} = \frac{0.5 P_{\text{H}_2}}{\exp\left(1.653 \frac{i}{T_k^{1.334}}\right)} - P_{\text{H}_2\text{O}} \quad (2.11)$$

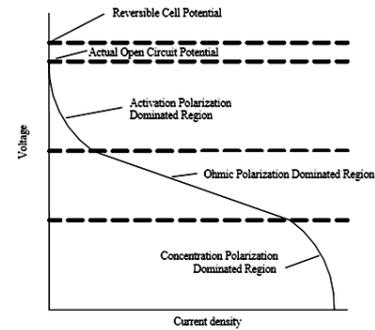
$$P_{\text{O}_2} = \frac{P_{\text{udara}}}{\exp\left(4.192 \frac{i}{T_k^{1.334}}\right)} - P_{\text{H}_2\text{O}} \quad (2.12)$$

Persamaan 2.10 merupakan persamaan tegangan reversibel fuel cell yang biasa disebut tegangan Nernst

(*Nernst Potensial*) yaitu tegangan yang dihasilkan oleh fuel cell saat *open circuit*. (antara dua elektroda) yang dipengaruhi oleh temperatur dan tekanan reaktan hidrogen dan oksigen.

2.2 Fuel Cell Overvoltage

Fuel cell menghasilkan tegangan kurang dari kondisi ideal, dan berkurang seiring meningkatnya kerapatan arus. Hal ini terjadi karena adanya rugi – rugi (*irreversible losses*) dari proses yang terjadi. Rugi–rugi ini disebut *polarization* atau *overvoltage*.



Gambar 2.2 Overvoltage pada fuel cell

Rugi – rugi ini dibagi menjadi tiga daerah yaitu :

1. *Kinetic Region /activation polarization/activation losses* ialah daerah yang merepresentasikan energi yang hilang saat terjadi reaksi pada elektroda (*energy barrier* yang harus dilampaui untuk melakukan reaksi).

$$\Delta V_{\text{act}} = A \ln \frac{i}{i_0} \quad (2.13)$$

$$A = \frac{RT}{2\alpha F} \quad (2.14)$$

2. *Resistance Region/ohmic polarization* ialah daerah yang merepresentasikan jumlah total energi yang hilang karena hambatan aliran elektron pada elektrolit dan pada material elektroda. Persamaannya adalah sebagai berikut :

$$\Delta V_{\text{ohm}} = iR \quad (2.15)$$

3. *Mass transport losses* atau *concentration polarization* yaitu daerah yang merepresentasikan energi yang hilang karena adanya proses perpindahan massa atau proses difusi. Pada kenyataannya arus akan mengalami batas (*i_L*) akibat proses difusi ini. Persamaannya sebagai berikut :

$$\Delta V_{\text{trans}} = \frac{RT}{2F} \ln \left(1 - \frac{i}{i_L} \right) \quad (2.16)$$

Persamaan pendekatan *transport loss* lain yang bisa digunakan untuk mendapatkan hasil model yang lebih mendekati adalah persamaan yang digunakan oleh Kim dkk., 1995 dan Laurencelle dkk., 2001 seperti yang tertulis dibawah ini.

$$\Delta V_{\text{trans}} = m \exp(ni) \quad (2.17)$$

3. Metode Penelitian

3.1 Pembuatan Membrane Electrode Assembly

Membran Nafion 117 seluas 16cm^2 ($4\text{ cm} \times 4\text{ cm}$) diaktivasi dengan direndam pada larutan 3% H_2O_2 pada temperatur $70\text{-}80^\circ\text{C}$ selama satu jam, kemudian direndam dalam larutan $0.5\text{ M H}_2\text{SO}_4$ pada temperatur $70 - 80^\circ\text{C}$ untuk memastikan *full protonation* pada gugus sulfonat. Terakhir membran direndam dengan air distilasi hingga mencapai pH 7 untuk membersihkan sisa asam pada membran seperti yang dilakukan oleh Yuyun dkk. Selanjutnya *pre-treated* membran disimpan dalam air deionisasi pada temperatur ruang.

Gas Difusion Electrode (GDE) carbon cloth seluas 9cm^2 ($3\text{cm} \times 3\text{cm}$) 30% Pt on Vulcan XC-72, 0.5 mg/cm^2 Pt loading $0.6\text{--}0.8\text{ mg/cm}^2$ Nafion, dilapisi Nafion Solution 117 5% sebanyak 1 mg/cm^2 . Sebanyak $10\text{ }\mu\text{l}$ Nafion Solution 117 5% dilarutkan dalam $90\text{ }\mu\text{l}$ larutan *2-propanol* agar larutan dapat melapisi seluruh luasan GDE. Metode pelapisan menggunakan metode *screen printing*.



Gambar 3.1 GDE, Nafion Solution dan 2-propanol

Pembuatan MEA dilakukan dengan metode *hotpress*. Tekanan yang diberikan adalah 3kgf/cm^2 dan suhu sebesar 120°C dengan variasi waktu *hotpress* 1 menit dan 2 menit. Nafion hasil aktivasi diapit dengan GDE yang telah dilapisi Nafion Solution dengan lapisan katalis menghadap membran.



Gambar 3.2 Membrane Electrode Assembly

3.2 Mekanisme Integrasi

Komponen PEMFC (endplate kayu, kolektor arus, gasket, dan MEA) ditumpuk dan diberi torsi awal (*clamping force*) senilai 10 kgf/cm^2 menggunakan obeng torka.



Gambar 3.3 (a) Desain Pelat Bipolar yang digunakan

3.3 Prosedur Pengujian dan Pengukuran

Uji kebocoran dilakukan dengan menggunakan gas nitrogen sebagai *purging*. Gas nitrogen dialirkan dengan tekanan $6\text{--}9\text{ psi}$ pada masing-masing inlet secara bergantian dengan outlet dalam kondisi tertutup (*dead end*). Tahap pengukuran dilakukan dengan mengalirkan hidrogen dan oksigen pada masing-masing inlet dengan parameter operasi (tekanan, suhu, *clamping force*, dan *flow rate*) yang dioptimasi.

4. Analisis dan Pembahasan

4.1 Hasil Optimasi PEMFC Satu, Dua dan Tiga Sel

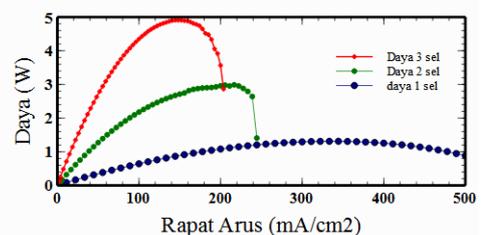
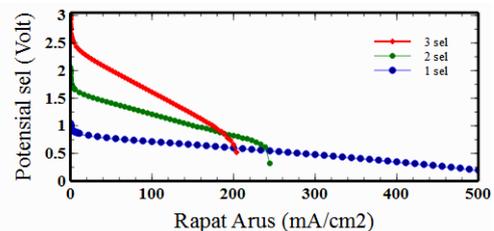
Parameter awal *stack* satu sel dioperasikan pada suhu ruang 25°C dengan $T_{\text{humidifier}}$ sebesar 45°C , tipe *stack* menggunakan *single inlet*, kondisi *stack* dalam keadaan *open end* (outlet tidak diberi tekanan), *flow rate* H_2 dan O_2 adalah sama yaitu 100 ml/min .

Optimasi meliputi variasi sejumlah parameter operasi dan kondisi *stack*.

Tabel 4.1 Variasi dan Hasil Optimasi

Variabel	Variasi			Hasil Optimal
MEA (t_{hotpress})	1 menit	2 menit		1 menit
Tipe <i>stack</i>	single inlet	double inlet		single inlet
$T_{\text{humidifier}}$	45°C	70°C		45°C
Clamping force	10 kgf/cm^2	15 kgf/cm^2	20 kgf/cm^2	20 kgf/cm^2
$\text{Flow rate}_{1\text{sel}} \text{H}_2/\text{O}_2$	100/100 ml/min	50/150 ml/min		50/150 ml/min
$\text{Flow rate}_{2\text{sel}} \text{H}_2/\text{O}_2$	100/250 ml/min	200/250 ml/min		100/250 ml/min
$\text{Flow rate}_{3\text{sel}} \text{H}_2/\text{O}_2$	200/250 ml/min	150/400 ml/min		150/400 ml/min
Backpressure	5 psi	10 psi	15psi	15 psi

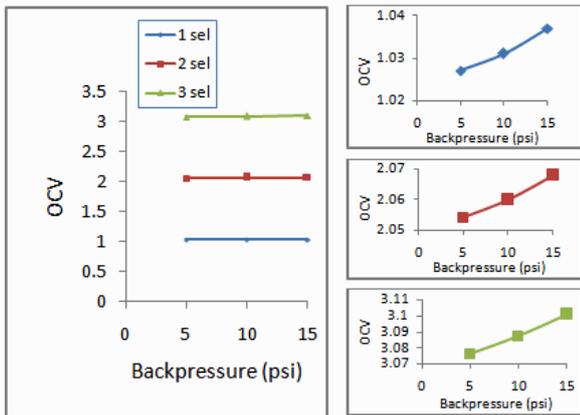
Hasil optimasi pada Gambar 4.1 menunjukkan adanya drop tegangan yang sangat besar pada kurva karakteristik dua sel dan tiga sel dibanding dengan kurva karakteristik satu sel. PEMFC satu sel mampu menghasilkan rapat arus sebesar 500 mA/cm^2 sedangkan *stack* dua sel dan tiga sel hanya mampu menghasilkan rapat arus maksimum sebesar 300 mA/cm^2 dan 203 mA/cm^2 .



(a) (b)

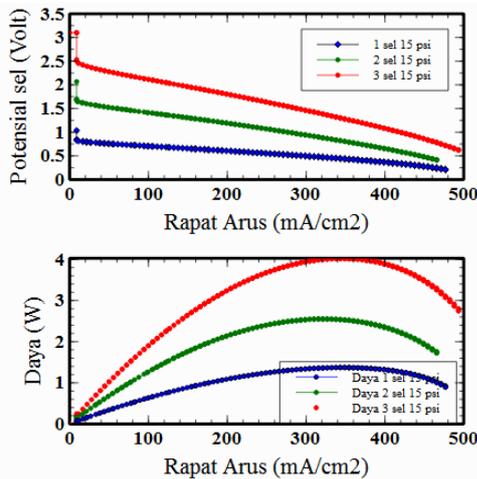
Gambar 4.1 Kurva karakteristik sebelum optimasi *backpressure*

Hal ini disebabkan oleh kurangnya tekanan pada *stack* dua dan tiga sel sehingga berimbas pada kurangnya *flow rate* H₂ dan O₂ yang dikonsumsi oleh *stack*. Tekanan memiliki peran yang penting dalam menaikkan kinerja fuel cell karena peningkatan tekanan backpressure akan meningkatkan tekanan parsial. Tekanan parsial merupakan salah satu parameter yang berpengaruh terhadap tegangan reversibel (OCV). Gambar 4.2 menunjukkan bahwa semakin tinggi tekanan yang diberikan pada *stack* maka tegangan reversibel akan meningkat.



Gambar 4.2 Pengaruh Backpressure Terhadap Tegangan Reversibel *Stack*

Dari proses optimasi parameter operasi dihasilkan kurva akhir eksperimen paling optimal seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.3 dengan perbandingan *flow rate* H₂ satu sel : dua sel : tiga sel adalah 1 : 2 : 3 (50ml/min per-sel).



Gambar 4.3 kurva karakteristik hasil optimasi *backpressure* (15psi)

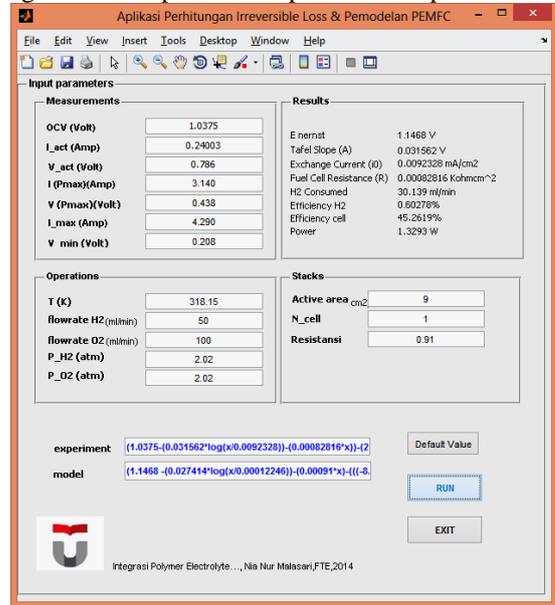
4.2 Analisis Parameter Irreversible Losses Data Eksperimen

Parameter *irreversible losses* pada *stack* PEMFC eksperimen didapatkan dengan metode trendline data karakteristik yang mencakup : trendline logaritmik kehilangan tegangan aktivasi, trendline linear

kehilangan tegangan ohmik dan trendline eksponensial pada kehilangan tegangan akibat transport massa [3].

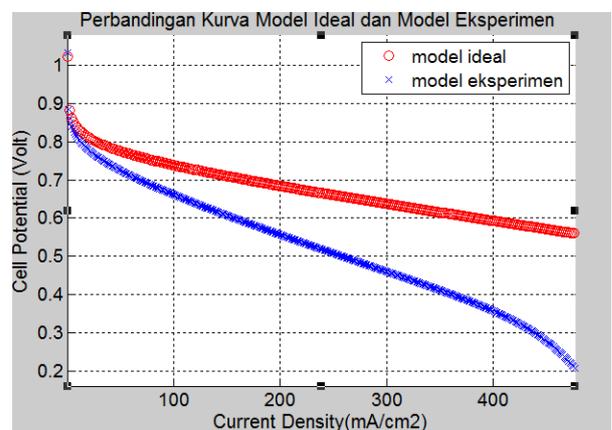
4.3 Hasil Graphical User Interface (GUI)

Pada penelitian ini dirancang sebuah *Graphical User Interface* (GUI) yang dapat membandingkan hasil pengukuran dan hasil simulasi berdasarkan pemodelan ideal PEMFC. Parameter input didapat dari hasil pengukuran dan parameter operasi hasil optimasi.



Gambar 4.3 Tampilan Graphical User Interface (GUI)

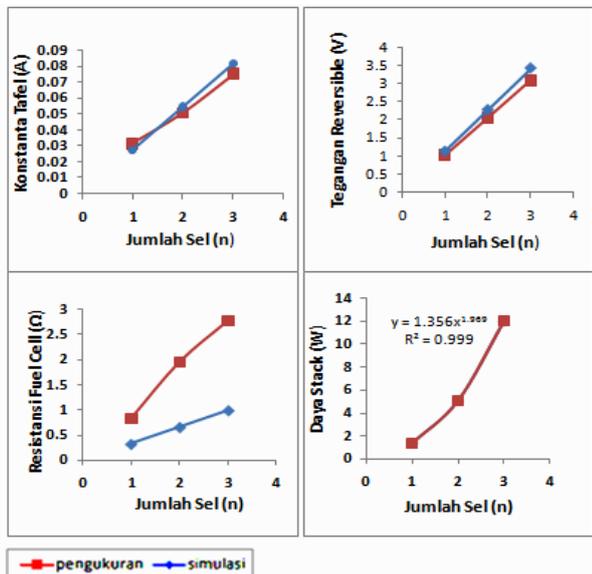
Gambar 4.4(a) merupakan output dari perbandingan hasil pengukuran *stack* satu sel dan hasil pemodelan. Hasil penelitian menunjukkan perbedaan yang sangat mencolok pada daerah ohmik. Hal ini disebabkan oleh penggunaan nilai resistansi pemodelan yang diinput hanya menggunakan nilai resistansi membran Nafion 117 senilai 0.0369 Ω [13] atau 0.3321 Ωcm², sedangkan kontribusi resistansi dari komponen lain diabaikan. Resistansi fuel cell rata-rata untuk ketiga sel adalah 0.91 Ωcm².



Gambar 4.4 a) Perbandingan Hasil Pengukuran dan Simulasi (Rinput = 0.3321 Ωcm²)

Berdasarkan hasil penelitian, penambahan jumlah sel meningkatkan tegangan reversibel (OCV) fuel cell sebesar *n* kali tegangan reversibel satu buah sel dengan nilai tegangan satu sel rata-rata 1.03 Volt, hal ini

sesuai dengan apa yang dikemukakan oleh Colleen Spiegel (2007). Gambar 4.25 merupakan grafik pengaruh jumlah sel terhadap performansi PEMFC yang ditinjau dari segi tegangan reversibel (OCV), parameter *irreversible loss* konstanta Tafel, resistansi fuel cell dan kapasitas daya yang dihasilkan oleh PEMFC.



Gambar 4.6 Pengaruh Jumlah Sel Terhadap Performansi PEMFC

Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa terdapat dua parameter penting untuk meningkatkan kinerja *stack* secara signifikan yaitu tekanan dan *flow rate*. Peningkatan tekanan *backpressure* akan meningkatkan tekanan parsial dalam *stack* sehingga akan menaikkan tegangan reversibel. Sedangkan optimasi *flow rate* akan berpengaruh pada rapat arus yang dihasilkan oleh *stack*. Sehingga kedua parameter ini akan menaikkan kinerja dari PEMFC *stack*.

5.1 Kesimpulan.

1. Untuk meningkatkan daya yang dihasilkan oleh *fuel cell*, *fuel cell* harus disusun secara seri yang dinamakan *fuel cell stack*.
2. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa terdapat dua parameter penting untuk meningkatkan kinerja *stack* secara signifikan yaitu tekanan dan *flow rate*. Peningkatan *backpressure* akan meningkatkan tekanan parsial dalam *stack* sehingga akan menaikkan tegangan reversibel. Sedangkan optimasi *flow rate* H₂ akan berpengaruh pada banyaknya ion H⁺ dan elektron yang dihasilkan oleh *stack* sehingga meningkatkan rapat arus.
3. Telah berhasil diintegrasikan *Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell* (PEMFC) berbasis membran Nafion dengan area aktif seluas 9cm²/sel sebanyak satu buah sel, dua buah sel, dan tiga buah sel.
3. Berdasarkan hasil penelitian parameter operasi optimal untuk PEMFC yang telah dibuat adalah sebagai berikut :

MEA (<i>t</i> _{hotpress})	1 menit
Tipe <i>stack</i>	single inlet
T _{humidifier}	45°C
Clamping force	20 kgf/cm ²

<i>Flow rate</i> _{1sel} H ₂ /O ₂	50/150 ml.min
<i>Flow rate</i> _{2sel} H ₂ /O ₂	100/250 ml/min
<i>Flow rate</i> _{3sel} H ₂ /O ₂	150/400 ml/min
Backpressure	15 Si

4. Berdasarkan hasil optimasi, *flow rate* hidrogen optimal untuk 1 buah sel PEMFC dengan area aktif seluas 9 cm² (3cm x 3cm) adalah 50 ml/min H₂, untuk dua buah sel adalah 100 ml/min H₂ dan untuk tiga buah sel adalah 150 ml/min H₂ (Ratio 1:2:3).
5. Berdasarkan hasil penelitian, penambahan jumlah sel meningkatkan tegangan reversibel (OCV) fuel cell sebesar *n* kali tegangan reversibel satu buah sel dengan nilai tegangan satu sel rata-rata 1.03 Volt.
6. Pada penelitian ini didapatkan fungsi jumlah sel terhadap kapasitas daya fuel sel *stack* adalah $1.356n^{1.968}$ dengan *n* merupakan jumlah sel.

5.2 Saran

Dalam rangka pengembangan penelitian, adapun saran yang dapat dilakukan dalam penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut

1. Melakukan pengukuran resistansi seluruh komponen guna menghasilkan nilai resistansi input yang sesuai .
2. Meningkatkan konduktivitas membran dengan cara meningkatkan suhu operasi, menggunakan membran yang lebih tipis, menaikkan *operating pressure* dan mengoptimasi kelembaban relatif.
3. Pada penelitian ini tidak dilakukan pengukuran suhu internal *stack* sehingga hasil optimasi *temperature humidifier* kurang optimal, dengan demikian untuk penelitian selanjutnya disarankan melakukan pengukuran suhu dalam *stack* guna mengetahui pengaruh *temperature humidifier*.

UCAPAN TERIMAKASIH

Kami ucapkan banyak terima kasih kepada Pusat Penelitian Fisika (PPF) LIPI yang memfasilitasi dan membantu kelancaran penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Science Applications International Corporation. *Fuel Cell Handbook (7th Edition)*. Morgantown, West Virginia: EG&G Services Parsons, Inc., 2004. (Spiegel, 2008)
- [2] JiuJun Zhang, PhD. *PEMFC Electrocatalyst and Catalyst Layer*. Canada: Springer, 2008.
- [3] Lin, J. C. (2003). *The Fuel Cell-An Ideal Chemical Engineering Undergraduate Experiment*. (p. 2313). America: Unniversity of Connecticut.

- [4] Spiegel, C. (2008). *PEM Fuel Cell Modelling and Simulation Using Matlab*. San Diego: Elsevier Inc.
- [5] Balkin, A. (2002). *Modelling A 500W Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell*. Sydney: Sydney University of Technology .
- [6] M. Tohidi, S.H Mansouri. "Effect of Primary Parameters on The Performance of Fuel Cell." *International Journal of HIDROGEN ENERGY*, 2010: 9342-9347.
- [7] Yuyun Irmawati, Indriyati, Achiar Oemry. "Effect of Hot Pressing Temperature On The Performance of Proton Exchange Membrane Fuel Cell Based On Gas Diffusion Electrode Carbon Paper and Carbon Cloth ." 2012: 85-89..
- [8] L.Napoli. (2014). Conductivity of Nafion 117 membrane used in polymer electrolyte fuel cells. *International Journal Of Hydrogen Energy*, 8656-8660.