

TPM 01

Kinerja Sel Tunggal Proton Pertukaran Membran *Fuel Cell* Terhadap Temperatur dan Tekanan

**Ellyta Sari, Mulyazmi, Reni Desmiarti, Elly Desni Rahman** Jurusan  
Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Bung Hatta Jl. Gajah  
Mada19 Gunung Pangilun Padang Sumatera Barat sariellyta@yahoo.com

**Abstrak**

Perkembangan teknologi energi terbarukan saat ini semakin pesat salah satunya yaitu *Fuel Cell*. *Fuel Cell* merupakan teknologi energi yang bersih, aman yang mempunyai kerapatan dan efisiensi energi tinggi, bertemperatur rendah, berdaya tinggi dan efisien. Salah satu cara pembuatan fuel cell dengan cara membuat media membran penukar proton dan dalam aplikasi sel bahan bakar yang disebut dengan *Proton Exchange Membrane Fuel Cell* (PEMFC) atau Sel Tunggal Proton Pertukaran Membran *FuelCell*. Tujuan penelitian ini yaitu mempelajari kinerja sel tunggal PEMFC untuk mendapatkan kondisi optimum terhadap variasi kondisi operasi dengan menggunakan software GUI MATLAB 7.10. Penentuan kinerja PEMFC ditunjukkan oleh nilai volt yang dihasilkan. Simulasi pada unit ini dilakukan terhadap variasi parameter RHA dan RHK dalam range 0 hingga 100%, Temperatur antara 323 K hingga 373 K, tekanan operasi di anoda (PA) dan di katoda (PK) 1atm hingga 2,5 atm, rasio stoikiometri hidrogen antara 1,2 hingga 1,8 dan oksigen antara 1 hingga 3. Kinerja sel tunggal PEMFC dipengaruhi oleh kehilangan nilai volt yang disebabkan oleh aktivasi, ohm dan konsentrasi. Pemodelan kehilangan nilai volt akibat aktivasi menggunakan nilai perubahan *current density* yang nilainya  $10^{-2}$  hingga  $10^{-8}$  A. Pengujian kinerja sel tunggal PEMFC dilakukan dengan melihat perubahan *current density* dari 0 hingga 1,6 A  $\text{cm}^{-2}$  pada berbagai variasi parameter terhadap nilai volt dan *current density* yang dihasilkan. Hasil dari penelitian ini didapatkan bahwa peningkatan temperatur akan meningkatkan kinerja PEMFC yaitu pada temperatur 90°C, tekanan 3 atm, kelembaban relatif di salah satu sisi elektroda yakni pada sisi katoda didapatkan kinerja PEMFC yang jauh lebih baik pada kelembaban relatif 100%, dengan perbandingan rasio stoikiometri yang dihasilkan 2,5 dan 3.

Kata kunci : GUI MATLAB, Membran Fuel Cell, Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC)

**1.0 PENDAHULUAN**

Krisis energi merupakan suatu permasalahan yang penting di dunia dan salah satunya termasuk Indonesia. Hal ini dikarenakan cadangan energi dunia yang sebagian besar berasal dari bahan fosil seperti: minyak bumi, batubara dan gas bumi mulai berkurang. Dalam hal ini juga termasuk energi listrik yang juga mengalami krisis, karena sebagian besar pembangkit listrik di Indonesia masih menggunakan sumber energi yang tak terbarukan

(bahan fosil).

Beberapa alternatif energi yang telah banyak diaplikasikan misalnya angin, biomassa, dan sebagainya terbukti mempunyai prospek yang bagus. Namun demikian masih perlu ditingkatkan efisiensi dan energi yang dapat dihasilkan. Salah satu energi alternatif yang ramah lingkungan tersebut ialah *Fuel Cell*

*Fuel Cell* merupakan teknologi energi terbaru yang bersih, aman mempunyai kerapatan dan efisiensi energi yang tinggi serta bekerja pada temperatur rendah, berdaya tinggi dan efisien. Teknologi sel bahan bakar yang sekarang tengah diupayakan yaitu pembuatan sel bahan bakar secara langsung, artinya bahan bakar hidrokarbon bisa langsung digunakan tanpa harus melalui suatu perangkat pendukung. Salah satu cara yang dapat dilakukan dengan membuat media membran penukar proton. Membran dalam aplikasi sel bahan bakar disebut juga dengan *Polymer Electrolyte Membrane* (Yang, 2005).

*Proton Exchange Membrane Fuel Cell* (PEMFC) atau Sel Tunggal Proton Pertukaran Membran *Fuel Cell* memiliki keunggulan berupa kerapatan daya yang tinggi, bekerja pada temperatur rendah, kemudahan bahan bakar, elektrolit padat yang tidak bersifat korosif. Dengan keunggulan ini, PEMFC cocok untuk diaplikasikan sebagai sumber energi pada transportasi, sistem pembangkit listrik, dan beberapa peralatan elektronik *portable*. Walaupun demikian, studi tentang model dan karakteristik dari berbagai macam tipe sel bahan bakar khususnya tipe PEMFC, masih dibutuhkan dalam rangka memperoleh desain atau rancangan sel bahan bakar yang layak baik dari segi teknis maupun ekonomis (Correa, et.al.,2004). Hal ini dikarenakan PEMFC bekerja pada temperatur rendah, dan menghasilkan daya yang tinggi, maka hal ini sangat mempengaruhi kepada performa PEMFC itu sendiri. Untuk itu perlu dilakukan pembahasan dan kajian mengenai pengaruh kondisi operasi seperti temperatur, tekanan, kelembaban relatif (*Relative Humidity*), rasio stoikiometri hidrogen dan oksigen yang diumpankan terhadap kinerja PEMFC tersebut.

Reaksi yang terjadi didalam PEMFC menghasilkan air, sehingga keberadaan air (kelembaban) didalam stack PEMFC. Dan memberikan efek tersendiri terhadap kinerja PEMFC. Jika Kelembaban rendah, maka akan terjadi keretakan pada membrane (kekeringan). Sedangkan jika kelembaban tinggi mengakibatkan temperatur operasi PEMFC menjadi rendah, laju alir rendah sehingga tekanan gas juga menurun. Kinerja PEMFC yang dipengaruhi oleh kelembaban (*Relative Humidity*) ini sangat berpengaruh pada kelembaban di anoda (RHA) dan kelembaban di katoda (RHK).

Berdasarkan permasalahan diatas maka penting dilakukan pengkajian pengaruh tekanan, temperatur, kelembaban relatif dan rasio stoikiometri hidrogen dan oksigen yang diumpankan terhadap kinerja stack PEMFC untuk mencapai keadaan optimumnya.

Beberapa penelitian sebelumnya sehubungan dengan Kinerja dari *Proton Exchange Membrane Fuel Cell*di antaranya adalah :

- Zenith, Federico (2007), melakukan penelitian komponen-komponen dinamis secara simulasi pada *stack fuel cell* meliputi tekanan gas, aliran udara untuk mengontrol temperatur, intinya mensimulasikan input campuran udara dan gas pada katoda.
- Kaytakoglu & Akyalçın (2007) mempelajari keadaan operasi untuk mencapai performa optimum diperoleh pada tekanan 5 bar, rasio stoikiometri kadar alir hidrogen dan oksigen (1:2), temperatur operasi 75°C dan kelembaban relative 75%. *Power density*



- maksimal  $353 \text{ mW cm}^{-2}$ , tetapi setelah pembuktian penyelidikan didapat nilainya sebesar  $379.64 \text{ mW cm}^{-2}$ .
- c. Danar (2008) : Untuk memperoleh daya maksimum 3500 Watt dibutuhkan gas hidrogen 234 gram/jam. Untuk menghasilkan daya maksimum 5500 Watt dibutuhkan gas hidrogen 378 gram/jam dengan kondisi yang paling baik saat tekanan 3 atm dan temperatur  $353^{\circ}\text{K}$ . Air yang dihasilkan oleh PEMFC cukup besar yaitu 0,325 liter/jam untuk kapasitas 3 KW dan 0,5 liter/jam untuk kapasitas 5 KW. Oleh karenanya diperlukan pengaturan (kontrol) agar air yang dihasilkan tidak merusak PEMFC (seperti kebanjiran).
  - d. Davor Zivko (2007) : Penurunan kelembaban membran 1% akan menyebabkan penurunan daya sel bahan bakar untuk 0,67%. Jika menurunkan kelembaban relatif membran 90%, output daya sel bahan bakar akan menurun sebesar 4,11% dan Jika menurunkan kelembaban relatif membran 80%, output daya sel bahan bakar akan menurun sebesar 22,63. Kelembaban membran sel bahan bakar membutuhkan pemantauan khusus karena kemungkinan kerusakan pada sel bahan bakar yang disebabkan oleh humidifikasi membran yang tidak benar, tetapi variasi kelembaban membran yang kecil tidak akan menyebabkan perubahan signifikan dalam daya output.
  - e. Chaojie Songa (2006) : Pengaruh *Relative Humidity* (RH) pada kinerja sel bahan bakar PEM dipelajari di temperatur yang tinggi di bawah *ambien backpressure* menggunakan Nafionbased MEA. Hasil penelitian menunjukkan bahwa parameter kinetik untuk sel bahan bakar PEM dalam kisaran temperatur  $23\text{-}120^{\circ}\text{C}$ . Peningkatan temperatur menyebabkan peningkatan kinerja sel bahan bakar dari temperatur kamar hingga  $80^{\circ}\text{C}$ , pada kerapatan arus yang rendah, peningkatan temperatur menyebabkan penurunan kinerja, dan pada kepadatan arus tinggi, peningkatan temperatur menyebabkan peningkatan kinerja. Kinerja terbaik diamati sekitar  $80^{\circ}\text{C}$  dengan 3 atm *backpressure* mutlak dan 100% RH (*Relative Humidity*). Sebuah tekanan balik yang lebih tinggi selalu memberikan kinerja yang lebih baik.
  - f. Mulyazmi (2013) : Kenaikan performa lebih besar dipengaruhi oleh kenaikan nilai RHK dibandingkan kenaikan nilai RHA. Performa yang tinggi pada 0,6 V ditunjukkan oleh nilai RHA 70% hingga 90 % dan RHK 90%. Kenaikan tekanan di katoda menyebabkan peningkatan performa yang signifikan dibandingkan peningkatan tekanan di anoda. Tegangan 0.6 V dicapai pada tekanan anoda 1atm dan tekanan di katoda 2,5 atm. Kenaikan temperatur dari 353 K ke 363 K mengakibatkan sedikit kenaikan performa, rata-rata untuk 0,6 V kenaikan current density dari  $1,0684 \text{ Acm}^{-2}$  hingga  $1.082 \text{ Acm}^{-2}$ .

Salah satu faktor yang sangat mempengaruhi kinerja PEMFC adalah kandungan kadar air di dalam membran, Woonki Na dan Bei Gou (2008), menyebutkan terdapat beberapa strategi alternatif yang telah dikembangkan untuk meningkatkan kinerja sistem secara optimal yaitu penentuan keseimbangan air dalam sistem berdasarkan pada fenomena transportasi air danngan bervariasi parameter operasi untuk menentukan pengaruhnya terhadap kinerja sel tunggal PEMFC.

Pereaksian antara hidrogen dan oksigen di dalam *Proton Exchange Membrane Fuel Cell* (PEMFC) menghasilkan air, sehingga keberadaan air (kelembaban) didalam stack PEMFC ini memiliki efek terhadap kinerja PEMFC. Jika Kelembaban rendah maka akan menyebabkan keretakan pada membran dikarenakan mengalami kekeringan. Sedangkan jika kelembaban tinggi akan mengakibatkan temperatur operasi PEMFC menjadi rendah, laju alir rendah sehingga tekanan gas juga menurun. Namun disisi lain, *Proton Exchange*



*Membrane Fuel Cell (PEMFC)* bekerja pada temperatur rendah dan menghasilkan daya yang tinggi,

Berdasarkan permasalahan yang telah diuraikan, maka perlu dilakukan pembahasan dan kajian mengenai pengaruh tekanan dan temperatur serta kelembaban relatif serta rasio stoikiometri hidrogen dan oksigen yang diumpangkan terhadap kinerja stack PEMFC untuk mencapai keadaan optimumnya. Dan aplikasi langsungnya cukup mahal, maka perlu terlebih dahulu dilakukan simulasi pengaruh variasi kondisi operasi terhadap kinerja dari sel tunggal PEMFC menggunakan software. Tujuan dari Penelitian ini yaitu untuk mendapatkan kondisi optimum dari sel tunggal PEMFC berdasarkan pengaruh variasi kondisi operasi seperti tekanan, temperatur, kelembaban relatif dan rasio stoikiometri hidrogen dan oksigen yang diumpangkan terhadap kinerja sel tunggal *Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC)* menggunakan software MATLAB 7.10.

## 2.0 METODOLOGI

Rancangan dan tahapan yang dilakukan untuk mendapatkan kondisi optimum dari sel tunggal PEMFC sangat dipengaruhi oleh kondisi operasinya. Faktor-faktor yang berpengaruh terhadap kinerja sel tunggal PEMFC adalah kondisi operasi seperti tekanan dan temperatur, kelembaban relatif dan rasio stoikiometri hidrogen dan oksigen yang diumpangkan. Langkah-langkah yang dilakukan ialah :

1. Pembuatan model rancangan pada unit sel PEMFC dengan menggunakan hidrogen murni dan udara sebagai reaktan.
2. Penyelesaian permodelan dengan menggunakan software GUI Matlab.
3. Menganalisa hasil simulasi.
4. Menvalidasi model dengan hasil penelitian peneliti lain

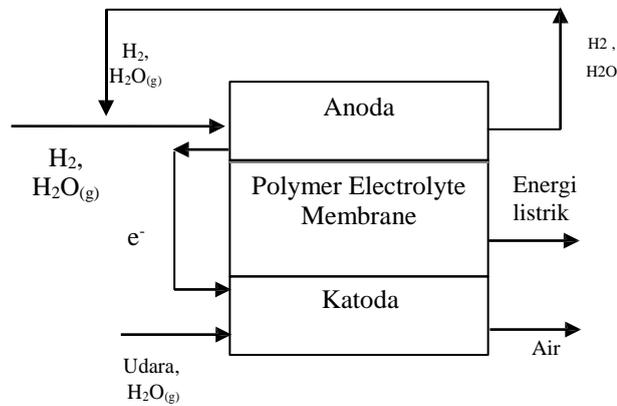
### 2.1. Rancangan Sistem Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC)

*Stack fuel cell* terdiri dari dua elektroda, anoda dan katoda. Keduanya dipisahkan oleh *Polymer Electrolite Membrane*. Setiap elektroda dilapisi dengan *platinum-based catalyst*. Hidrogen (sebagai bahan bakar) bertekanan dilewatkan ke anoda, Oksigen (sebagai oksidan) diambil dari udara dengan menggunakan kompresor yang tersedia dialirkan ke katoda. Stack PEMFC ini berguna untuk mereaksikan Hidrogen dengan Oksigen menghasilkan arus listrik.

Rancangan proses sistem menggunakan hidrogen langsung dan oksigen dari udara sebagai reaktan diperlihatkan pada Gambar 1. Sel tunggal atau *stack* PEMFC menggunakan reaktan berupa hidrogen murni dan mengalir masuk ke dalam sisi anoda. Sedangkan gas reaktan lainnya adalah udara sebagai sumber oksigen yang mengalir masuk ke dalam sisi katoda.

Pada sisi anoda terjadi perpindahan uap air yakni uap air bersama dengan proton berpindah melewati membran polimer elektrolit dari anoda ke katoda. Pada sisi katoda udara yang mengandung uap air juga mengalir masuk, dan terjadi reaksi kimia yang menghasilkan arus listrik, panas dan uap air. Jika konsentrasi uap air pada sisi katoda lebih besar daripada konsentrasi uap air di sisi anoda, maka berlaku resapan balik uap air dari sisi katoda ke sisi anoda.





**Gambar 1.** Diagram Rancangan Proses Sel Tunggal pada Sistem PEMFC

Variasi kondisi operasi pada sel tunggal PEMFC. Tahapan pertama, kelembaban relatif gas hidrogen dan udara yang mengalir masuk ke dalam sistem PEMFC divariasikan mulai daripada 0 hingga 100%. Selanjutnya temperatur masing-masing kondisi operasi PEMFC dibedakan dari 323 hingga 373 K. Sedangkan nilai tekanan pada masing-masing sisi PEMFC juga di variasikan dari 1 hingga 3 atm.

Hidrogen dan udara yang mengalir masuk ke dalam PEMFC biasanya disuplai dalam jumlah berlebih. Variasi rasio stoikiometri terhadap gas hidrogen dan oksigen dilakukan untuk mengetahui pengaruhnya terhadap kinerja sistem PEMFC yang dihasilkan. Rasio stoikiometri dari hidrogen dan oksigen yang ditetapkan adalah 1,2-1,8 dan untuk Hidrogen dan 1-3 untuk Oksigen.

## 2.2. Penetapan Asumsi Sistem

Penetapan asumsi dijalankan dengan menggunakan permodelan matematik dan model dalam 1 dimensi (bentuk grafik) untuk melihat hasil dari pengaruh kondisi operasi terhadap kinerja sel tunggal PEMFC. Parameter yang terlibat antara lain temperatur PEMFC, tekanan operasi, kelembaban relatif, rasio stoikiometri reaktan dan sebagainya menggunakan beberapa pemisalan dalam membangun rancangan sistem PEMFC, yaitu :

1. Gas reaktan yang diumpankan adalah gas reaktan yang telah dilembabkan maupun dipanaskan terlebih dahulu.
2. Semua gas reaktan di sistem PEMFC gas ideal.
3. Penurunan tekanan di dalam sel diabaikan.
4. Sistem PEMFC dalam keadaan tetap
5. Stek PEMFC adalah temperatu tetap.
6. Parameter-parameter disisi Anoda diabaikan.
7. Air yang masuk ke sistem PEMFC dalam fasa gas.
8. Permodelan matematik dengan software GUI Matlab.

### 2.3. Permodelan Metematik

Pemodelan matematik bertujuan untuk memperoleh kinerja sel tunggal PEMFC yaitu berupa nilai volt (V) dan nilai *current density* (I). Pembangunan model matematik ada beberapa unit yaitu : Pemodelan tentang nilai volt yang dapat balik, Pemodelan tentang kehilangan nilai volt yang diakibatkan oleh aktivasi, ohm dan konsentrasi.

Nilai tegangan pada masing-masing sel pada sistem PEMFC ditentukan berdasarkan nilai maksimum tegangan sel dan kehilangan tegangan. Kehilangan tegangan pada PEMFC meliputi kehilangan tegangan yang diakibatkan oleh pengaktifan (*activation*), ohm (*ohmic*), konsentrasi (*concentration*) dan kehilangan arus dalam. Bentuk kerugian arus terintegrasi dengan kehilangan tegangan. Nilai tegangan sel pada pengendalian sistem PEMFC (Mert et al. 2012 dalam Mulyazmi, 2013) yaitu:

$$V_{operasi} = V_{rev} - V_{irrev} \quad (1)$$

$$V_{irrev} = V_{act} - V_{ohm} - V_{con} \quad (2)$$

#### A. Tegangan Sel Reversible ( $V_{rev}$ )

Tegangan sel reversible ialah tegangan maksimum PEMFC secara teori yang diperoleh pada temperatur dan tekanan tertentu. Pada keadaan tersebut *Fuel Cell* bebas dari beban. Hubungan antara kerja elektrik maksimum  $W_{el}$  dengan tenaga bebas gibbs untuk suatu proses ialah:

$$W_{el} = -\Delta G \quad (3)$$

Tenaga bebas gibbs ialah tenaga yang tersedia untuk melakukan kerja luaran, dengan mengabaikan setiap kerja yang dilakukan oleh perubahan tekanan. Berdasarkan hukum kedua termodinamik, kerja elektrik maksimum dapat ditulis menjadi :

$$W_{el} = -\Delta G = -(\Delta H - T\Delta S) \quad (4)$$

$\Delta G_f$  yaitu perubahan tenaga bebas gibbs untuk pembentukan yang nilainya sama dengan tenaga di produk  $\Delta G_f^{product}$  dikurang tenaga di bahan Reaksi  $\Delta G_f^{reactan}$  dan bentuk persamaannya sebagai berikut:

$$\Delta G_f = \Delta G_f^{product} - \Delta G_f^{reactan} \quad (5)$$

Sedangkan untuk nilai entropi pembentukan ialah:

$$\Delta S_f = \Delta S_f^{product} - \Delta S_f^{reactan} \quad (6)$$

Nilai entalpi dan entropi pembentukan untuk PEMFC dan ditunjukkan pada Tabel 1 (Barbier 2005).

Nilai potensial elektrik secara teori untuk PEMFC ialah:

$$E = \frac{-\Delta G}{nF} \quad (7)$$

Atau

$$E = -\left(\frac{\Delta H}{nF} - \frac{T\Delta S}{nF}\right) \quad (8)$$

Tabel 1. Nilai Entalpi dan Entropi Pembentukan PEMFC

Komponen	$H_f$ (Kj/mol)	$S_f$ (Kj/mol K)
H <sub>2</sub>	0	0,13066
O <sub>2</sub>	0	0,20517
H <sub>2</sub> O(g)	-286,02	0,06996

Pada keadaan optimal, maka nilai kemampuan elektrik PEMFC (Chen & Peng 2008) yaitu :

$$E = \frac{-\Delta G_f^0}{nF} = \frac{237.340 \text{ KJmol}^{-1}}{2 \text{ mol} \times 96.485 \text{ Cmol}^{-1}} = 1.229V$$

pada temperatur 25°C dan tekanan 1 atm. Nilai potensial elektrik berubah dengan berubahnya temperatur operasi. Menurut C. Spiegel (2008) bahwa asumsi perubahan entalpi tidak berubah dengan perubahan temperatur, maka nilai potensi elektrik sebagai fungsi temperatur ialah:

$$E = -\frac{\Delta G_{rxn}}{nF} = -\left(\frac{\Delta H}{nF} - \frac{T\Delta S}{nF}\right)$$

menjadi :

$$\Delta E = \left(\frac{dE}{dT}\right)(T - 298.15) = \frac{\Delta S}{nF}(T - T_0)$$

$T$  = temperatur PEMFC (K) dan  $T_0$  = temperatur rujukan (K)

Maka potensial elektrik sebagai fungsi temperatur ( $E_T$ ) adalah:

$$E_T = E^0 + \frac{\Delta S}{nF}(T - T_0) \quad (9)$$

Maka tegangan reversible untuk PEMFC ialah (Chen & Peng 2008; Placca et al. 2009; Shaker 2011)

$$V_{rev} = E_T + \frac{RT}{nF} \ln \left( \frac{P_{H_2} x(P_{O_2}^{0.5})}{P_{H_2O}} \right) \quad (10)$$

Nilai potensial elektrik pada keadaan optimal adalah :

$$E^0 = -\frac{\Delta G_f^0}{nF}$$

Maka nilai potensial elektrik PEMFC berdasarkan persamaan (9) ialah:

$$E_T = -\frac{\Delta G_f^0}{nF} + \frac{\Delta S}{nF}(T - T_0) \quad (11)$$

$$E_T = 1.229V + \frac{163.25 \text{ J}}{2 \times 96487 \frac{\text{C}}{\text{mol}}} E_T = 1.229V - 0.85 \times 10^{-3}(T - T_0) \text{ V/K}$$

Maka nilai tegangan reversible pada PEMFC dengan mengganti persamaan (10) ke persamaan (11) menjadi:

$$V_{rev} = 1.229V - 0.85 \times 10^{-3}(T - T_0) + \frac{RT}{nF} \ln \left( \frac{P_{H_2} x(P_{O_2}^{0.5})}{P_{H_2O}} \right)$$

atau

$$V_{rev} = 1.229V - 0.85 \times 10^{-3}(T - T_0) + 4.31 \times 10^{-5} x T x \ln(P_{H_2} x(P_{O_2}^{0.5}))$$

B. Tegangan Aktivasi ( $V_{act}$ )

Menurut Inoue et al. (2006) dan Song et al. (2004) dalam Mulyazmi, 2013 nilai kepadatan arus ialah:

$$i_{0,ref} = 10^{(3.057 - \frac{4001}{T})}$$

Nilai kepadatan arus berdasarkan persamaan

$$i = nFk_0 \left( C_{O_2} \exp\left(\frac{-\alpha FE}{RT}\right) - C_{H_2} \exp\left(\frac{(1-\alpha)FE}{RT}\right) \right) \quad (13)$$

Maka tegangan aktivasi pada PEMFC ialah :

$$V_{act} = \frac{RT}{n\alpha F} \ln\left(\frac{i}{i_0}\right) \quad \text{dimana } i > i_0 \quad (14)$$

Menurut Görgün et al. (2006) dalam Mulyazmi, 2013 besarnya nilai  $i_0$  bergantung kepada temperatur, tekanan, jenis katalis yang digunakan, luas permukaan tertentu dan muatannya (*loading*). Nilai  $i_0$  ini nilainya ialah  $10^{-2}$  A hingga  $10^{-8}$  A. Nilai konstanta Tafel yaitu:

$$b = \frac{RT}{n\alpha F} \quad (15)$$

Pada rancangan model sistem PEMFC, nilai konstanta Tafel berdasarkan data penyelidikan yang dilakukan oleh Mann et al. (2006) dalam Mulyazmi, 2013 ialah:

$$b = 0.1937 e^{-2.197(\alpha)} \quad (16)$$

$\alpha$  ialah koefisien pertukaran, yang nilainya adalah :

$$\alpha = (0.001552 RH_{c,masuk} + 0.000139)T \quad (17)$$

$RH_{c,masuk}$  ialah kelembaban relatif yang mengalir masuk ke dalam sisi katoda PEMFC.

#### C. Tegangan Ohm ( $V_{ohm}$ )

Kehilangan yang disebabkan oleh tahanan ohm berlaku di membran dan lapisan katalis dan merupakan fungsi temperatur dan kelembaban (Scott & Mamlouk 2009). Jumlah kehilangan tegangan di dalam PEMFC ialah merupakan fungsi linier (Abdellah 2012). Besarnya nilai tegangan ohm menurut (Kunusch et al. 2010) ialah:

$$V_{ohm} = i R_{ohm} \quad (18)$$

Sedangkan nilai  $R_{ohm}$

$$R_{ohm} = \frac{t_m}{\sigma_m} \quad (19)$$

Nilai kekonduksian membran ialah (Shan & Choe 2005; Zhang et al. 2010):

$$\sigma_m = (0.005139 \lambda_m - 0.003260) \exp\left[1268 \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T}\right)\right] \quad (20)$$

Besarnya nilai kandungan air membran adalah:

$$\lambda_m = 0.048 + 17.81RH - 39.83RH^2 + 39.85RH^3 \quad (21)$$

$\alpha$  adalah merupakan rata-rata kelembaban nisbi di dalam stek PEMFC.

#### D. Tegangan Konsentrasi ( $V_{conc}$ )

Kehilangan kemampuan konsentrasi di dalam PEMFC berlaku akibat reaksi pada elektroda dihalangi oleh perpindahan massa bahan Reaksi di dalam PEMFC (Abdellah 2012). Pada kasus ini berlakunya kekurangan bahan Reaksi yang diperlukan untuk melakukan Reaksi. Nilai kemampuan konsentrasi menurut (Shaker 2011) ialah:

$$V_{conc} = c \ln\left(\frac{i_L}{i_L - i}\right) \quad (22)$$

$c$  ialah konstanta kehilangan oleh konsentrasi. Besarnya nilai  $c$  ialah:

$$c = \frac{RT}{nF} \quad (23)$$

Maka nilai kemampuan konsentrasi ialah:

$$V_{conc} = \frac{RT}{nF} \ln \left( \frac{i_L}{i_L - 1} \right) \quad (24)$$

$i_L$  ialah nilai maksimum kepadatan arus yang dapat di nyatakan oleh PEMFC.

Besarnya batasan nilai kepadatan arus yang dimiliki oleh stek PEMFC ialah (C. Spiegel 2008) :

$$i_L = nF h_m \left( \frac{c_{O_2, in} - c_{O_2, out}}{\ln \frac{c_{O_2, in}}{c_{O_2, out}}} \right) \quad (25)$$

$c_{O_2, in}$  dan  $c_{O_2, out}$  ialah konsentrasi oksigen yang mengalir masuk dan keluar PEMFC (mol)

$h_m$  ialah koefisien perpindahan massa konveksi. Nilai koefisien perpindahan massa konveksi ialah (B. Tavakoli 2011):

$$h_m = \frac{5RfD_{ij}}{H_c} \quad (26)$$

#### E. Komponen yang Mengalir Masuk ke Dalam PEMFC

Dalam Mulyazmi (2013) Konsentrasi hidrogen  $\mathcal{N}_{H_2}$  yang disuplai masuk ke dalam anoda *fuel cell* ialah:

$$\mathcal{N}_{H_2} = \frac{i}{2F} \quad (27)$$

$F$  = konstanta faraday, 96485 C/mol elektron

$i$  = kepadatan arus (A cm<sup>-2</sup>)

Stoikiometri hidrogen  $\delta_{H_2}$  pada aliran masuk anoda yang di perlukan ialah:

$$\delta_{H_2} = \frac{\mathcal{N}_{H_2 \text{ bekalan}}}{\mathcal{N}_{H_2}} \quad (28)$$

Atau:

$$\mathcal{N}_{H_2} = \frac{\mathcal{N}_{H_2 \text{ bekalan}}}{\delta_{H_2}} \quad (29)$$

$$\frac{\mathcal{N}_{H_2 \text{ bekalan}}}{\delta_{H_2}} = \frac{i}{2F} \quad (30)$$

$$\mathcal{N}_{H_2} = \delta_{H_2} \frac{i}{2F} \quad (31)$$

Konsentrasi hidrogen yang mengalir masuk ke dalam anoda *fuel cell* ialah jumlah hidrogen yang diperlukan perkalian dengan nilai nisbah stoikiometri dan jumlah sel pada stek PEMFC.

$$\mathcal{N}_{H_2 \text{ masuk}} = \mathcal{N}_{H_2} \cdot \delta_{H_2} \cdot n_{\text{cell}} \quad (32)$$

$$\mathcal{N}_{H_2 \text{ masuk}} = \frac{i}{2F} \delta_{H_2} \cdot n_{\text{cell}} \quad (33)$$

$n_{\text{cell}}$  adalah jumlah sel

Atau:

$$\frac{m_{H_2 \text{ masuk}}}{M_r H_2} = \frac{i}{2F} \delta_{H_2} \cdot n_{\text{cell}} \quad (34)$$

Kadar gas oksigen yang mengalir masuk ke dalam sel adalah berdasarkan perbandingan stoikiometri Reaksi, maka konsentrasi oksigen  $\mathcal{N}_{O_2}$  yang mengalir masuk ke dalam sisi katoda ialah:

$$\mathcal{N}_{O_2 \text{ masuk}} = \delta_{O_2} \cdot \mathcal{N}_{O_2} \cdot n_{\text{cell}} \quad (35)$$

Dimana :

$$\mathcal{N}_{O_2} = \frac{I}{4F}$$

Nilai stoikiometri ialah:

$$\delta_{O_2} = \frac{\mathcal{N}_{O_2 \text{ bekalan}}}{\mathcal{N}_{O_2}} \quad (36)$$

Bahagian oksigen berlebih  $\varepsilon$  ialah:

$$\varepsilon = \frac{\mathcal{N}_{O_2 \text{ supply}} - \mathcal{N}_{O_2}}{\mathcal{N}_{O_2}} \quad (37)$$

$$\varepsilon = \delta_{O_2} - 1 \quad (38)$$

Persamaan (13) dimasukkan ke persamaan (12) maka konsentrasi oksigen  $\mathcal{N}_{O_2 \text{ masuk}}$  yang mengalir masuk katoda adalah sebagai berikut:

$$\mathcal{N}_{O_2 \text{ masuk}} = \delta_{O_2} \frac{I}{4F} n_{\text{cell}} \quad (39)$$

Persamaan (3-14) dapat dikembangkan lagi menjadi:

$$\mathcal{N}_{O_2 \text{ masuk}} = \delta_{O_2} \mathcal{N}_{O_2} n_{\text{cell}} \quad (40)$$

Atau:

$$m_{O_2 \text{ masuk}} = \frac{M_r \cdot O_2 \cdot \delta_{O_2} \cdot n_{\text{cell}}}{4F} \quad (41)$$

$M_r$  = molekul relatif

Konsentrasi udara yang mengalir masuk katoda  $\mathcal{N}_{\text{udara masuk}}$  ialah:

$$\mathcal{N}_{\text{udara masuk}} = \delta_{O_2} \cdot \mathcal{N}_{\text{udara}} \cdot n_{\text{cell}} \cdot \frac{1}{X_{\text{mol } O_2}} \quad (42)$$

$X_{\text{mol } O_2}$  = pecahan mol oksigen

$$\mathcal{N}_{\text{udara masuk}} = \delta_{O_2} \cdot \frac{I}{4F} \cdot n_{\text{cell}} \cdot \frac{1}{X_{O_2}} \quad (43)$$

Konsentrasi nitrogen  $\mathcal{N}_{N_2 \text{ masuk}}$  yang mengalir masuk ke dalam katoda PEMFC ialah:

$$\mathcal{N}_{N_2 \text{ masuk}} = \delta_{O_2} \cdot \frac{I}{4F} \cdot n_{\text{cell}} \cdot \frac{1 - X_{\text{mol } O_2}}{X_{\text{mol } O_2}} \quad (44)$$

#### 2.4. Algoritma Penyelesaian Model

Pemodelan matematik dapat menjelaskan tentang kinerja sel tunggal PEMFC. Penentuan kinerja PEMFC ditunjukkan oleh nilai volt yang dihasilkan. Simulasi dilakukan terhadap variasi parameter RHA dan RHK dalam range 0 hingga 100%, temperatur PEMFC antara 323 K hingga 373 K, tekanan operasi di anoda (PA) dan di katoda (PK) dalam range 1 hingga 2,5 atm, rasio stoikiometri hidrogen dalam range 1,2 hingga 1,8 dan oksigen dalam range 1 hingga 3. Kinerja sel tunggal PEMFC dipengaruhi oleh kehilangan nilai volt yang disebabkan oleh aktivasi, ohm dan konsentrasi. Pemodelan kehilangan nilai volt akibat aktivasi menggunakan nilai perubahan *current density* yang nilainya  $10^{-2}$  hingga  $10^{-8}$  A.

Pengujian kinerja sel tunggal PEMFC dilakukan dengan melihat perubahan *current density* dari 0 hingga 1,6 A cm<sup>-2</sup> pada berbagai variasi parameter terhadap nilai volt dan *current density* yang dihasilkan. Tahapan ini juga dilakukan variasi parameter kelembaban relatif dan temperatur PEMFC. Sedangkan tekanan dan rasio stoikiometri dijaga tetap.

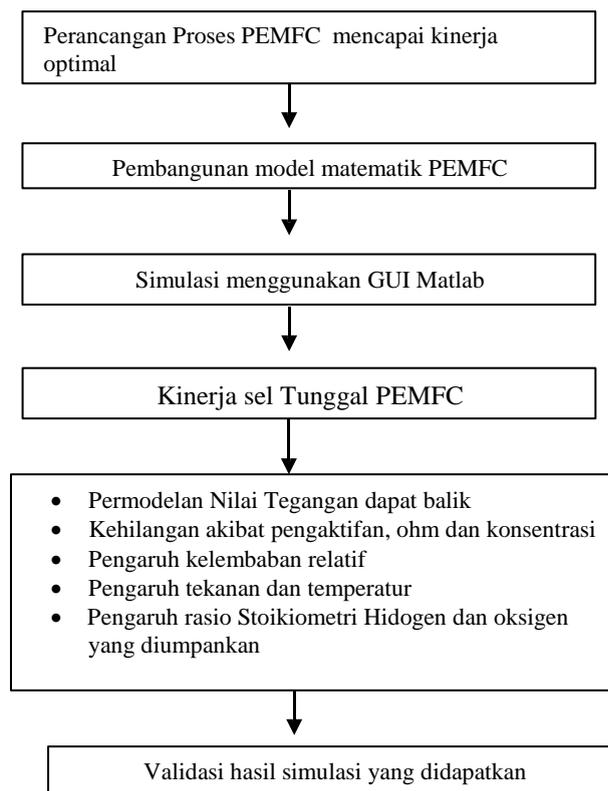
## 2.5. Penyelesaian Model

Pemodelan matematik yang telah dibangun pada rancangan sistem PEMFC dilakukan dengan menggunakan software GUI Matlab. Software ini berguna untuk menjalankan persamaan persamaan yang dalam bentuk blok – blok simulasi.

## 2.6. Validasi Model Terhadap Hasil Penelitian

Hasil penelitian yang diperoleh terhadap beberapa objektif penelitian menggunakan software GUI Matlab dilakukan validasi dengan membandingkan terhadap hasil penelitian yang diperoleh oleh peneliti sebelumnya.

Diagram alir metodologi rancangan pengaruh kondisi operasi terhadap kinerja sel tunggal PEMFC ditunjukkan oleh Gambar 2.



Gambar 2. Diagram Alir Metodologi Rancangan Proses Sel Tunggal Pada Sistem PEMFC

## 3.0 HASIL DAN VALIDASI

### 3.1. Hasil

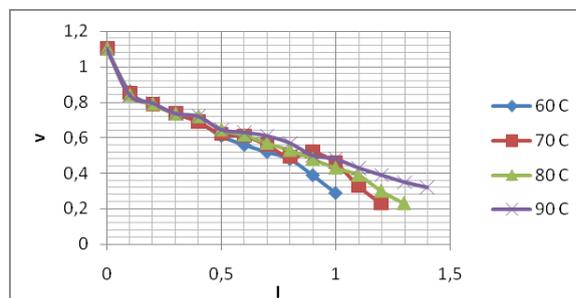
Hasil simulasi pengaruh kondisi operasi terhadap kinerja sel tunggal (*stack*) PEMFC yang diperoleh menggunakan software GUI Matlab akan divalidasikan dengan

membandingkan hasil penelitian peneliti lain yaitu penelitian Wei Yuan et al (2008) dan Ai jen Hung (2007). Parameter yang digunakan pada penelitian Wei Yuan et al (2008) dan Ai jen Hung (2007) dapat dilihat pada Tabel 2.

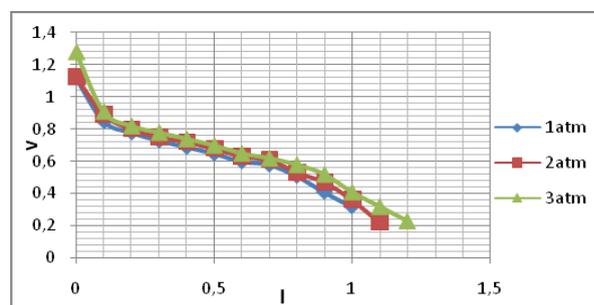
**Tabel 2.** Parameter pembandingan yang digunakan pada penelitian

No	Parameter	Ai Jen Hung et al	Wei Yuan et al
1.	Tekanan Anoda	1 atm	2 atm
2.	Tekanan Katoda	1atm	2 atm
3	Kelembaban Relatif	40%, 70%	100%
4.	Temperatur	60°C	70°C
5.	Stoikiometri H <sub>2</sub>	1,5	1,5
6.	Stoikiometri O <sub>2</sub>	2,5	2

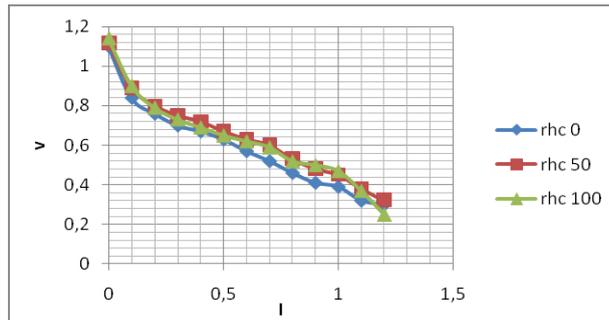
Pengolahan data dengan GUI Matlab dan hasilnya berbentuk kurva polarisasi yang berupa simulasi pengaruh kondisi operasi terhadap kinerja sel tunggal (*stack*) PEMFC. Bentuk kurva polarisasi untuk beberapa parameter dapat dilihat pada Gambar 3, 4, 5 dan 6.



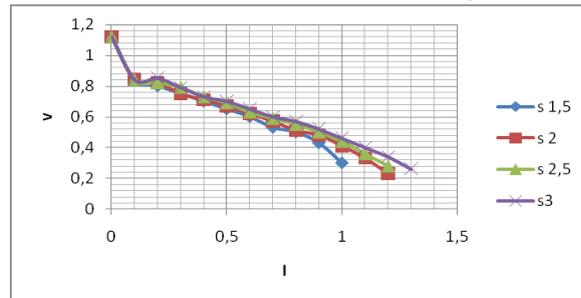
**Gambar 3.** Kurva polarisasi PEMFC dengan berbagai temperatur



**Gambar 4.** Kurva polarisasi PEMFC berbagai tekanan



Gambar 5. Kurva polarisasi PEMFC dengan variasi RHc

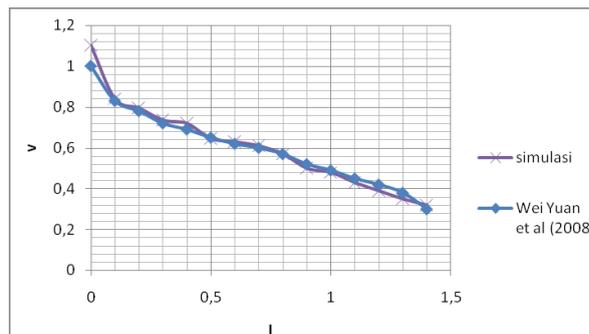


Gambar 6. Kurva polarisasi PEMFC dengan variasi rasio stoikiometri

### 3.2. Validasi Hasil Simulasi

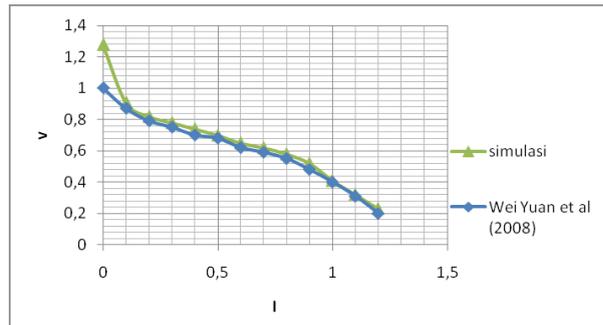
#### 3.2.1. Validasi terhadap hasil penelitian Wei Yuan et al (2008)

Kurva polarisasi PEMFC dengan temperatur ( $90^{\circ}\text{C}$ ) pada keadaan tekanan 2 atm, RHa & RHc 100% dan  $S_{\text{O}_2}$  2 yang dilakukan pada penelitian ini menghasilkan trend kurva yang sama dengan trend kurva polarisasi yang didapatkan oleh Wei Yuan et al (2008). Kurva polarisasi PEMFC dengan variasi temperatur yang didapatkan oleh Wei Yuan et al (2008) dapat dilihat pada Gambar 7.



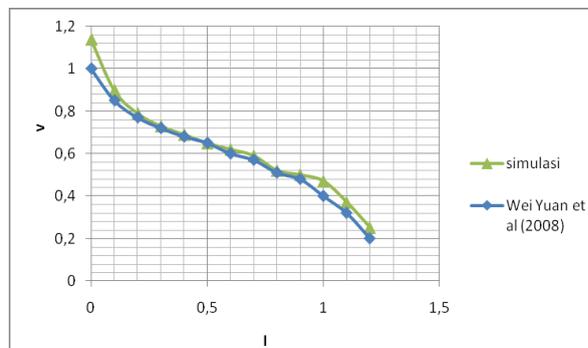
Gambar 7. Kurva polarisasi PEMFC dengan terhadap temperatur oleh Wei Yuan et al (2008)

Sedangkan kurva polarisasi PEMFC dengan tekanan 3 atm pada keadaan temperatur  $90^{\circ}\text{C}$ , RHa & RHc 100% dan  $S_{\text{O}_2}$  2 yang dilakukan pada penelitian ini menghasilkan trend kurva yang sama dengan trend kurva polarisasi yang didapatkan oleh Wei Yuan et al (2008). Kurva polarisasi PEMFC dengan variasi tekanan yang didapatkan oleh Wei Yuan et al (2008) dapat dilihat pada Gambar 8.



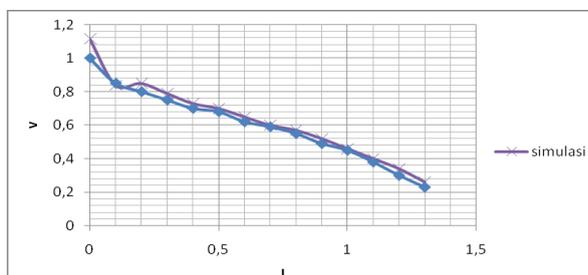
**Gambar 8.** Kurva polarisasi PEMFC dengan tekanan 3 atm oleh Wei Yuan et al (2008)

Untuk kurva polarisasi PEMFC dengan kelembaban relatif 100 % pada sisi katoda pada keadaan temperatur 70°C, RHa 100% dan S O<sub>2</sub> 2 yang dilakukan pada penelitian ini menghasilkan trend kurva yang sama dengan trend kurva polarisasi yang didapatkan oleh Wei Yuan et al (2008). Kurva polarisasi PEMFC dengan variasi kelembaban relatif pada sisi katoda yang didapatkan oleh Wei Yuan et al (2008) dapat dilihat pada Gambar 9.



**Gambar 9.** Kurva polarisasi PEMFC dengan kelembaban relatif 100 % pada sisi katoda oleh Wei Yuan et al (2008)

Untuk kurva polarisasi PEMFC dengan rasio stoikiometri 2 pada keadaan temperatur 70°C, RHa & RHc 100% dan tekanan 2 atm yang dilakukan pada penelitian ini menghasilkan trend kurva yang sama dengan trend kurva polarisasi yang didapatkan oleh Wei Yuan et al (2008). Kurva polarisasi PEMFC dengan variasi rasio stoikiometri yang didapatkan oleh Wei Yuan et al (2008) dapat dilihat pada Gambar 10.



**Gambar 10.** Kurva polarisasi PEMFC dengan rasio stoikiometri 2 oleh Wei Yuan et al (2008)

Dari kurva-kurva polarisasi yang dihasilkan dapat dilihat bahwa, walaupun pada penelitian ini menghasilkan trend kurva yang sama dengan penelitian Wei Yuan et al (2008), pada penelitian ini didapatkan kinerja PEMFC sedikit lebih baik. Hal ini dapat dilihat pada tegangan yang dihasilkan per current densitynya. Perbedaan tersebut disebabkan oleh

bedanya jenis membran yang digunakan, sehingga mempengaruhi resapan gas serta perpindahan proton yang terjadi di stack PEMFC.

#### 4.0 KESIMPULAN

Peningkatan temperatur dan tekanan akan meningkatkan kinerja PEMFC, pada temperatur 90°C, penurunan tegangan yang dihasilkan tidak menunjukkan penurunan yang terlalu tajam dibandingkan pada temperatur 60°C, 70°C dan 80°C. Pada tekanan 3 atm, didapatkan kinerja PEMFC jauh lebih baik dari pada tekanan 1 dan 2 atm. Karena pada kurva polarisasi yang dihasilkan, penurunan tegangan per current density yang dihasilkan tidak mengalami penurunan yang terlalu jauh. Pada variasi kelembaban relatif di salah satu sisi elektroda yakni sisi katoda, didapatkan kinerja PEMFC jauh lebih baik pada kelembaban relatif 100%. Karena pada kurva poolarisasi yang dihasilkan, penurunan tegangan per current density yang dihasilkan tidak mengalami penurunan yang terlalu jauh. Untuk perbandingan rasio stoikiometri 2,5 dan 3 menunjukkan kinerja PEMFC yang lebih baik dibandingkan 1 dan 2. Karena semakin banyak umpan gas yang dilebihkan, maka penyerapan proton akan semakin besar juga.

#### Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih disampaikan kepada sdr Fadlul Rahman dan Rahmatika yang telah bersama-sama melakukan penelitian ini.

#### Daftar Pustaka

- Ai-Jen Hung, Lu-Yu Sung, Yih-Hang Chen, Cheng-Ching Yu. 2007. *Operation-relevant Modeling of an Experimental Proton Exchange Membrane Fuel Cell*.
- Chiu, L. Y. Diong, B. M. 2004. "An Improved Small Signal Model of The Dynamic Behaviour of PEM Fuel Cells" Industry Applications Conference, 2003. 38th IAS Annual Meeting. Vol. 2.
- Correa, J. M. Farret, F. A. Canha, L. N. Simoes, M. G. 2004. "An Electrochemical-Based Fuel Cell Suitable for Electrical Engineering Automation Approach." IEEE Transaction on Industrial Electronics. Vol. 51.
- Dhanar Dwi Kuncoro. 2008. *Simulasi Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) Sebagai Pembangkit Listrik Perumahan*.
- J.H. Hirschenhofer, et al, (1994). *Fuel Cell Handbook*, 4th ed., United State Dept. of Energy (US DOE).
- Li, Xianguo, dan Imran Sabir. 2005. Review of bipolar plates in PEM fuel cells: Flow-field designs.
- M Farooque, Hans C.M., "Fuel cell- The clean and efficient power generators," IEEE (12 Desember, 2001), hal.1819-1829.
- Mulyazmi. 2013. *Development Of Optimum Process Design Methodology Of Proton Exchange Fuel Cell System To Achieve Optimum Performance*.
- U.S Department of energy, *Fuel Cell Handbook* (EG&G Services Parsons, Inc., 2000).
- Wei Yuan, Yong Tang, Minqiang Pan, Zongtao Li, Biao Tang. 2008. *Model prediction of effects of operating parameters on proton exchange membrane fuel cell performance*.
- Woonki Na and Bei Gou, 2008. *A Thermal Equivalent Circuit for PEM Fuel Cell Temperature Control Design*, Circuits and Systems, 2008. ISCAS 2008. IEEE International Symposium on Volume, Issue.

Zenith, Federico, (2007). *Control of Fuel Cell*, Doctoral Thesis, Norwegian University of Science and Technology, Faculty of Natural Sciences and Technology.

