

PENELITIAN PENGARUH PENGONTROL PANAS TERHADAP DAYA KELUARAN *STACK FUEL CELL* PEM DENGAN BEBAN DINAMIS

Ganesha Tri Chandrasa

Balai Besar Teknologi Energi – BPPT, PUSPIPTEK
Cisauk-Tangerang 15314, Indonesia
Email: ganeshac@yahoo.com

ABSTRAK

Sistem Pembangkit Listrik *Fuel Cell* adalah suatu bentuk sistem energi terbarukan yang bekerja berdasarkan proses elektrokimia dan menghasilkan arus listrik searah (DC) tanpa mengeluarkan zat polutan. Sistem ini, menggunakan hidrogen sebagai bahan reaktan dan oksigen sebagai oksidan. Hasil reaksi kimia selain menghasilkan arus searah juga menghasilkan panas serta air sebagai hasil sampingan. Panas dan air yang berlebihan dapat mempengaruhi keluaran dari sistem *fuel cell* ini, dimana membran pada *stack fuel cell* dapat menjadi terlalu lembab atau terlalu kering, sehingga tegangan dan arus listrik yang dihasilkan dapat menurun. Pada penelitian ini dicoba membuat suatu alat yang dapat mengontrol hasil sampingan berlebihan yang ditimbulkan oleh *stack fuel cell*. Penelitian di laboratorium dilakukan terhadap *stack fuel cell* jenis PEM, data yang didapat merupakan pengukuran keluaran listrik *fuel cell* dan energi yang digunakan oleh peralatan dan beban. Penggunaan energi listrik pada peralatan ini harus diusahakan sekecil mungkin sehingga tidak terlalu berpengaruh pada keluaran energi total dari sistem *fuel cell*.

Kata kunci: *Fuel cell*, PEM, Elektrokimia, Arus listrik searah, Energi terbarukan

ABSTRACT

Fuel Cell Power Generation is a renewable energy system that by the principle of electrochemical reaction produces electrical direct current (DC) and emits no pollutant. The system is using Hydrogen as reactant and Oxygen as oxidant. The chemical reaction produces DC electrical current, heat, and water as by products. The excess heat and water can affect the system output, where FC membrane can be too dry or too wet. Hereby, the produced potential different (voltage) and electrical current can be deteriorated. The research is trying to develop a device that can control the excess by product of the fuel cell stack. Investigations have been conducted to the PEM Fuel Cell; the collected data is the measurement of electrical output and energy consumed by the device and load. The consumed electric energy of the device should be the smallest as possible, therefore not affected the overall energy output of the fuel cell.

Key words: Fuel cell, PEM, Electrochemical, Electrical direct current, Renewable energy

1. PENDAHULUAN

Sistem Pembangkit Listrik *Fuel Cell* (FC) adalah suatu bentuk sistem energi terbarukan yang tidak menghasilkan zat polutan, karena prinsip pembangkit jenis ini adalah elektrokimia, menggunakan hidrogen sebagai bahan reaktan dan oksigen sebagai oksidan. Sistem Pembangkit Listrik *Fuel Cell* umumnya memberikan keluaran listrik arus searah (DC) dari hasil reaksi H_2 dan O_2 . Pembangkit ini termasuk ramah lingkungan karena hanya menimbulkan panas dan air sebagai sisa reaksinya. Sisa reaksi ini dapat bermanfaat dan dapat pula menurunkan kinerja *fuel cell* secara keseluruhan. Air sisa reaksi dapat

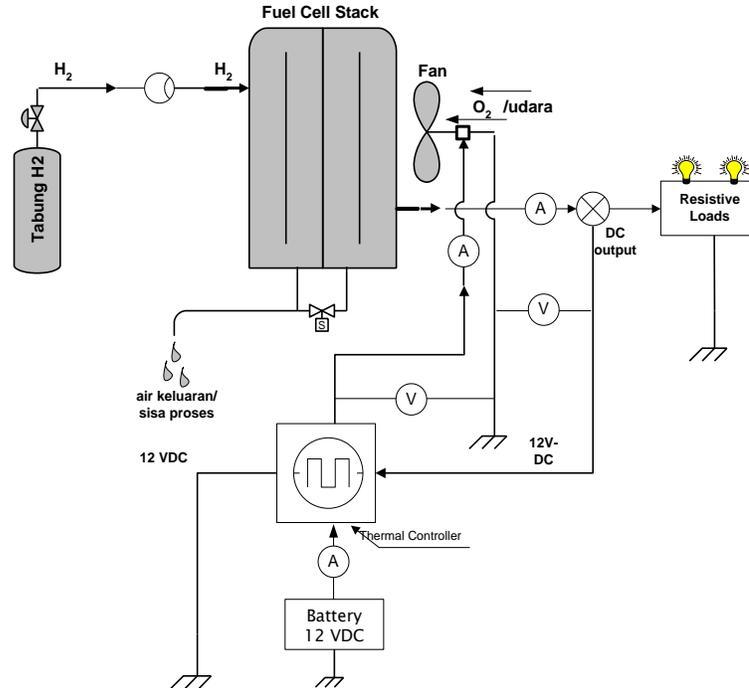
melembabkan membran namun membran juga tidak diperbolehkan menjadi terlalu basah, terlalu kering, ataupun terlalu panas karena jika uap air maupun panas berlebih maka arus listrik yang dihasilkan juga akan berkurang.

Sistem Pembangkit *Fuel Cell* saat ini semakin kompak sehingga mulai dicoba diaplikasikan pada kendaraan listrik seperti mobil, bus, maupun sepeda motor. Sistem *fuel cell* harus dapat memenuhi karakteristik konsumsi energi yang dinamis pada kendaraan.

Penelitian ini terutama bertujuan untuk merancang suatu sistem kontrol pengatur suhu kerja *stack Fuel Cell* dari jenis *Proton Exchange Membrane* (PEM), suhu kerja adalah salah satu parameter yang dapat dikendalikan untuk optimalisasi efisiensi sistem secara menyeluruh, supaya *stack* tersebut selalu berada pada kondisi suhu kerja yang ideal. Hasil penelitian ini kelak dapat dikembangkan dan diaplikasikan secara ekonomis sebagai salah satu komponen penting pada kendaraan listrik ramah lingkungan yang menggunakan pembangkit *fuel cell* sebagai sumber energinya.

2. METODE DAN BAHAN

Penelitian ini dilakukan dengan metode: Studi literatur, perancangan dan pembuatan alat, uji dan penyetingan alat, aplikasi dan pengambilan data alat yang diterapkan pada Pembangkit Listrik *Fuel Cell*, analisa dan kesimpulan penelitian.



Gbr. 1. Rangkaian

Penelitian dilakukan di laboratorium *Fuel Cell* di Balai Besar Teknologi Energi, BPPT, di kawasan PUSPIPTEK, Serpong.

Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah: Beberapa komponen elektronika termasuk *timer IC*, *Heating Plate*, *Multimeter*, *Tachometer*, Kipas kecepatan tinggi, Beban, dan peralatan penunjang lainnya. Rangkaian pada Gbr. 1, memperlihatkan skema uji alat di laboratorium.

3. STUDI LITERATUR DAN RANCANGAN ALAT

Suatu sistem Pembangkit Listrik *Fuel Cell* khususnya jenis PEM-FC pada operasionalnya menghasilkan panas yang dapat mengurangi efisiensi dari elektrolit membran maupun anoda dan katoda. Di lain pihak, *Proton Exchange Membrane fuel cell* membutuhkan tingkat kelembaban yang relatif tinggi pada aliran pereaksinya untuk menghindari kekeringan pada membran elektrolit, khususnya pada saluran masuknya gas (*inlet*).

Fuel cell ini harus dapat mempertahankan konduktivitas ion yang tinggi pada membran, atau kemampuan sel akan menurun secara fatal. Kejadian penting ini membuktikan pentingnya kandungan air yang tinggi di antara membran. Teknik sebelum ini yang digunakan adalah melembabkan gas pereaksi untuk menghindari kehilangan air pada membran. Prosedur ini menambah kompleksitas sistem. Namun demikian, kelembaban tidak dapat terjadi jika tidak disediakan sarana ruang/komponen untuk melakukan prosedur tersebut.

Demikian pula halnya dengan arus listrik yang dihasilkan oleh sistem FC yang berupa arus DC, bukan tidak mungkin pula ketika sel kehilangan kemampuan memproduksi listrik maka kontinuitas beban listrik pada sistem tersebut akan terhenti.

Berdasarkan permasalahan diatas maka harus dihindari panas berlebihan akibat dari proses elektrokimia yang terjadi, karena panas tersebut dapat menyebabkan kekeringan pada sel tersebut.

Beberapa penelitian sebelumnya sehubungan dengan sistem pengontrolan pada sistem *fuel cell* di antaranya dilakukan antara lain oleh 1) Alfredo P. Vega-Leala *et al* (2006), mereka melakukan penelitian untuk membuat suatu kontrol sistem untuk menjaga kesinambungan suplai oksigen dan hidrogen pada *stack fuel cell* PEM sehingga selalu tercapai kondisi output optimalnya; 2) Yu Yao Shan (2007), melakukan pemodelan terhadap efek termal dinamik untuk penggunaan *fuel cell* pada kendaraan, hasilnya dapat digunakan atau diteliti lebih lanjut untuk perancangan disain *stack* dan alat kontrol; 3) Zenith, Federico (2007), melakukan penelitian komponen-komponen dinamis secara simulasi pada *stack fuel cell* yang meliputi tekanan gas, aliran udara untuk mengontrol temperatur, yang pada intinya mensimulasikan input campuran udara dan gas pada katode; 4) Woonki Na dan Bei Gou (2008/IEEE), membuat suatu model rangkaian pengatur temperatur untuk PEM FC yang

mempertahankan kesetimbangan energi *fuel cell*, dan diharapkan model ini berguna untuk pendisainan alat pengatur temperatur sebenarnya.

Untuk melakukan suatu penelitian khususnya perancangan/pembuatan alat pengontrol panas *fuel cell*, maka perlu diteliti/dipelajari terlebih dahulu karakter/performansi dari suatu pembangkit listrik *fuel cell* baik melalui studi pustaka/referensi maupun serangkaian pengujian-pengujian di laboratorium.

Sebagai dasar bagi penelitian ini selain studi pustaka suatu sistem FC-PEM berdaya 25 watt, juga dicoba dipelajari hasilnya merupakan parameter-parameter penting yang akan digunakan bagi pendisainan alat pengatur suhu.

Dari referensi buku '*Fuel Cell Handbook*', JH Hirschenhofer (1994), terlihat pada Tabel 1 di bawah ini bahwa *Fuel Cell* jenis PEM dibandingkan dengan SOFC mempunyai suhu operasi yang relatif rendah dan termasuk tidak beresiko tinggi.

Tabel 1. Perbedaan karakter antara PEM FC dan SOFC

	PEM FC	SOFC
Jenis Elektrolit	<i>Ion Exchange Membrane</i>	Keramik
Suhu Operasi	80°C	650°C
Komponen Sel Utama	<i>Carbon-based</i>	Keramik
Katalis	Platinum	Perovskites
Pengaturan Air	Penguapan	Gas
Pengaturan Panas	Pemrosesan Gas+media pendingin terpisah	Internal Reforming+Pemrosesan Gas
Pembawa Muatan	H ⁺	O ⁻

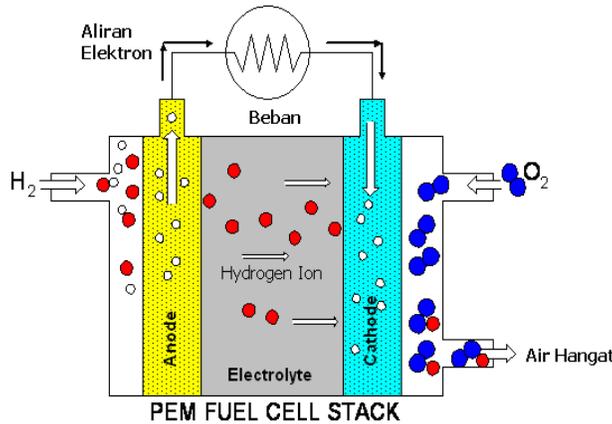
Sumber : Diolah dari Tabel 1-1, pp 1-5, JH Hirschenhofer (1994)

3.1. Prinsip Kerja PEM FC

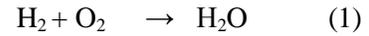
Gambar 2, memperlihatkan suatu prinsip kerja *dari Fuel Cell* jenis PEM, dan dapat dijelaskan sebagai berikut:

- *Stack fuel cell* terdiri dari dua elektroda, anoda dan katoda. Keduanya dipisahkan oleh *Polymer Electrolite Membrane* (PEM). 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.
- Akibat adanya katalis, molekul H₂ terpecah menjadi dua proton dan dua elektron. Elektron dari molekul Hidrogen mengalir melalui rangkaian luar, menghasilkan

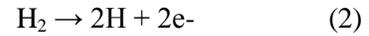
arus listrik. Proton dari molekul Hidrogen mengalir melalui rangkaian luar, menghasilkan arus listrik. Proton dan molekul hidrogen akan menembus lapisan membran, dan bergabung di katode dengan elektron dan oksigen dari udara membentuk air dan menghasilkan panas. Dengan teknologi *co-generation* panas ini dapat dimanfaatkan kembali untuk keperluan lain.



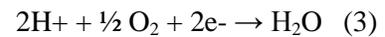
Reaksi Eksotermik yang terjadi :



Pada anoda :



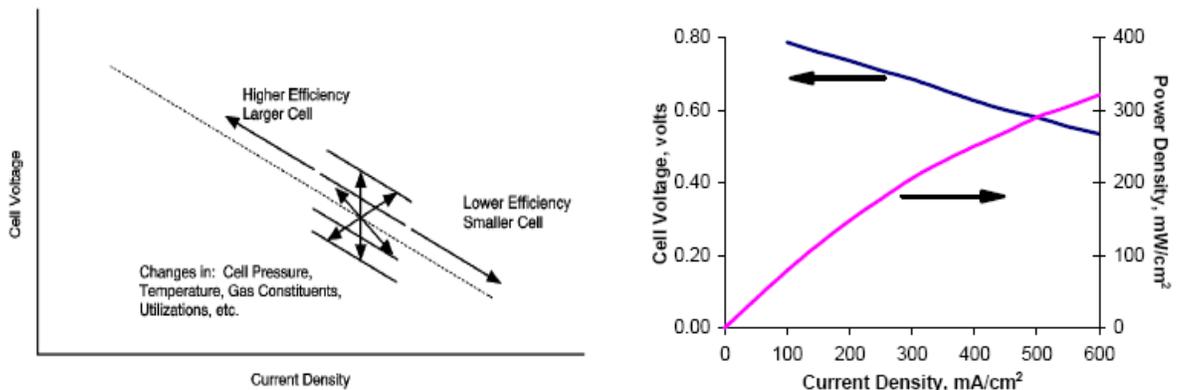
Pada katoda :



Gbr. 2. Prinsip kerja PEM FC

3.2. Hubungan antara Panas dan Kinerja FUEL CELL

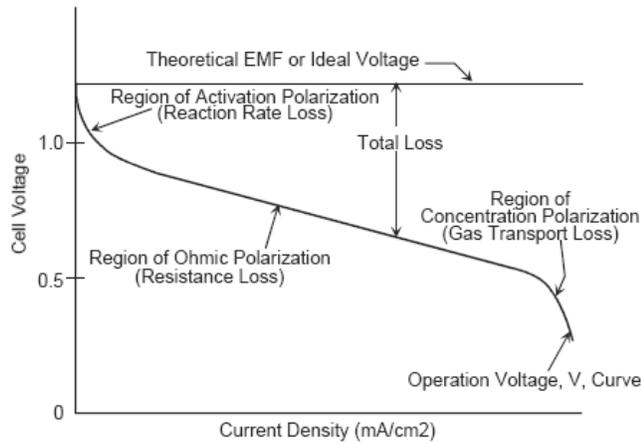
Kinerja suatu pembangkit *fuel cell* dipengaruhi variable operasi seperti suhu, tekanan gas, komposisi gas, penggunaan bahan reaktan, kerapatan arus, dan faktor-faktor lain (kemurnian bahan, umur membran). Hal-hal tersebut akan mempengaruhi suatu kondisi ideal dari *output fuel cell*. Gambar 3, memperlihatkan kinerja suatu *stack fuel cell*.



Gbr. 3. Kinerja suatu pembangkit fuel cell dan variabelnya

(Sumber: FC Handbook 5th ed. 2000)

Pada penelitian ini difokuskan hanya akan membahas sisi peningkatan kinerja dari pengaturan panasnya dengan pertimbangan penambahan alat kontrol panas hanya akan menambah biaya dan konsumsi listrik yang kecil dibandingkan jika dengan menggunakan kontrol gas dan tekanan. Di samping itu pengontrolan panas diharapkan dapat menjaga kondisi membran sehingga usia kerja dari membran otomatis dapat terjaga.



Gbr. 4. Karakteristik arus dan tegangan pada suatu *stack Fuel Cell*

Jika kita melihat Gbr. 4 (ilustrasi dari karakteristik ideal dan sebenarnya antara arus dan tegangan *Fuel Cell*), terdapat rugi-rugi reaksi, tahanan, dan rugi penyaluran gas. Khusus untuk rugi tahanan yang mengakibatkan turunnya arus dan tegangan secara teori dapat dipahami bahwa hal tersebut berkaitan sekali dengan panas yang ditimbulkan akibat adanya reaksi kimia antara hidrogen dan oksigen.

3.3. Efisiensi *Fuel Cell*

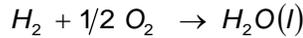
Efisiensi termal dari suatu alat konversi energi ditentukan dengan jumlah energi yang dapat digunakan relatif terhadap perubahan pada energi kimia yang tersimpan (energi termal) yang selanjutnya akan dilepas ketika suatu bahan bakar direaksikan dengan suatu oksidan. Persamaan di bawah adalah efisiensi dari kejadian ini.

$$\eta = \frac{\text{Useful Energy}}{\Delta H} \quad (1)$$

Menurut FC Handbook ed.5, akibat terjadinya reaksi elektrokimia terjadi perubahan pada energi bebas 'Gibbs', ΔG , dan ini merupakan energi listrik yang dapat digunakan, efisiensi ideal adalah,

$$\eta = \frac{\Delta G}{\Delta H} \quad (2)$$

Umumnya energi bebas yang digunakan adalah berdasarkan reaksi:



dimana energi bebasnya adalah,

$$\Delta G_r^\circ = G_{H_2O(l)}^\circ - G_{H_2}^\circ - \frac{1}{2} G_{O_2}^\circ \quad (3)$$

Pada kondisi standard 25°C (298K) dan tekanan 1 atm, energi kimia ($\Delta H = \Delta H_o$) pada reaksi hidrogen /oksigen adalah 285,8 kJ/mole, dan energi bebas yang tersedia yang dapat digunakan adalah 237,1 kJ/mole. Sehingga efisiensi ideal *fuel cell* (termal) dengan hidrogen dan oksigen murni adalah:

$$\eta_{ideal} = \frac{237,1}{285,5} = 0,83$$

Menurut referensi, tegangan ideal *fuel cell* pada kondisi ideal adalah 1,229 volt. Efisiensi termal *fuel cell* selanjutnya dapat ditulis dalam terminologi tegangan sel sebagai, efisiensi termal sebenarnya dari suatu *fuel cell* yang beroperasi pada suatu tegangan tertentu V_{cell} berdasarkan nilai pemanasan tertinggi dari hidrogen diberikan dengan persamaan;

$$\eta_{ideal} = 0,83 \times V_{cell} / V_{ideal} = 0,83 \times V_{cell} / 1,229 = 0,675 \times V_{cell} \quad (4)$$

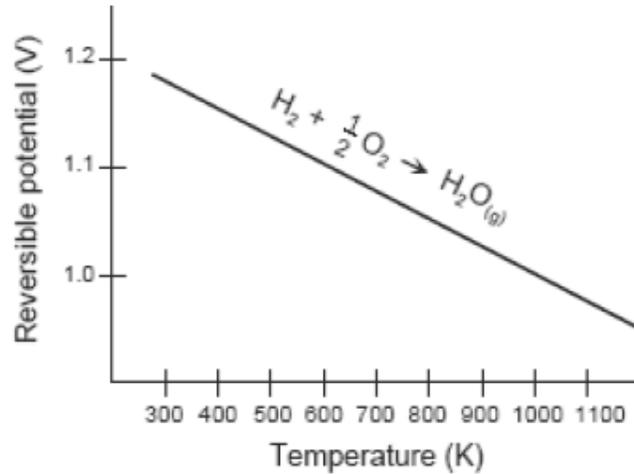
Efisiensi aktual dari *fuel cell* dapat di ekspresikan dengan rasio tegangan operasi sel (V_{actual}) terhadap tegangan sel ideal (V_{ideal}).

$$\eta = \frac{Useful\ Energy}{\Delta H} = \frac{Useful\ Power}{(\Delta G/0,83)} = \frac{Volts_{actual} \times Current}{Volts_{ideal} \times Current/0,83} = \frac{(0,83)(V_{actual})}{V_{ideal}} \quad (5)$$

Tegangan operasi (aktual) lebih kecil dibandingkan idealnya akibat rugi-rugi polarisasi sel dan rugi iR . Sehingga tegangan *fuel-cell* aktual adalah E ($V=E$ -Losses).

Fuel cell dapat dioperasikan pada densitas arus yang berbeda, yang diekspresikan sebagai mA/cm². Tegangan sel tersebut menentukan efisiensi *fuel cell* tersebut. Pada saat densitas arus turun, daerah sel aktif harus dinaikkan untuk menghasilkan daya yang diperlukan. Akibatnya disain dari *fuel cell* investasinya akan naik, tetapi menurunkan biaya operasinya. Gambar 5

memperlihatkan hubungan antara temperatur dengan tegangan *fuel cell*. Tabel 2 memperlihatkan hubungan temperatur dan tegangan dari berbagai jenis *fuel cell*.



Gbr. 5. Hubungan antara temperatur dan tegangan FC
(sumber: figure 2-1, *FC handbook* edisi 5)

Tabel 2. Hubungan antara temperatur dan tegangan FC

Temperature	25°C (298K)	80°C (353K)	100°C (273K)	205°C (478K)	650°C (923K)	800°C (1073K)	1100°C (1373K)
Cell Type		PEFC	AFC	PAFC	MCFC	ITSOFC	SOFC
Ideal Voltage	1.18	1.17		1.14	1.03		0.91

Sumber: Tabel 2-3, *FC Handbook* edisi 5.

3.4. Produksi Air dan Panas pada *Fuel Cell*

Menurut tinjauan pustaka, James Larminie, dkk (*Fuel Cell System Explained*, 2003, hal 399), dapat diterangkan juga Air dan Panas yang dihasilkan pada *stack fuel cell*.

3.4.1. Produksi air

Pada *stack fuel cell* yang menggunakan gas hidrogen, akan diproduksi air dengan laju satu mol untuk setiap dua elektron. Hubungan ini dapat ditulis dalam rumus;

$$Pr\ oduksi\ air = \frac{P_e}{2 \cdot V_c \cdot F} \text{ mol s}^{-1} \quad (6)$$

Massa molekul air adalah $18,02 \times 10^{-3} \text{ kg mol}^{-1}$, sehingga rumus di atas akan menjadi

$$Pr\ oduksi\ air = 9,34 \times 10^{-8} \times \frac{P_e}{V_c} \text{ kg s}^{-1} \quad (7)$$

Pada *fuel cell* hidrogen, laju produksi air kurang lebih berupa stoikhiometris. Tetapi, jika bahan bakarnya adalah campuran antara hidrogen dan karbon monoksida, akibatnya air yang dihasilkan akan menjadi semakin kecil sebanding dengan jumlah karbon monoksida yang terdapat pada campuran tersebut. Jika bahan bakarnya berupa hidrokarbon, yang di reform sendiri, maka sebagian dari air yang diproduksi akan digunakan pada proses reformasi (contoh dengan bahan bakar gas *methane*). Sebagai contoh jika dimisalkan *fuel cell* yang berkapasitas 1 kW di operasikan dalam waktu 1 jam, pada tegangan 0,7 volt, diasumsikan bahwa efisiensinya adalah 47%.

$$\begin{aligned} Laju\ produksi\ air &= 9,34 \times 10^{-8} \times \frac{1000}{0,7} \text{ kg s}^{-1} \\ &= 1,33 \times 10^{-4} \text{ kg s}^{-1} \end{aligned}$$

Sehingga masa dari air yang dihasilkan dalam 1 jam adalah

$$m_w = 1,33 \times 10^{-4} \times 60 \times 60 = 0,48 \text{ kg}$$

Oleh karena densitas dari air adalah 1g.cm^{-3} , yang sesuai dengan 480 cm^3 , atau 1 pint. Secara perhitungan, 1 kWh listrik yang dihasilkan *fuel cell* akan memproduksi 0,5 liter air.

3.4.2. Produksi panas

Ketika beroperasi *fuel cell* akan memproduksi panas. Jika semua enthalpy dari reaksi *fuel cell* hidrogen diubah ke energi listrik maka tegangan keluaran akan menjadi;

1,48 volt jika air yang dihasilkan dalam bentuk cair,

1,25 volt jika air yang dihasilkan dalam bentuk uap jenuh.

Sehingga perbedaan di atas secara jelas memperlihatkan adanya tegangan sesungguhnya dan energi yang tidak sepenuhnya diubah ke bentuk listrik tapi diubah ke bentuk panas. Dari berbagai kasus sangat sedikit air yang diproduksi dalam bentuk cair amat sedikit. Sehingga pada penelitian ini pembatasan pada air dalam bentuk uap.

Pada *fuel cell* energi yang terjadi adalah dalam tiga bentuk yaitu: listrik, panas yang dapat dirasakan, dan panas dalam uap air.

Untuk suatu *stack* dari n sel pada arus I, panas yang dihasilkan adalah;

$$Laju\ panas = n I (1,25 - V_o) W \quad (8)$$

Dalam bentuk tenaga listrik, hal ini akan menjadi ;

$$\text{Laju panas} = P_e \left(\frac{1,25}{V_c} - 1 \right) W \quad (9)$$

Formulasi hubungan ini untuk nilai stokiometri λ disebut oleh Larminé dan Dick (2003), bahwa dalam bentuk tenaga listrik, hal ini akan menjadi:

- Pemakaian udara = $3,57 \times 10^{-7} \lambda (P_e / V_c)$ kg/s (P_e / V_c) kg/s (10)

- Pemakaian gas Hidrogen = $1,05 \times 10^{-8} (P_e / V_c)$ kg/s (11)

- Air yang dihasilkan = $9,3410^{-8} (P_e / V_c)$ kg/s (12)

- Panas yg dihasilkan = $P_e (1,25/V_c - 1)$ watt (13)

Adapun daya keluaran yang diinginkan dapat dituliskan sebagai berikut:

- Daya yang diinginkan $P_e = (nV_c) (m I A_c)$ watt (14)

dengan, n adalah jumlah sel per *stack*, m adalah jumlah *stack* yang digunakan, I adalah arus, dan A_c adalah luasan aktif sel. Tegangan operasional diberikan dengan termin 1 secara paranthesis dan arus total diberikan pada termin ke-2. Selama operasional tegangan sel akan turun sehubungan dengan naiknya arus yang ditarik beban.

Hubungan di atas berlaku untuk seluruh *stack* FC dan disebut Daya operasi *stack* P_e (watt); Tegangan masing-masing sel V_c (volt).

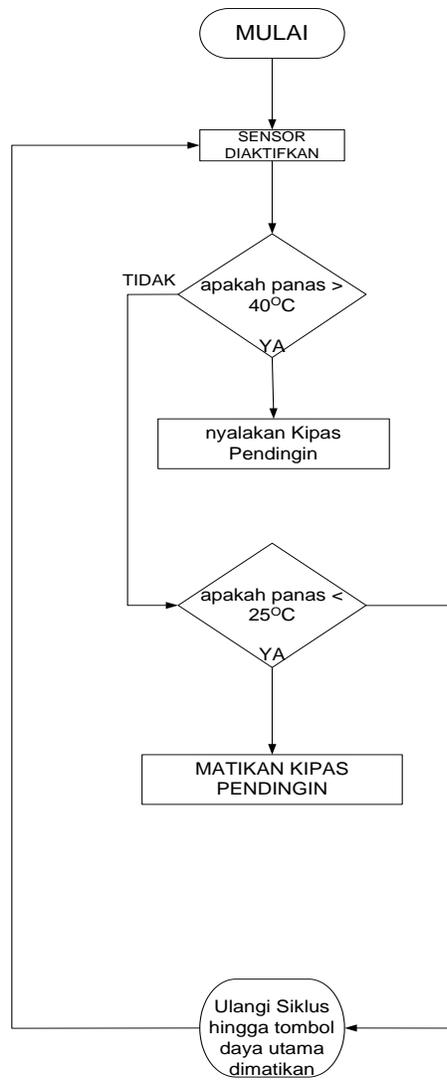
4. RANCANG BANGUN ALAT PENGATUR PANAS *FUEL-CELL*

4.1. Filosofi Rancang-bangun Pengatur Panas

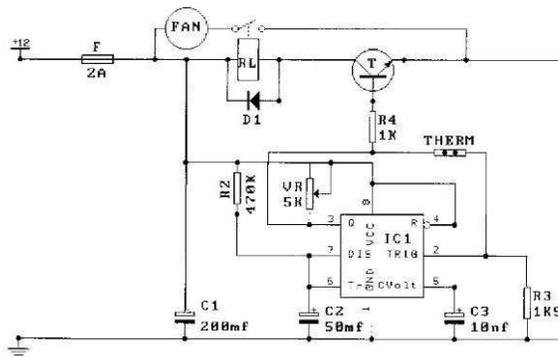
Filosofi dari pengaturan panas yang dirancang adalah sebagai bagan alir Gbr. 6 di bawah ini. Sensor panas berfungsi memonitor suhu berkisar di antara 25 hingga 40°C, suhu ini akan mempengaruhi kelembaban dari bahan membran dan katoda yang digunakan di dalam *stack fuel cell*.

4.2. Rancangan Pengatur Panas

Rancangan rangkaian pengatur panas hasil pengembangan diperlihatkan pada Gbr. 7 dan 8, dan merupakan perpaduan dari IC, Sensor Panas, transistor, dan kipas listrik DC 12 volt digunakan. Sedangkan Gbr. 9, memperlihatkan foto dari pengatur panas yang sedang dibuat dan diujicoba.



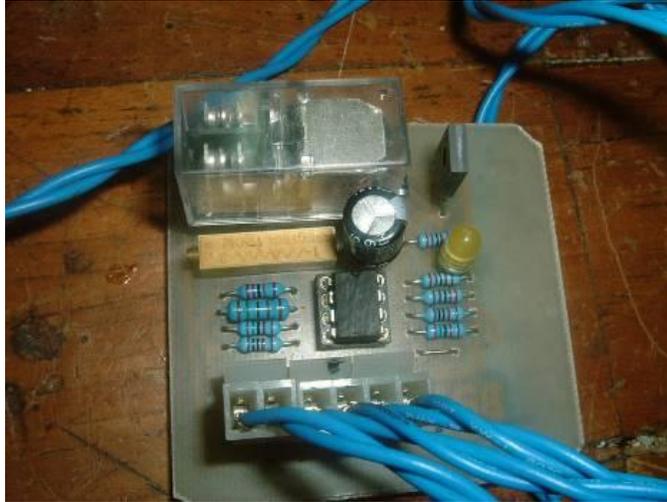
Gbr. 6. Bagan alir filosofi pengatur panas



COMPONENT LIST :

1. FAN
2. RELAY 12 V
3. TRANSISTOR 2N3039
4. DIODE 1N 4007
5. THERMISTOR
6. IC MC1455
7. C 200 MF
8. C 50 MF
9. C 10 NF
10. FUSE 2A
11. UR 5K
12. R 470K
13. R 1K5
14. R 1K

Gbr. 7. Rangkaian pengatur panas



Gbr. 8. Bentuk jadi pengontrol panas FC



Gbr. 9. Pengatur panas yang sedang diset / uji

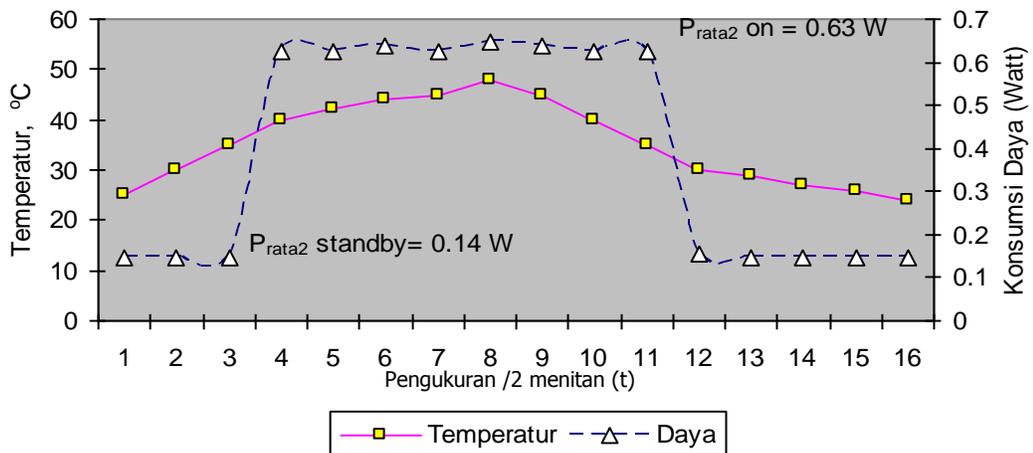
5. PENGUJIAN PROTOTIPE PENGATUR PANAS FC

Pada penelitian ini dilakukan uji coba untuk mengetahui karakter/konsumsi listrik dari alat tersebut. Dilakukan pengujian pada sistem yang rangkaian pengujian seperti terlihat pada Gbr. 1 di muka.

Untuk melihat unjuk kerja sistem tersebut. Sistem dirancang untuk menyalakan fan 12 volt jika suhu *stack fuel cell* telah mencapai 50°C. Dan mematikan fan jika suhu turun kembali di bawah 30°C. Di samping itu fan juga berguna untuk memberikan asupan oksigen dari udara ke dalam membran FC. Dilakukan pengukuran-pengukuran arus rangkaian dan tegangannya sehingga dapat ditentukan Daya konsumsi dari rangkaian tersebut ($P = V \times I$).

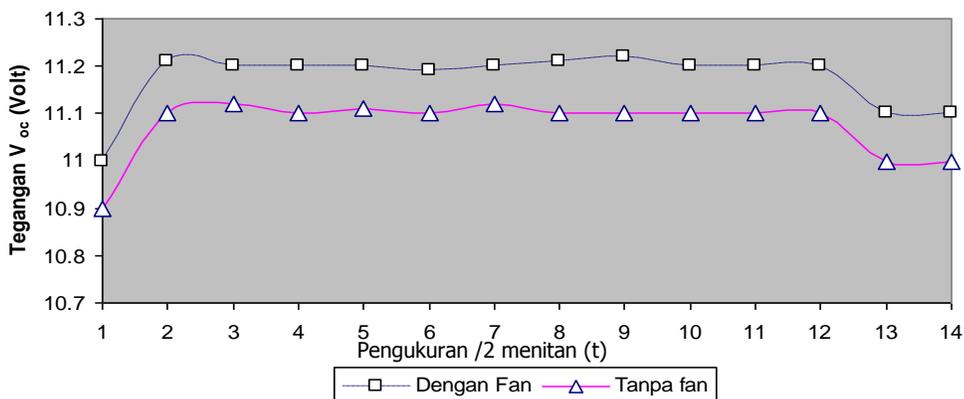
Gambar 10, memperlihatkan pengujian untuk mendapatkan daya rata-rata, dari pengatur panas. Didapat pengukuran arus maximum (I_{max}), 52 mA dan minimum I_{min} , 12 mA, pada tegangan $V_{cc}=12$ volt, sehingga daya (P_{max}) $P1 = 0,63$ watt saat kipas On dan $P2$ (P_{min})=0,144 watt, saat *standby*.

Hasil Uji Pengatur Panas



Gbr. 10. Daya konsumsi maximum dan minimum dari pengatur temperatur

Tegangan Terbuka Fuel Cell "Tropical" 25 Watt

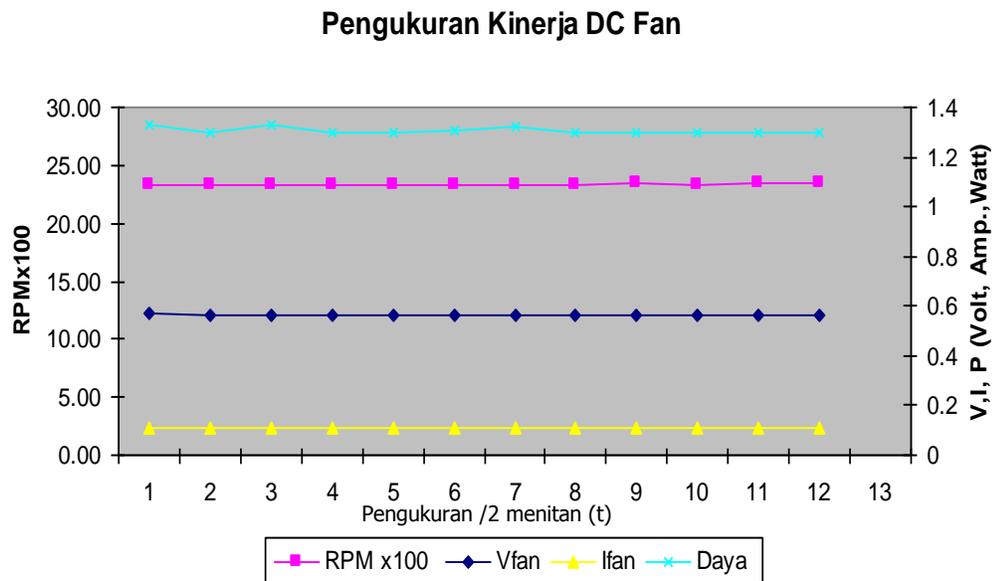


Gbr. 11. Tegangan FC tanpa beban dengan dan tanpa fan

Gambar 11, memperlihatkan pengujian untuk mengetahui pengaruh fan pada tegangan terbuka FC tanpa beban.

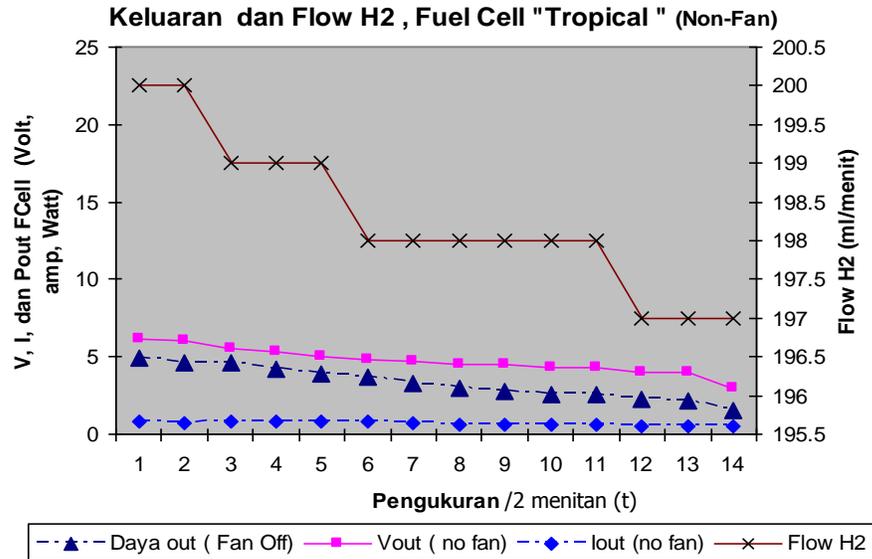
Pengukuran tegangan terbuka dilakukan dengan suplai energi dari *Fuel Cell*, operasional *fuel cell* dilakukan dengan dan tanpa fan, dan dibandingkan hasilnya seperti di atas. Hasilnya terdapat sedikit selisih seperti gambar di atas. Dari pengukuran di atas selisih kurang dari 1% tegangan nominal tanpa beban.

Gambar 12, memperlihatkan pengukuran konsumsi daya fan, untuk nantinya dapat diperhitungkan persentase energi untuk fan (dihitung sebagai *losses*) yang harus disediakan oleh FC dari total energi yang dibangkitkan. Daya nominal yang digunakan oleh fan adalah 1,3 watt.

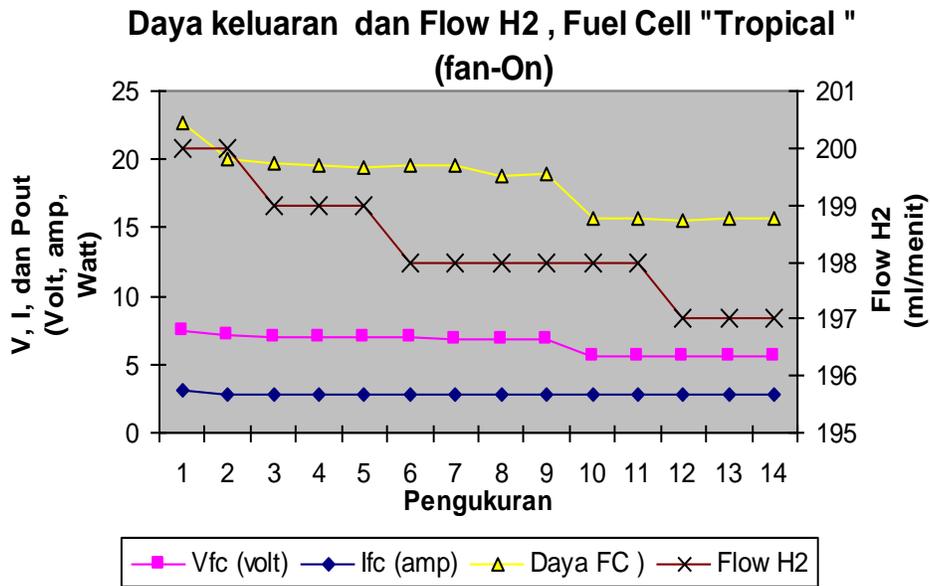


Gbr. 12. Pengukuran daya konsumsi oleh fan

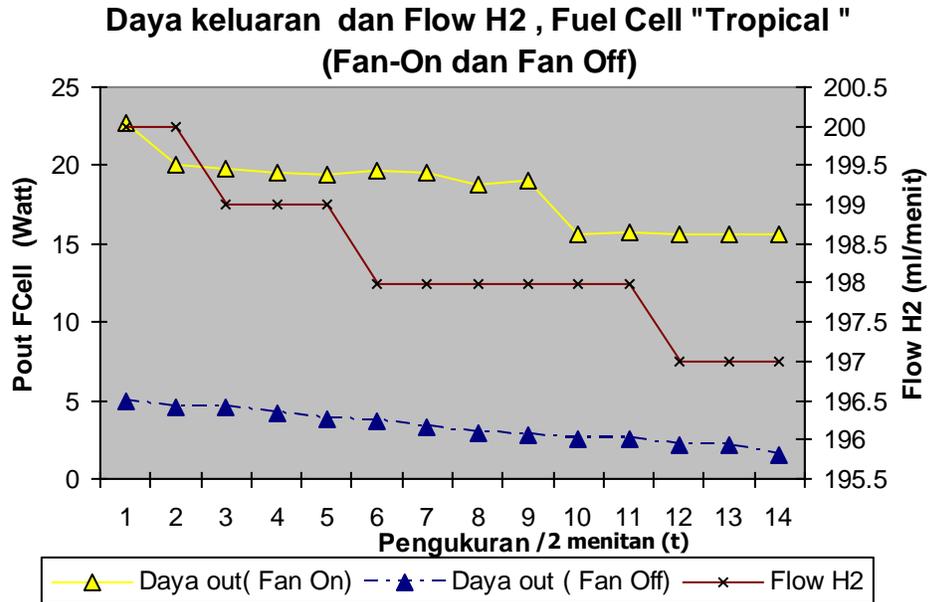
Gambar 13 a dan b memperlihatkan kinerja *fuel cell*. Pengukuran kinerja *fuel cell* dilakukan dengan pembebanan menggunakan beban resistive (lampu pijar 2×25 watt). Dari pengukuran didapatkan 4 parameter uji yaitu; tegangan, Arus, Daya, dan *Flow* Hidrogen, seperti Gbr. 14. Daya terukur maximum yang bisa dihasilkan adalah kurang dari 20 watt atau 18,19 watt.



Gbr. 13a Output FC tanpa fan



Gbr. 13b. Output Ddengan fan-



Gbr. 14. Daya keluaran FC berbeban dengan dan tanpa fan

6. KESIMPULAN DAN REKOMENDASI

6.1. Kesimpulan

- Pengatur Panas yang dibuat cukup sederhana dan efektif untuk menjaga suhu operasi dari Pembangkit Listrik *Fuel Cell*.
- Efisiensi dari alat ini harus setinggi mungkin untuk menghindari penurunan efisiensi yang signifikan dari sistem pembangkit FC secara keseluruhan.
- Dari pengukuran ternyata rangkaian ini hanya menggunakan daya sebesar 0,63 watt maksimum dan hanya 0,144 watt minimum pada saat stand-by, pada tegangan kerja 12 volt.
- Fan sebagai komponen pelengkap pengontrol ternyata membutuhkan daya 1,3 watt.
- Total daya max yang dibutuhkan untuk fan dan pengontrol adalah 1,93 watt atau kurang lebih 10% dari total daya yang dihasilkan fuel cell pada penelitian ini.
- Kebutuhan daya untuk auxiliaris ini persentasenya akan mengecil dengan semakin besar kapasitas FC yang digunakan, dan tidak selamanya alat tersebut digunakan pada daya maksimumnya. Karena pada saat *standby* hanya memerlukan 2,8% nya saja.

6.2. Rekomendasi

- Penelitian ini dapat dikembangkan untuk lebih meningkatkan kinerja sistem dengan perancangan dan dibuat pengatur tekanan gas dan pengatur kelembaban untuk sistem FC yang lebih kompleks.
- Penelitian selanjutnya kontrol panas ini akan diintegrasikan dengan FC 50 watt yang ada dan akan di tentukan pemodelannya.
- Dilakukan penelitian FC beban riil, dengan daya yang lebih besar (seperti sepeda motor *fuel cell* dengan sistem pengaturan dan parameter-parameter FC yang lebih kompleks) dan dapat terlihat kesetimbangan energinya terhadap pengaruh-pengaruh *losses* pada kendaraan.

DAFTAR PUSTAKA

- Alfredo P. Vega-Leala, et al, (2007). *Design of Control Systems for Portable PEM Fuel Cells*, the 2nd National Congress on Fuel Cells, CONAPPICE 2006. Elsevier Publication.
- Brett D. Williams, (2007). *Commercializing Light-Duty Plug-In/Plug-Out Hydrogen-Fuel-Cell Vehicle; Mobile Electricity Technologies*, PhD Dissertation, Office of Graduate Study, University of California Davis.
- Bruce Lin, (2000). *Conceptual Design and Modelling of A Fuel Cell Scooter for Urban Asia*, Journal of Power Sources #86.
- Christina Haraldson, (2005). *On Direct Hydrogen Fuel Cell Vehicles Modelling and Demonstration*, Doctoral Thesis, KTH Department of Chemical Engineering and Technology Energy Processes, Royal Institute of Technology, Sweden.
- EG&G Services, (2000). *Fuel Cell Handbook*, 5th ed., United State Dept. of Energy (US DOE), West Virginia, USA.
- James Larmine, Andrew Dicks, (2003). *Fuel Cell System Explained*, 2nd ed., John Wiley Publication, UK.
- J.H. Hirschenhofer, et al, (1994). *Fuel Cell Handbook*, 4th ed., United State Dept. of Energy (US DOE).
- J Daniel Wishart, (2008). *Modelling Simulation, Testing and Optimization of Advanced Hybrid Vehicle Powertrains*, PhD thesis, University of Victoria.
- Matthew Guenther and Zuomin Dong, (2005). *Modelling and Design Optimization of Low Speed Fuel Cell Battery Hybrid Electric Vehicles*, Proceedings of the International Green Energy Conference, 12-16 June 2005. Waterloo, Ontario, Canada.
- Nathan J English and Ramesh K Shah, (2004). *Technology Status and Design Overview of A Hybrid Fuel Cell Engine for A Motorcycle*, Second International Conference on Fuel Cell Science, Engineering and Technology. Copyright 2004 by ASME.
- 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 , 18-21 May 2008, pp: 2825 – 2828.

Yu Yao Shan, (2007), *Dynamic Modelling of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell Stack with 1D and 2D CFD Techniques*, MSc. Thesis, Auburn University, Alabama , USA.

Woojin Choi, (2004). *New Approaches to Improve The Performance of The PEM Based Fuel Cell Power Systems*, PhD Dissertation, the Office of Graduate Studies of Texas A&M University.

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

FOTO-FOTO PENELITIAN



Gbr. 15. *Stack Fuel Cell* yang digunakan



Gbr. 16. *Stack Fuel Cell* dengan fan



Gbr. 17. Rangkaian pengujian