



**SIMULASI *HYBRID POWER SYSTEM* ANTARA *PHOTOVOLTAIC* DENGAN
FUEL CELL MENGGUNAKAN *FUZZY LOGIC CONTROLLER***

SKRIPSI

Oleh

**Andik Hikmawan
NIM 071910201091**

**PROGRAM STUDI STRATA-1 TEKNIK
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS JEMBER
2012**



**SIMULASI *HYBRID POWER SYSTEM* ANTARA *PHOTOVOLTAIC* DENGAN
FUEL CELL MENGGUNAKAN *FUZZY LOGIC CONTROLLER***

SKRIPSI

diajukan guna melengkapi tugas akhir dan memenuhi salah satu syarat
untuk menyelesaikan Program Studi Teknik Elektro (S1)
dan mencapai gelar Sarjana Teknik

Oleh

**Andik Hikmawan
NIM 071910201091**

**PROGRAM STUDI STRATA-1 TEKNIK
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS JEMBER
2012**

PERSEMBAHAN

Skripsi ini saya persembahkan untuk:

1. Umi Suliyati dan Abi Abdul Azis tercinta, yang telah mendoakan dan memberi kasih sayang serta pengorbanan selama ini;
2. Guru-guruku sejak SD sampai PT terhormat, yang telah memberikan ilmu dan membimbing dengan penuh kesabaran;
3. Almamater Fakultas Teknik Universitas Jember.

MOTTO

Ingatlah, HANYA DENGAN MENGINGAT ALLAH HATI MENJADI TENTRAM.

(QS. Ar Ra'd [13]:28)

Terus berusaha dan berdoa demi sebuah kesuksesan, serta berbesar hati menerima kegagalan untuk bangkit kembali

Barang siapa yang selalu ber-istighfar maka Allah akan memberinya kelapangan dalam setiap kesempitannya, dan Allah akan membukakan jalan dari kesusahannya serta Allah akan memberinya rizqi dari jalan yang tidak disangka-sangkanya.

(HR. abu Daud & Ibnu Majah)

PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Andik Hikmawan

NIM : 071910201091

menyatakan dengan sesungguhnya bahwa karya ilmiah yang berjudul: *Simulasi Hybrid Power System Antara Photovoltaic Dengan Fuel Cell Menggunakan Fuzzy Logic Controller* adalah benar-benar hasil karya sendiri, kecuali jika dalam pengutipan substansi disebutkan sumbernya, dan belum pernah diajukan pada institusi mana pun, serta bukan karya jiplakan. Saya bertanggung jawab atas keabsahan dan kebenaran isinya sesuai dengan sikap ilmiah yang harus dijunjung tinggi.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya, tanpa adanya tekanan dan paksaan dari pihak mana pun serta bersedia mendapat sanksi akademik jika ternyata di kemudian hari pernyataan ini tidak benar.

Jember, 1 Januari 2012
Yang menyatakan,

(Andik Hikmawan)
NIM 071910201091

SKRIPSI

SIMULASI HYBRID POWER SYSTEM ANTARA PHOTOVOLTAIC DENGAN FUEL CELL MENGGUNAKAN FUZZY LOGIC CONTROLLER

Oleh

Andik Hikmawan
NIM 071910201091

Pembimbing

Dosen Pembimbing Utama : Dedy Kurnia Setyawan, ST., MT.

Dosen Pembimbing Anggota : Dr. Triwahju Hardiyanto, ST., MT.

PENGESAHAN

Skripsi berjudul *Simulasi Hybrid Power System Antara Photovoltaic Dengan Fuel Cell Menggunakan Fuzzy Logic Controller* telah diuji dan disahkan oleh Fakultas

Teknik Universitas Jember pada:

hari : Selasa

tanggal: 31 Januari 2012

tempat : Fakultas Teknik Universitas Jember

Tim Penguji

Pembimbing Utama (Ketua Penguji),

Pembimbing Anggota (Sekretaris),

Dedy Kurnia Setiawan, ST., MT.
NIP. 19800610 200501 1 003

Dr. Triwahju Hardianto, ST., MT.
NIP. 19700826 199702 1 001

Penguji I,

Penguji II,

Dr. Azmi Saleh, ST., MT.
NIP. 19710614 199702 1 001

H. Samsul Bachri M, ST., M.MT.
NIP. 19640317 199802 1 001

Mengesahkan
Dekan,

Ir. Widyono Hadi, MT.
NIP. 19610414 198902 1 001

Simulasi Hybrid Power System Antara Photovoltaic Dengan Fuel Cell Menggunakan Fuzzy Logic Controller

Andik Hikmawan

Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Jember

ABSTRAK

Penelitian ini mensimulasikan kombinasi antara *photovoltaic (PV)* dengan *fuel cell (FC)* dalam suatu sistem *hybrid*. Sistem ini terdiri atas panel *photovoltaic* dan *fuel cell* yang bekerja secara paralel; sistem *electrolyzer*; *switching system*; tabung penyimpanan *hydrogen* dan katup untuk mengatur kecepatan aliran *hydrogen (fuel flow rate)*. Di dalam sistem *hybrid* ini, jika daya listrik yang dihasilkan *photovoltaic* lebih besar dari daya listrik permintaan beban, maka *photovoltaic* akan menyuplai beban dan kelebihan daya listrik akan diubah menjadi *hydrogen* oleh *electrolyzer*. Sebaliknya, *fuel cell* akan bekerja menghasilkan energi listrik untuk mengatasi kekurangan daya pada sistem. Total produksi *hydrogen* oleh *electrolyzer* adalah 2070 liter. *Fuel cell* akan menyuplai beban pada saat sistem mengalami kekurangan daya dengan menggunakan 1900 liter *hydrogen* sebagai bahan bakarnya. Sisa *hydrogen* sebesar 170 liter dapat digunakan *fuel cell* untuk mengatasi kekurangan daya awal pada hari selanjutnya. Simulasi ini dirancang dan disimulasikan menggunakan *MATLAB®*, *Simulink® environment*, berdasarkan pada persamaan matematika dan pemodelan elektronik agar tercipta sistem sesuai yang diinginkan.

Kata kunci: *hybrid power system, photovoltaic, fuel cell, electrolyzer, fuzzy logic controller.*

Simulation of Hybrid Power System Photovoltaic – Fuel Cell Using Fuzzy Logic Controller

Andik Hikmawan

Departement of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, University of Jember

ABSTRACT

This paper describes a combination of photovoltaic (PV) and fuel cell (FC) for hybrid energy system in stationary applications. The system includes solar panels and a fuel cell system working in parallel, an electrolyzer system, switching system, storage tanks and valve for manage fuel flow rate hydrogen. In this hybrid power system, if the solar power is high than load power demand, the PV array supply the load and the excess power is stored in hydrogen by the electrolyzer. Otherwise, the fuel cell is switched on to generate electricity to complement any shortfall in solar power. Hydrogen production total by electrolyzer are 2070 litres. Fuel cell can supply load in any lack power by using 1900 litres hydrogen as fuel. Hydrogen residue is 170 litres which can power first lack power for next day. The model is developed and applied in the MATLAB®, Simulink® environment, based on the mathematical and electrical models developed for the proposed system.

Keywords: *hybrid power system, photovoltaic, fuel cell, electrolyzer, fuzzy logic controller.*

RINGKASAN

Simulasi Hybrid Power System Antara Photovoltaic Dengan Fuel Cell Menggunakan Fuzzy Logic Controller; Andik Hikmawan, 071910201091; 2012: 51 halaman; Jurusan Elektro Fakultas Teknik Universitas Jember

Krisis energi adalah masalah yang sampai saat ini masih menyelimuti kehidupan manusia. Salah satu cara untuk mengatasi krisis energi adalah menggunakan pembangkit energi alternatif. Namun, beberapa pembangkit energi alternatif bergantung pada keadaan alam dan bahan bakar tertentu saja, contohnya *photovoltaic* dan *fuel cell*. *Photovoltaic* hanya bekerja jika ada cahaya yang diterima sedangkan *fuel cell* bekerja selama ada *hydrogen* yang dialirkan. *Photovoltaic* dan *fuel cell* dapat bekerja sama dalam satu sistem untuk menjaga kontinuitas suplai pada beban. Sistem yang menggunakan dua atau lebih pembangkit energi yang bekerja sama untuk mengatasi kekurangan maupun memanfaatkan kelebihan masing – masing agar tercipta suatu sistem yang handal disebut *hybrid power system*.

Hybrid power system antara *photovoltaic* dengan *fuel cell*, bekerja dengan memanfaatkan kelebihan daya yang dihasilkan oleh *photovoltaic* untuk menghasilkan *hydrogen*, yang nantinya *hydrogen* ini dapat digunakan oleh *fuel cell* untuk membangkitkan energi listrik jika terdapat kekurangan daya pada sistem. Untuk menjaga efisiensi penggunaan *hydrogen* tetap tinggi, *fuzzy logic controller* ditambahkan sebagai pengontrol aliran *hydrogen* menuju *fuel cell* agar kecepatan aliran *hydrogen* (*fuel flow rate*) sesuai dengan permintaan konsumsi *hydrogen* (*stack consumption*) pada *fuel cell*.

Logika *fuzzy* yang digunakan untuk mengontrol *fuel flow rate hydrogen* menuju *fuel cell*, menghasilkan efisiensi sebesar 79%. Sedangkan kekurangan daya pada sistem mampu diatasi oleh *fuel cell* dengan total konsumsi volume *hydrogen* sebesar 1900 liter dari total produksi volume *hydrogen* oleh *electrolyzer* sebesar 2070 liter. Sehingga sisa volume *hydrogen* yang sebesar 170 liter, dapat digunakan untuk mengatasi kekurangan daya awal pada hari ke dua. Dengan demikian, *hybrid*

power system antara *photovoltaic* dengan *fuel cell* layak untuk digunakan dalam memenuhi kebutuhan energi listrik bagi manusia.

PRAKATA

Puji syukur ke hadirat Allah SWT atas segala rahmat dan karunia-nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul *Simulasi Hybrid Power System antara Photovoltaic dengan Fuel Cell Menggunakan Fuzzy Logic Controller*. Skripsi ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat untuk menyelesaikan pendidikan strata satu (S1) pada Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Jember.

Penyusunan skripsi ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak, oleh karena itu penulis ingin menyampaikan ucapan terimakasih kepada:

1. Bapak Dedy Kurnia Setiawan, ST.,MT. Dan Bapak DR. Triwahju Hariyadi, ST.,MT. selaku dosen pembimbing skripsi yang telah banyak memberikan bimbingan dan mengarahkan penulis dalam menyelesaikan skripsi ini;
2. Dr. Azmi Saleh, ST., MT dan H. Samsul Bachri M, ST., M.MT. sebagai dosen penguji yang banyak memberikan masukan, perhatian, dan waktunya kepada saya selama penulisan skripsi ini;
3. Abi Abdul Azis dan Umi Suliyati tercinta yang telah membimbing langkahku sampai saat ini dengan segala doa, pengorbanan, perhatian, dan kasih sayang yang tak terkira;
4. Seluruh angkatan 2007 yang telah berjuang bersama selama beberapa tahun ini di kampus kita tercinta untuk mencapai cita-cita bersama menjadi seorang Sarjana Teknik;

Penelitian ini masih banyak kekurangan oleh karena itu, kritik dan saran diharapkan terus mengalir untuk lebih menyempurnakan skripsi ini, serta adanya pengembangan lebih lanjut pada masa yang akan datang. Semoga Skripsi ini bermanfaat.

Jember, 1 Januari 2012

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
PERSEMBAHAN	ii
MOTTO	iii
PERNYATAAN	iv
PENGESAHAN	vi
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	viii
RINGKASAN	ix
PRAKATA	xi
DAFTAR ISI	xii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xvii
DAFTAR LAMPIRAN	xvi
BAB 1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan	2
1.4 Manfaat	2
1.5 Batasan Penelitian	2
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1 Photovoltaic	4
2.2 Fuel Cell	5
2.3 Elektrolisis	7
2.4 Tabung Penyimpanan Hydrogen	7
2.5 Kendali Logika Fuzzy	8

2.6 Software Pendukung	12
2.6.1 MATLAB R2010b	12
2.6.1.1 Fuzzy Inference Sistem (FIS) Editor	12
2.6.1.2 Membership Function Editor	13
2.6.1.3 Rule Editor	14
2.6.1.4 Rule Viewer	15
2.6.1.5 Surface Viewer.....	16
BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN	17
3.1 Tempat dan Waktu Penelitian	17
3.2 Alogaritma Simulasi <i>Hybrid Power System Photovoltaic Dengan Fuel Cell</i>	17
3.3 Rancang Bangun dan Konfigurasi Sistem	18
3.4 Konfigurasi Simulasi	19
3.4.1 Gambaran Realisasi Simulasi	19
3.4.2 Data Intensitas Cahaya Matahari dan Data Pembebanan	20
3.4.3 Pemodelan <i>Photovoltaic</i>	23
3.4.4 Pemodelan Switching System	24
3.4.5 Pemodelan Boost DC – DC Converter	25
3.4.6 Pemodelan <i>Electrolyzer</i>	26
3.4.7 Pemodelan Tabung Penyimpanan <i>Hydrogen</i>	27
3.4.8 Pemodelan Katup.....	28
3.4.9 Pemodelan <i>Fuel Cell</i>	29
3.4.10 Pemodelan Buck DC – DC Converter	30
3.5 Prosedur Logika Fuzzy	31
3.6. Flowchart Kerja Sistem Hybrid Antara <i>Photovoltaic</i> dan <i>Fuel Cell</i>	35

BAB 4. ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN	37
4.1 Sistem <i>Switching</i>	37
4.2 Daya Lebih dan Kekurangan Daya	39
4.3 Produksi <i>Hydrogen</i>	40
4.4 Konsumsi <i>Hydrogen</i>	41
4.5 Efisiensi Penggunaan <i>Hydrogen</i>	44
4.6 Tegangan dan Daya Pada Sistem	46
4.7 Efisiensi Konversi Energi <i>Fuel Cell</i>	50
BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN	52
5.1 Kesimpulan	52
5.2 Saran	53
DAFTAR PUSTAKA	54
LAMPIRAN	55

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Kurva Karakteristik <i>Voltage</i> Terhadap <i>Current</i> Pada <i>Photovoltaic</i> dengan Intensitas Cahaya yang Berbeda-beda	4
Gambar 2.2 Kurva Karakteristik <i>Voltage</i> terhadap <i>Power</i> Pada <i>Photovoltaic</i> dengan Intensitas Cahaya yang Berbeda-beda.....	5
Gambar 2.3 Kurva <i>Voltage - Current</i> dan <i>Power - Current</i> Pada <i>PEM Fuel Cell</i> ..	6
Gambar 2.4 Diagram Pemetaan Input-Output	8
Gambar 2.5 Struktur Dasar Logika <i>Fuzzy</i>	11
Gambar 2.6 Tampilan <i>FIS Editor</i>	13
Gambar 2.7 Tampilan <i>Membership Function Editor</i>	14
Gambar 2.8 Tampilan <i>Rule Editor</i>	14
Gambar 2.9 Tampilan <i>Rule Viewer</i>	15
Gambar 2.10 Tampilan <i>Surface Viewer</i>	16
Gambar 3.1 Desain <i>Hybrid Power System Photovoltaic</i> dengan <i>Fuel Cell</i>	18
Gambar 3.2 Denah Rumah Tipe 45.....	17
Gambar 3.3 Grafik Intensitas Cahaya dalam Satuan W/m^2	19
Gambar 3.4 Grafik Pembebanan (<i>Plref</i>) dalam Satuan <i>Watt</i>	22
Gambar 3.5 Pemodelan <i>Photovoltaic</i>	23
Gambar 3.6 Pemodelan <i>Switching System</i>	24
Gambar 3.7 Pemodelan Boost DC – DC Conveter.....	25
Gambar 3.8 Pemodelan <i>Electroyzer</i>	26
Gambar 3.9 Pemodelan Tabung Penyimpanan <i>Hydrogen</i>	27
Gambar 3.10 Pemodelan Katup	28
Gambar 3.11 Pemodelan <i>Fuel Cell</i>	29
Gambar 3.12 Pemodelan <i>Buck DC – DC Conveter</i>	30
Gambar 3.13 Model <i>Fuzzy Logic Controller</i>	31
Gambar 3.14 Fungsi Keanggotaan Kekurangan Daya.....	31
Gambar 3.15 Fungsi Keanggotaan <i>Fuel Flow Rate</i>	32
Gambar 3.16 Pemodelan Defuzifikasi Pada Matlab	34
Gambar 3.17 Flowchart Kerja Sistem <i>Hybrid Photovoltaic</i> dengan <i>Fuel Cell</i>	35

Gambar 4.1 <i>Switch On / Off</i> dari <i>Photovoltaic, Electrolyzer, dan Fuel Cell</i>	38
Gambar 4.2 Grafik Daya Lebih dan Kekurangan Daya.....	39
Gambar 4.3 Volume <i>Hydrogen</i> Yang Dihasilkan Karena Kelebihan Daya	40
Gambar 4.4 Grafik Manajemen <i>Hydrogen</i> Dengan <i>Fuzzy Logic Controller</i>	41
Gambar 4.5 Grafik Manajemen <i>Hydrogen</i> Tanpa <i>Fuzzy Logic Controller</i>	42
Gambar 4.6 <i>Fuel Flow Rate, Stack Consumption</i> dan Efisiensi Menggunakan <i>Fuzzy Logic Controller</i>	44
Gambar 4.7 <i>Fuel Flow Rate, Stack Consumption</i> dan Efisiensi Tanpa <i>Fuzzy Logic Controller</i>	45
Gambar 4.9 Tegangan <i>Fuel Cell</i> Sebelum dan Sesudah <i>Buck DC – DC Converter</i>	47
Gambar 4.10 Tegangan Beban.....	47
Gambar 4.12 <i>Power Management</i>	49
Gambar 4.13 Grafik Produksi <i>Hydrogen</i> Oleh Daya Lebih	50
Gambar 4.15 Grafik Pembangkitan Daya Oleh Penggunaan <i>Hydrogen</i>	51

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 3.1 Jadwal Kegiatan Penelitian	17
Tabel 3.2 Data Intensitas Cahaya dan Pembebanan dari Pukul 05.00 – 12.00.....	20
Tabel 3.3 Data Intensitas Cahaya dan Pembebanan dari Pukul 13.00 – 21.00	20
Tabel 3.4 Data Intensitas Cahaya dan Pembebanan dari Pukul 22.00 – 05.00	20
Tabel 3.5 Konversi Waktu Nyata Menjadi Waktu Simulasi (time).....	21
Tabel 3.6 Aturan Fuzzy Logic Controller	33

DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
A. Spesifikasi Modul <i>Photovoltaic CAYMAXTM</i>	55

BAB 1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Krisis energi merupakan masalah yang sampai saat ini masih menyelimuti kehidupan. Salah satu penyebabnya adalah penggunaan sumber - sumber energi yang tidak dapat diperbaharui, yang semakin lama semakin habis karena sumber energi ini telah digunakan sejak berabad-abad yang lalu. Salah satu cara untuk mengatasi krisis energi adalah menggunakan pembangkit energi alternatif. Namun, beberapa pembangkit energi alternatif bergantung pada keadaan alam dan bahan bakar tertentu saja, contohnya *photovoltaic* dan *fuel cell*.

Photovoltaic yang dapat mengubah energi cahaya matahari menjadi energi listrik hanya bekerja pada siang hari, sehingga *photovoltaic* tidak akan menghasilkan energi listrik pada malam hari. Sedangkan *fuel cell* hanya menghasilkan energi listrik selama terdapat *hydrogen* yang dialirkan pada *fuel cell*, sehingga *fuel cell* tidak akan bekerja jika tidak ada persediaan *hydrogen* yang cukup. Namun, kedua pembangkit ini dapat digunakan secara bersama dengan menggunakan *hybrid power system*.

Hybrid power system adalah sistem yang menggunakan dua atau lebih pembangkit energi yang bekerja sama untuk mengatasi kekurangan maupun memanfaatkan kelebihan masing – masing agar tercipta suatu sistem yang handal. *Hybrid power system* antara *photovoltaic* dengan *fuel cell*, bekerja dengan memanfaatkan kelebihan daya yang dihasilkan oleh *photovoltaic* untuk menghasilkan *hydrogen*, yang nantinya *hydrogen* ini dapat digunakan oleh *fuel cell* untuk membangkitkan energi listrik jika terdapat kekurangan daya pada sistem. Strategi kontrol *hybrid power system* antara *photovoltaic* dengan *fuel cell* telah diteliti oleh Li Wei pada jurnalnya (Li Wei, 2009), namun dalam perancangannya tidak dilakukan kontrol aliran *hydrogen* dari tabung penyimpanan gas *hydrogen* menuju *fuel cell*. Dalam penelitian ini, *fuzzy logic controller* ditambahkan sebagai pengontrol aliran *hydrogen* menuju *fuel cell* agar kecepatan aliran *hydrogen* (*fuel*

flow rate) sesuai dengan permintaan konsumsi *hydrogen (stack consumption)* pada *fuel cell*.

1.2 Rumusan Masalah

Dalam penelitian ini dirumuskan masalah yaitu bagaimana merancang *hybrid power system* antara *photovoltaic* dengan *fuel cell* menggunakan aplikasi Matlab dan bagaimana mengaplikasikan *fuzzy logic controller* dalam *hybrid power system* antara *photovoltaic* dengan *fuel cell*.

1.3 Tujuan

Penelitian yang dilakukan ini memiliki beberapa tujuan diantaranya adalah:

1. Merancang sistem *hybrid* dengan *photovoltaic* sebagai pembangkit energi listrik utama dan *fuel cell* sebagai pembangkit energi listrik cadangan.
2. Menjaga kontinuitas suplai pada beban.
3. Mengaplikasikan *fuzzy logic controller* dalam melakukan pengontrolan *fuel flow rate*.

1.4 Manfaat

Setelah penelitian ini berhasil dilakukan diharapkan *hybrid power system* antara *photovoltaic* dengan *fuel cell* menjadi salah satu alternatif untuk mengatasi masalah krisis energi dan mengurangi pencemaran lingkungan yang disebabkan oleh penggunaan energi fosil.

1.5 Batasan Penelitian

Batasan masalah dalam penelitian ini antara lain :

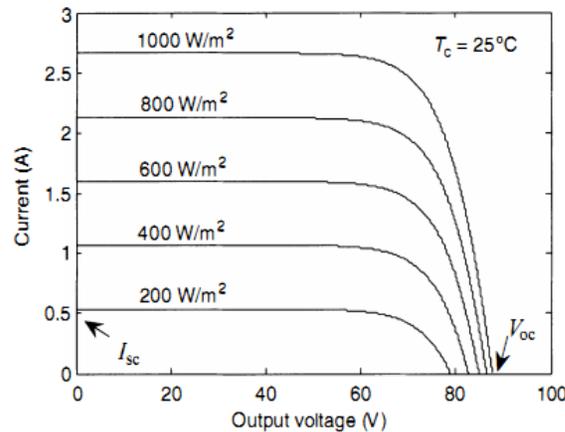
- 1) Pemodelan tabung penyimpanan hidrogen dalam keadaan kamar / RTP (*Room Temperature and Pressure*), 25⁰C dan tekanan 1 atm.
- 2) Beban yang digunakan adalah *DC load*.
- 3) Nilai intensitas cahaya merujuk pada jurnal (Li Wei, 2009).

- 4) Tidak menggunakan perubahan suhu sebagai masukan untuk *photovoltaic*.
- 5) *Electrolyzer* menggunakan 55 buah sel.
- 6) Besar kapasitas tabung penyimpanan *hydrogen* adalah 2250 liter dengan volume *hydrogen* awal adalah 93 liter.
- 7) Air yang digunakan dalam proses elektrolisis dianggap selalu dalam keadaan murni.

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Photovoltaic

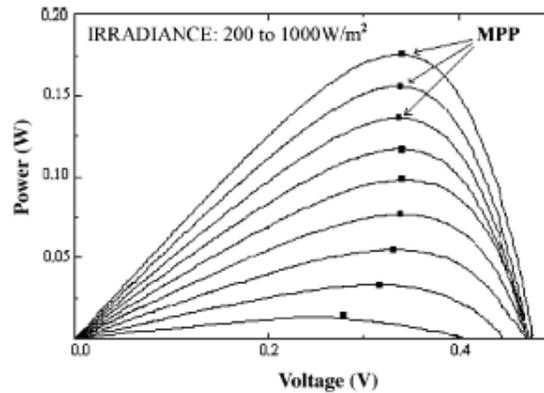
Sebuah *photovoltaic* (sel surya) adalah perangkat *solid state* yang mengubah energi sinar matahari menjadi energi listrik oleh efek fotovoltaiik. Beberapa sel surya yang saling terhubung dikemas sebagai modul. Modul tersebut kemudian saling berhubungan, secara seri atau paralel, atau keduanya, untuk membuat sebuah *array* dengan puncak tegangan dan arus DC yang diinginkan. Gambar 2.1 adalah karakteristik dari *photovoltaic*.



Gambar 2.1 Kurva Karakteristik Voltage Terhadap Current Pada Photovoltaic dengan Intensitas Cahaya yang Berbeda-beda

Pada Gambar 2.1, menunjukkan bahwa *photovoltaic* yang bekerja pada suhu 25°C akan menghasilkan arus listrik yang semakin besar jika intensitas cahaya yang diterimanya semakin besar pula.

Kurva karakteristik tegangan dan daya pada *Photovoltaic* dengan intensitas cahaya yang berbeda-beda, ditunjukkan pada Gambar 2.2. Pada Gambar 2.2, nilai MPP (*Maximal Power Point*) diperoleh dari hasil perkalian tegangan maksimal dan arus maksimal. MPP akan semakin besar jika intensitas cahaya yang diterima *photovoltaic* semakin besar.



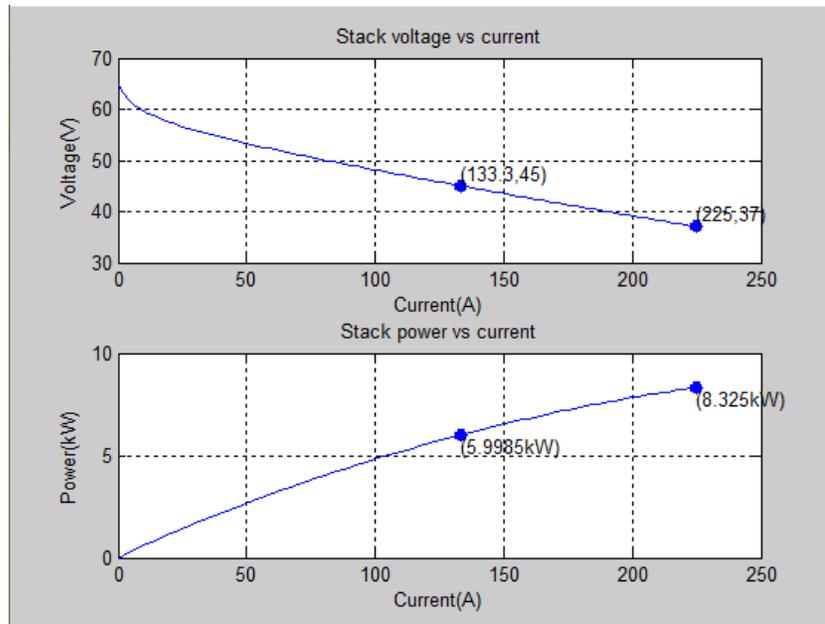
Gambar 2.2 Kurva Karakteristik *Voltage* terhadap *Power* Pada *Photovoltaic* dengan Intensitas Cahaya yang Berbeda-beda

2.2 Fuel Cell

Fuel cell adalah sebuah alat elektrokimia yang mirip dengan baterai, tetapi berbeda karena *fuel cell* dirancang untuk dapat diisi terus reaktannya. *Fuel cell* memproduksi listrik dari penyediaan bahan bakar hidrogen dan oksigen dari luar. Reaktan yang biasanya digunakan dalam sebuah sel bahan bakar adalah *hydrogen* di sisi anode dan oksigen di sisi katoda. Aliran reaktan mengalir masuk dan produk dari reaktan mengalir keluar. Sehingga operasi jangka panjang dapat terus menerus dilakukan selama aliran tersebut dapat dijaga kelangsungannya.

Dalam salah satu contoh sel bahan bakar, yaitu sel bahan bakar membran penukar proton *hydrogen/oxygen*, suatu membran polimer penghantar-proton memisahkan bagian anoda dan katoda. Di sisi anoda, *hydrogen* berdifusi ke katalis anoda di mana *hydrogen* kemudian terdisosiasi menjadi proton dan elektron. Proton bergerak melalui membran ke katoda, tetapi elektron dipaksa untuk bergerak dalam sebuah sirkuit eksternal untuk menyuplai listrik. Pada katalis katoda, molekul oksigen bereaksi dengan elektron dan proton untuk membentuk air sebagai produk limbahnya.

Karakteristik PEM *fuel cell* 45V 6kW dapat dilihat pada Gambar 2.3.

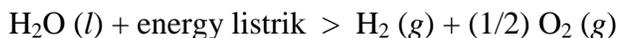


Gambar 2.3 Kurva *Voltage - Current* dan *Power - Current* Pada PEM Fuel Cell

Pada Gambar 2.3, tegangan *fuel cell* 45V mengalirkan arus 133.3A sehingga menghasilkan daya 5.99kW. Sedangkan jika tegangan *fuel cell* 37V, *fuel cell* akan mengalirkan arus 225A dan menghasilkan daya 8.325kW.

2.3 Elektrolisis

Elektrolisis adalah proses yang memecah air menjadi gas *hydrogen* dan oksigen dengan mengalirkan arus listrik diantara dua elektroda. Reaksi elektrokimia dari elektrolisis air yaitu



Nilai *hydrogen* yang diproduksi pada sebuah elektrolisis dapat di hitung dengan persamaan (2.1)

$$m_{\text{H}_2} = \eta_{\text{F}} (nI / F) \dots\dots\dots (2.1)$$

keterangan,

m_{H_2} adalah kecepatan produksi *hydrogen*, mole per sekon (mol/s)

η_{F} adalah efisiensi Faraday

n adalah banyaknya *cell* yang terhubung seri

I adalah arus yang menuju *electrolyzer* (A)

F adalah konstanta Faraday (96.485 C mol⁻¹)

2.4 Tabung Penyimpanan Hydrogen

Berdasarkan pada hukum ideal gas, persamaan tekanan pada sebuah tabung penyimpanan yaitu

$$P \times V = n \times R \times T \dots\dots\dots (2.2)$$

sehingga besarnya volume *hydrogen* didapat dengan rumus

$$V = (nRT / P) \dots\dots\dots (2.3)$$

keterangan

P adalah tekanan di dalam tabung (atm)

n adalah banyaknya mole (mol)

R adalah konstanta gas (0.082 L atm K⁻¹ mol⁻¹)

T adalah suhu dari gas (Kelvin)

V adalah volume gas (liter)

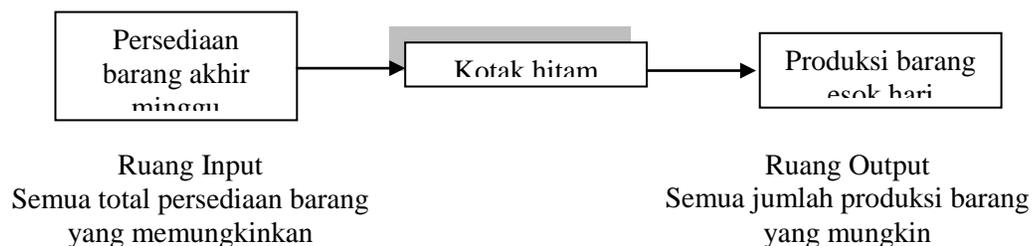
2.5 Kendali Logika Fuzzy

Orang yang belum pernah mengenal logika fuzzy pasti akan mengira bahwa logika fuzzy adalah sesuatu yang rumit dan tidak menyenangkan. Akan tetapi sekali orang mengenalnya, ia pasti akan sangat tertarik dan akan menjadi pendatang baru untuk ikut serta mempelajari logika fuzzy. Logika fuzzy dikatakan sebagai logika baru yang lama, sebab ilmu tentang logika fuzzy modern dan metodis baru ditemukan beberapa tahun yang lalu, padahal sebenarnya konsep tentang logika fuzzy itu sendiri sudah ada pada diri kita sejak lama.

Logika fuzzy adalah suatu cara yang tepat untuk memetakan suatu ruang input kedalam suatu ruang output. Sebagai contoh sederhana dalam kehidupan sehari-hari adalah:

1. Manajer pergudangan mengatakan pada manajer produksi seberapa banyak seberapa banyak persediaan barang pada akhir minggu, kemudian manajer produksi akan menetapkan jumlah barang yang harus diproduksi esok hari.
2. Pelayan restoran memberikan pelayanan terhadap tamu, kemudian tamu akan memberikan tips yang sesuai atas baik tidaknya pelayanan yang diberikan.
3. Anda mengatakan kepada saya seberapa sejuk ruangan yang anda inginkan, saya akan mengatur putaran kipas yang ada pada ruangan ini.
4. Penumpang taksi berkata kepada sopir taksi seberapa cepat laju kendaraan yang diinginkan, sopir taksi akan mengatur pijakan gas taksinya.

Salah satu contoh pemetaan suatu input-output dalam bentuk grafis seperti terlihat pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Diagram Pemetaan Input-Output

Antara input dan output terdapat suatu kotak hitam yang harus memetakan input ke output yang sesuai. Selama ini ada beberapa cara yang mampu bekerja pada kotak hitam tersebut, antara lain:

1. Sistem fuzzy
2. Sistem linear
3. Sistem pakar
4. Jaringan syaraf
5. Persamaan differensial
6. Tabel interpolasi multi dimensi

Meskipun ada beberapa cara yang mampu bekerja dalam kotak hitam tersebut, namun sistem fuzzy akan memberikan solusi yang paling baik. Karena seperti yang telah dikemukakan oleh *Lotfi A. Zadeh* bapak dari logika fuzzy: “Pada hampir semua kasus kita dapat menghasilkan suatu produk tanpa menggunakan logika fuzzy, namun menggunakan logika fuzzy akan lebih cepat dan murah”.

Ada beberapa alasan mengapa orang menggunakan logika fuzzy, antara lain yaitu:

1. Konsep logika fuzzy mudah dimengerti. Konsep matematis yang mendasari penalaran fuzzy sangat sederhana dan mudah dimengerti.
2. Logika fuzzy sangat fleksibel.
3. Logika fuzzy memiliki toleransi terhadap data-data yang tidak tepat.
4. Logika fuzzy mampu memodelkan fungsi-fungsi non linear yang sangat kompleks.
5. Logika fuzzy dapat membangun dan mengaplikasikan pengalaman-pengalaman para pakar secara langsung tanpa harus melalui proses pelatihan.
6. Logika fuzzy dapat bekerja sama dengan teknik-teknik kendali secara konvensional.
7. Logika fuzzy didasarkan pada bahasa alami.

Beberapa aplikasi logika fuzzy antara lain:

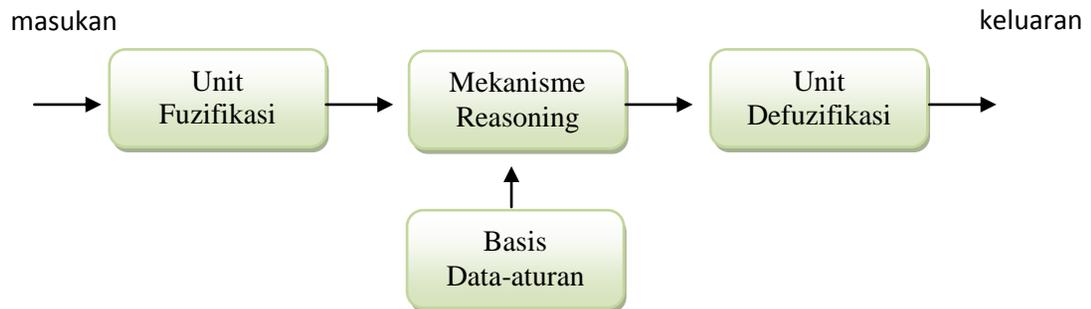
- a. Pada tahun 1990 pertama kali dibuat mesin cuci dengan logika fuzzy di Jepang. Sistem fuzzy digunakan untuk menentukan putaran yang tepat secara otomatis berdasarkan jenis dan banyaknya kotoran serta jumlah yang akan dicuci.
- b. Transmisi otomatis pada mobil. Mobil Nissan telah menggunakan sistem fuzzy pada transmisi otomatis, dan mampu menghemat bensin 12 – 17 %.
- c. Kereta bawah tanah Sendai mengontrol pemberhentian otomatis pada area tertentu.
- d. Ilmu kedokteran dan biologi, seperti sistem diagnosis yang didasarkan pada logika fuzzy.
- e. Ekonomi, seperti pemodelan fuzzy pada sistem pemasaran yang kompleks.
- f. Klasifikasi dan percobaan pola.
- g. Psikologi, seperti logika fuzzy untuk menganalisis kelakuan masyarakat, pencegahan dan investigasi kriminal.
- h. Ilmu-ilmu sosial, terutama untuk pemodelan informasi yang tidak pasti.
- i. Ilmu lingkungan, seperti kendali kualitas air, prediksi cuaca, dan sebagainya.
- j. Riset operasi, seperti penjadwalan dan pemodelan dan pengalokasian.
- k. Peningkatan kepercayaan, seperti kegagalan diagnosis, inspeksi dan monitoring produksi.

Pengendali logika fuzzy menyediakan piranti yang mampu mengubah strategi kontrol linguistik yang diturunkan dari cara berpikir seorang ahli menjadi strategi kontrol otomatis.

Struktur sederhana dari pengendali logika fuzzy secara umum terdiri dari :

1. Unit Fuzifikasi
2. Basis data-aturan
3. Mekanisme Reasoning
4. Unit Defuzifikasi

Dari keempat unsur tersebut diperoleh sebuah mekanisme pengendali, seperti yang tampak pada gambar 2.5



Gambar 2.5 Struktur Dasar Logika *Fuzzy*

a. Fuzifikasi

Untuk merancang kontrol logika fuzzy, maka terlebih dulu ditentukan fungsi keanggotaan dari setiap fuzzy set. Fungsi keanggotaan ditentukan pada masing-masing parameter input dan output.

b. Rule / Basis data aturan

Aturan-aturan alur penalaran fuzzy pada sistem, meliputi pemetaan input yang diberikan ketiap-tiap variabel input, fungsi aplikasi, komposisi aturan, sampai pada penentuan output tegas pada proses defuzifikasi.

c. Defuzifikasi

Merupakan pengenalan dari beberapa informasi yang tidak terprediksi dan merupakan hasil akhir dari proses yang dikehendaki.

2.6 Software Pendukung

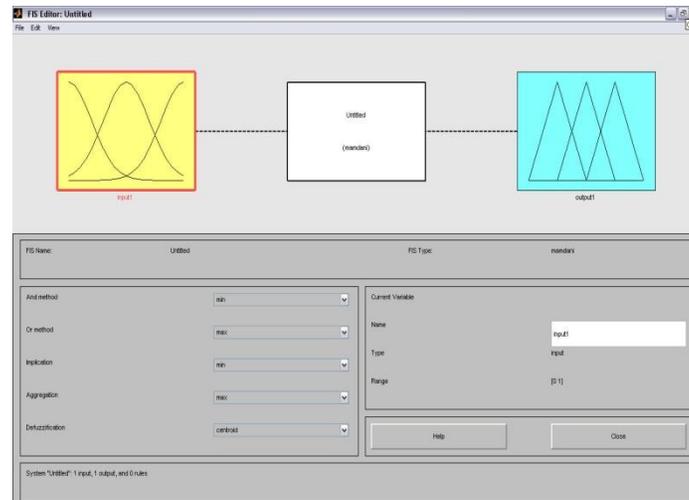
2.6.1 MATLAB R2010b

Pada perancangan simulasi pengaturan kecepatan motor DC ini menggunakan software MATLAB R2009a. Untuk dapat menggunakan fungsi-fungsi logika fuzzy yang ada pada MATLAB, maka harus diinstallkan terlebih dahulu toolbox fuzzy. Fuzzy logic toolbox memberikan fasilitas Graphical User Interface (GUI) untuk mempermudah dalam membangun suatu sistem fuzzy. Ada 5 GUI tools yang dapat digunakan untuk membangun, mengedit, dan mengobservasi sistem penalaran fuzzy, yaitu:

1. Fuzzy inference sistem (FIS) editor
2. Membership function editor
3. Rule editor
4. Rule viewer
5. Surface viewer

2.6.1.1 Fuzzy Inference Sistem (FIS) Editor

Apabila ingin membuat sistem penalaran fuzzy yang baru, maka cukup menuliskan *fuzzy* pada *command line* (`>> fuzzy`). FIS editor memungkinkan untuk melakukan berbagai fungsi penalaran fuzzy. Pada toolbar menu memungkinkan untuk membuka, menyimpan, mengedit atau menampilkan sistem fuzzy. Terdapat juga ikon variabel input dan variabel output yang memungkinkan untuk mengedit fungsi keanggotaan tiap-tiap variabel input dan mengedit fungsi keanggotaan tiap-tiap variabel output. Tampilan FIS editor dapat dilihat pada Gambar 2.6. Untuk mengedit aturan yang menuju ke rule editor bisa dengan cara menekan ikon diagram sistem. Sedangkan pop-up menu yang digunakan untuk mengatur fungsi-fungsipenalaran fuzzy, seperti AND, OR, fungsi implikasi, fungsi komposisi aturan (*agregasi*), atau metode defuzifikasi.

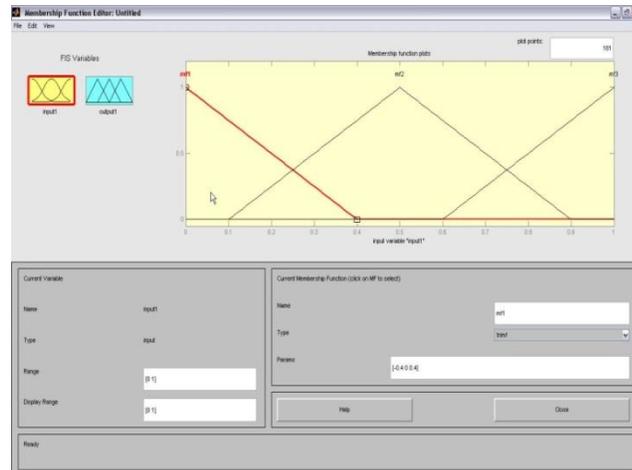


Gambar 2.6 Tampilan *FIS Editor*

2.6.1.2 Membership Function Editor

Editor ini berfungsi untuk mengedit fungsi keanggotaan himpunan fuzzy untuk tiap-tiap variabel input dan output. Tampilan membership function editor ditunjukkan pada Gambar 2.7. Editor ini dapat dipanggil dengan cara memilih menu *View – Edit membership function* atau menekan 2 kali (*double click*) ikon variabel input atau variabel output.

Pada toolbar menu memungkinkan untuk menyimpan, membuka, mengedit dan melihat sistem fuzzy. Untuk daerah variabel digunakan untuk mengedit fungsi keanggotaan salah satu variabel. Pop-up menu memungkinkan untuk memilih tipe atau jenis fungsi keanggotaan himpunan fuzzy yang ditunjuk.

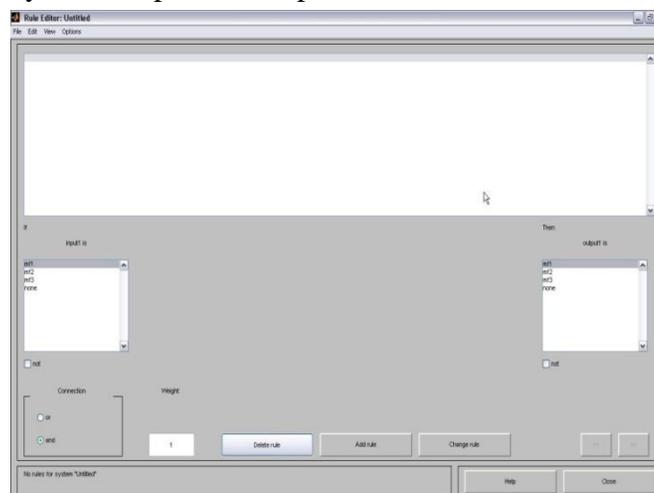


Gambar 2.7 Tampilan *Membership Function Editor*

2.6.1.3 Rule Editor

Rule editor digunakan baik untuk mengedit maupun menampilkan aturan yang akan atau telah dibuat. Gambar 2.8 adalah tampilan rule editor. Editor ini dapat dipanggil dengan cara memilih menu *View – Edit rules* atau menekan 2 kali (*double click*) ikon diagram sistem.

Pada menu pilihan memungkinkan untuk menyimpan, membuka, mengedit dan melihat sistem fuzzy. Listbox yang terdapat pada tampilan berisi himpunan-himpunan fuzzy untuk input dan output.

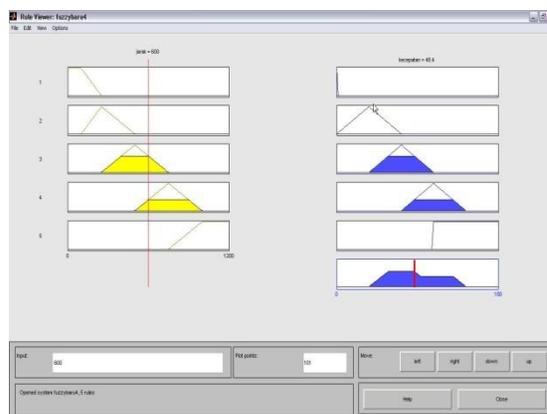


Gambar 2.8 Tampilan *Rule Editor*

2.6.1.4 Rule Viewer

Viewer ini berguna untuk melihat penalaran fuzzy pada sistem, meliputi pemetaan input yang diberikan ketiap-tiap variabel input, aplikasi operator dan fungsi aplikasi, komposisi (agregasi) aturan, sampai pada penentuan output tegas pada metode defuzifikasi. Tampilan rule viewer ditunjukkan pada Gambar 2.9. Viewer ini dapat dipanggil dengan cara memilih menu *View – View rules* atau menekan tombol *Ctrl + 5*.

Pada menu pilihan berfungsi untuk menyimpan, membuka, mengedit dan melihat sistem fuzzy. Kolom kuning menunjukkan variabel input yang digunakan dalam aturan. Kolom biru menunjukkan variabel output yang digunakan dalam aturan. Tiap-tiap baris menunjukkan satu aturan. Apabila ingin mengetahui aturan tersebut, tekan nomor aturan satu kali kemudian akan muncul aturan tersebut pada status bar. Pop-up menu menunjukkan kombinasi output dari tiap-tiap aturan yang terbentuk dari fungsi komposisi yang digunakan, kemudian dilanjutkan dengan proses defuzifikasi.

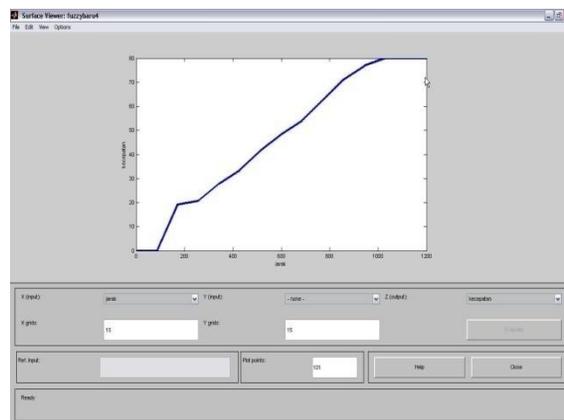


Gambar 2.9 Tampilan *Rule Viewer*

2.6.1.5 Surface Viewer

Viewer ini berguna untuk melihat gambar pemetaan antara variabel-variabel input dan variabel-variabel output. Viewer ini dapat dipanggil dengan cara memilih menu *View – View surface* atau menekan tombol *Ctrl + 6*. Maka akan muncul surface viewer seperti pada Gambar 2.10.

Pada menu pilihan memungkinkan untuk menyimpan, membuka, mengedit dan melihat sistem fuzzy. Pop-up menu menunjukkan tampilan variabel input dan output. Pada surface viewer juga terdapat kolom untuk mengedit grid input dan inputan yang tidak dispesifikasikan. Sedangkan status bar menunjukkan operasi yang sedang dijalankan



Gambar 2.10 Tampilan *Surface Viewer*

BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian untuk membuat perancangan *hybrid power system photovoltaic* dengan *fuel cell* menggunakan program Matlab dilakukan di Laboratorium Dasar Konversi Energi, Kampus Fakultas Teknik, Universitas Jember di Jl. Slamet Riyadi no.62 Patrang, Jember. Sedangkan waktu penelitian ini dilaksanakan mulai Juli 2011.

Tabel 3.1 Jadwal Kegiatan Penelitian

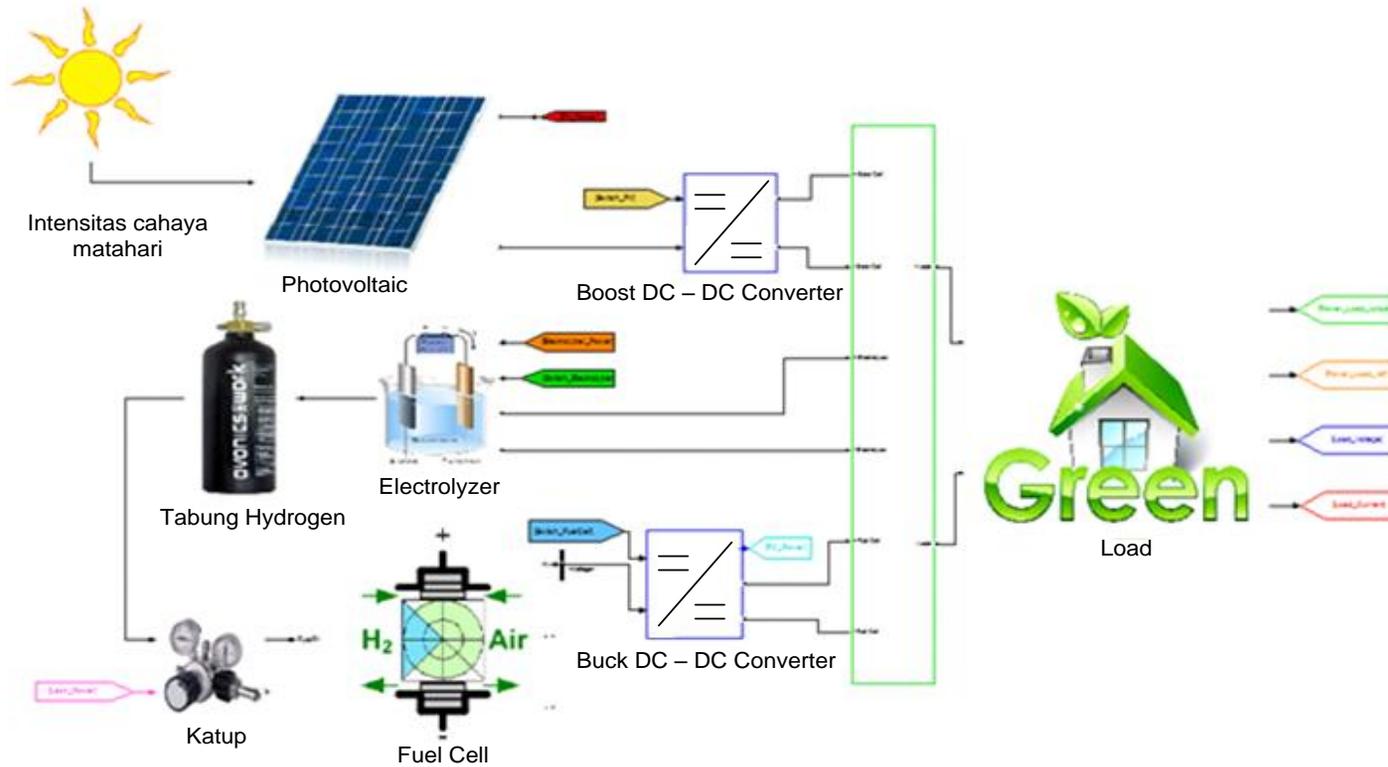
No	Kegiatan	Bulan					
		Jul i	Agustu s	Septembe r	Oktobe r	Novembe r	Desembe r
1	Studi literatur						
2	Perancangan simulasi						
3	Pembahasan						
4	Pembuatan laporan						

3.2 Algoritma Simulasi *Hybrid Power System Photovoltaic* Dengan *Fuel Cell*

Rancang bangun sistem dalam simulasi *hybrid power system photovoltaic* dengan *fuel cell* dapat dilihat pada Gambar 3.1. Data input adalah intensitas cahaya matahari yang akan diubah menjadi daya listrik (P_{pv}) oleh *photovoltaic*. P_{pv} dibandingkan dengan daya permintaan beban (P_L). Jika besarnya daya listrik yang dihasilkan *photovoltaic* lebih besar dari daya yang diminta beban, maka kelebihan daya (P_{el}) dari *photovoltaic* akan disimpan pada dalam bentuk *hydrogen* melalui proses elektrolisa oleh *electrolyzer*. Sebaliknya, jika daya yang dihasilkan *photovoltaic* kurang dari yang dibutuhkan beban, maka katup tabung *hydrogen* akan membuka dengan kontrol *fuzzy* sehingga *hydrogen* akan mengalir pada *fuel cell* lalu *fuel cell* akan menghasilkan daya listrik (P_{fc}) untuk mengatasi kekurangan daya.

3.3 Rancang Bangun dan Konfigurasi Sistem

Berikut ini rancang bangun sistem dalam simulasi *hybrid power system* antara *photovoltaic* dengan *fuel cell*.

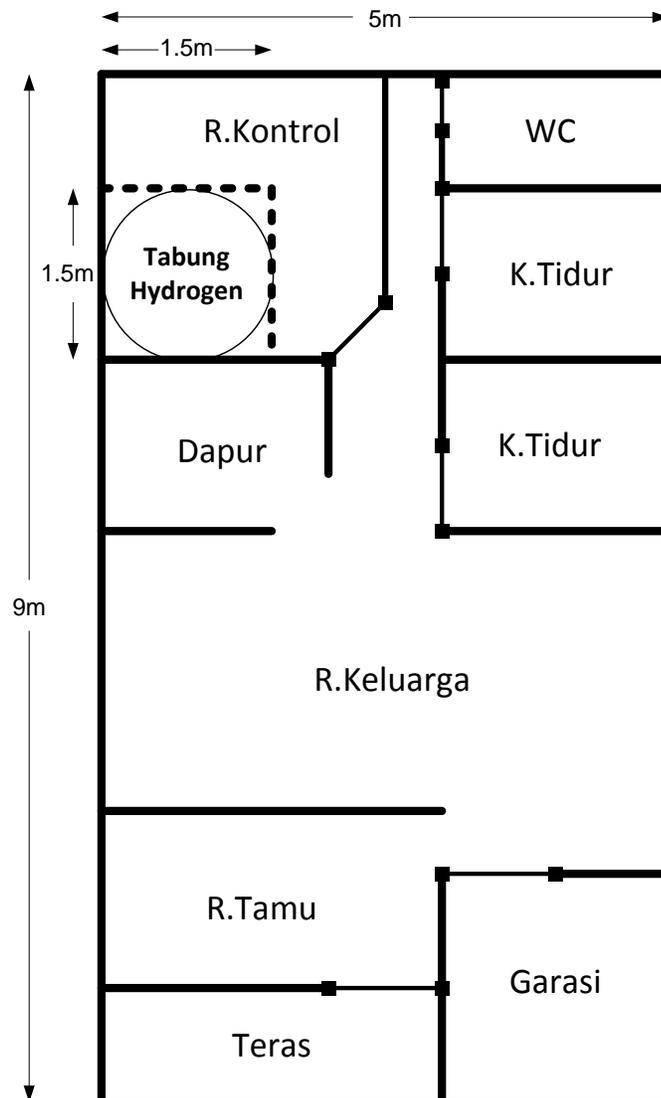


Gambar 3.1 Desain *Hybrid Power System Photovoltaic* dengan *Fuel Cell*

3.4 Konfigurasi Simulasi

3.4.1 Gambaran Realisasi Simulasi

Gambar 3.2 adalah gambar denah rumah tipe45 yang digunakan pada simulasi ini dengan luas 45m^2 . Tabung *hydrogen* yang digunakan memiliki ukuran jari-jari dan tinggi sebesar 0.75m dan 1.3m , sehingga volume tabung adalah $\pi \times 0.75^2 \text{ m} \times 1.27\text{m} = 2.25\text{m}^3 = 2250 \text{ dm}^3 = 2250 \text{ liter}$.



Gambar 3.2 Denah Rumah Tipe 45

Parameter *photovoltaic* yang digunakan berdasarkan pada produk *CAYMAXTM Module* dengan *peak power* 200W, luas penampang 1.580m x 0.808m = 1.3m². Simulasi ini menggunakan 4 modul *photovoltaic* sehingga total *peak power* 800W dengan total luas penampang 5.2m².

3.4.2 Data Intensitas Cahaya Matahari dan Data Pembebanan

Data intensitas cahaya matahari yang digunakan dalam simulasi ini disesuaikan dengan data yang ada pada jurnal (Li Wei, 2009), sedangkan data pembebanan dibuat oleh penulis sendiri. Data intensitas cahaya matahari dan data pembebanan dapat dilihat pada Tabel 3.2 – 3.4.

Tabel 3.2 Data Intensitas Cahaya dan Pembebanan dari Pukul 05.00 – 12.00

Load (Watt)	100	100	100	100	200	200	200	200
Irradiance (W/m2)	60	80	150	300	500	650	800	850
Time in matlab	0	3600	7200	10800	14400	18000	21600	25200
Real time	5	6	7	8	9	10	11	12

Tabel 3.3 Data Intensitas Cahaya dan Pembebanan dari Pukul 13.00 – 21.00

Load (Watt)	300	300	300	300	300	400	400	400	400
Irradiance (W/m2)	800	670	400	100	20	0	0	0	0
Time in matlab	28800	32400	36000	39600	43200	46800	50400	54000	57600
Real time	13	14	15	16	17	18	19	20	21

Tabel 3.4 Data Intensitas Cahaya dan Pembebanan dari Pukul 22.00 – 05.00

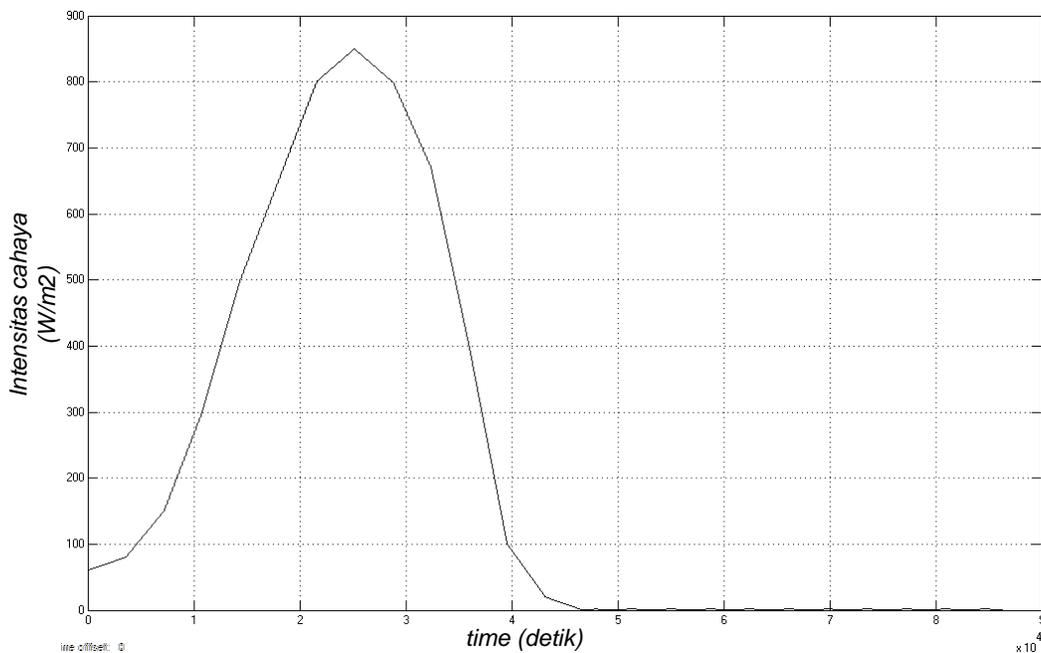
Load (Watt)	200	200	200	100	100	100	100	100
Irradiance (W/m2)	0	0	0	0	0	0	0	60
Time in matlab	61200	64800	68400	72000	75600	79200	82800	86400
Real time	22	23	24	1	2	3	4	5

Estimasi waktu simulasi adalah dua puluh empat jam dimulai dari pukul 05.00 – 05.00 esok hari dengan *simulation stop time* 24 jam x 3600 detik sama dengan 86400 detik. Tabel 3.5 adalah konversi waktu nyata menjadi waktu simulasi.

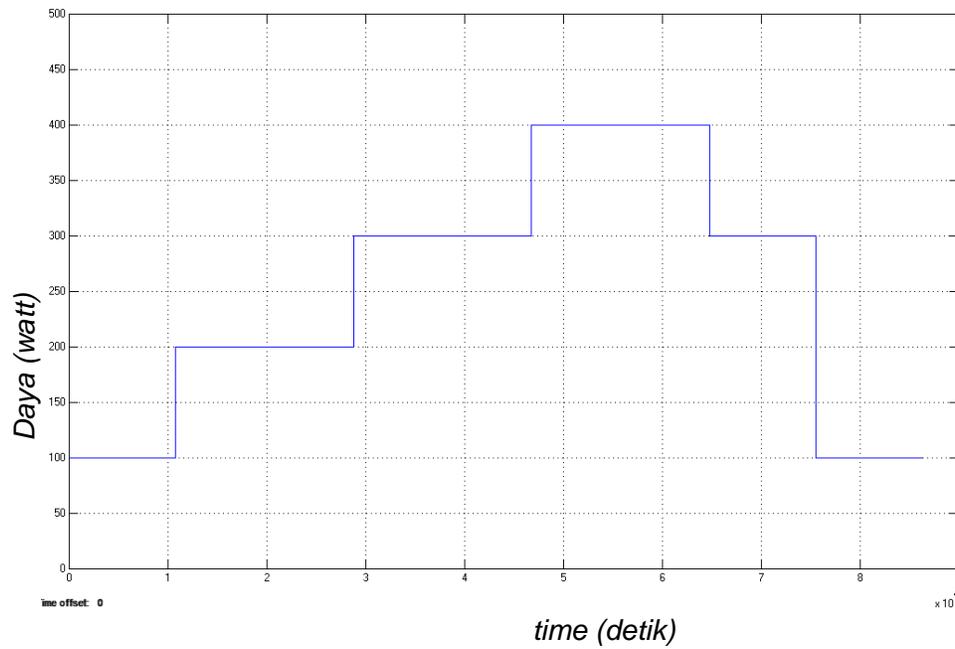
Tabel 3.5 Konversi Waktu Nyata Menjadi Waktu Simulasi (time)

Waktu nyata	Waktu simulasi (time)	Waktu nyata	Waktu simulasi (time)	Waktu nyata	Waktu simulasi (time)
5	0	14	32400	23	64800
6	3600	15	36000	24	68400
7	7200	16	39600	1	72000
8	10800	17	43200	2	75600
9	14400	18	46800	3	79200
10	18000	19	50400	4	82800
11	21600	20	54000	5	86400
12	25200	21	57600		
13	28800	22	61200		

Grafik intensitas cahaya pada Gambar 3.3 merujuk pada Tabel 3.2 – 3.4 dengan intensitas cahaya maksimal pada *time* 25200 (pukul 12.00) yaitu 850 W/m². Sedangkan Grafik pembebanan (Plref) pada Gambar 3.4 merujuk pada Tabel 3.2 – 3.4 dengan beban terendah dan tertinggi adalah 100W dan 400W.



Gambar 3.3 Grafik Intensitas Cahaya dalam Satuan W/m²

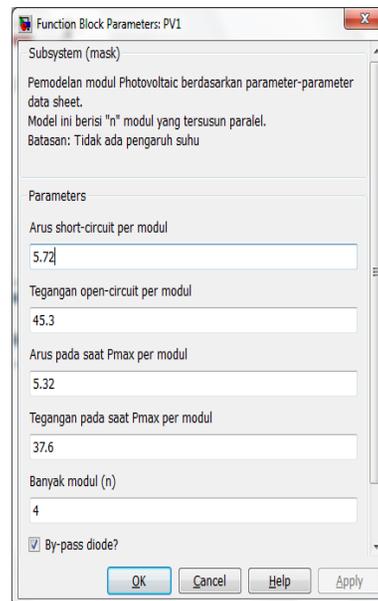
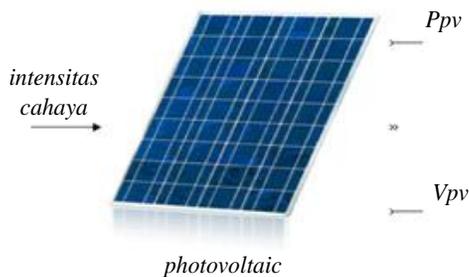


Gambar 3.4 Grafik Pembebanan (P_{Iref}) dalam Satuan Watt

Grafik intensitas cahaya akan menjadi input bagi blok *photovoltaic* dan grafik pembebanan akan menjadi input bagi blok *switching system*.

3.4.3 Pemodelan *Photovoltaic*

Gambar 3.5 adalah gambar pemodelan *photovoltaic* dalam simulink. Blok *photovoltaic* yang digunakan adalah *photovoltaic module* produk dari perusahaan ECEN 2060 yang tersedia dalam situsnya. Parameter-parameter yang digunakan pada *photovoltaic* diambil dari *datasheet CAYMAXTM Module*. Power maksimal (P_{max}) *photovoltaic* adalah 800W. P_{max} dapat dicapai jika intensitas cahaya matahari $1000\text{W}/\text{m}^2$.

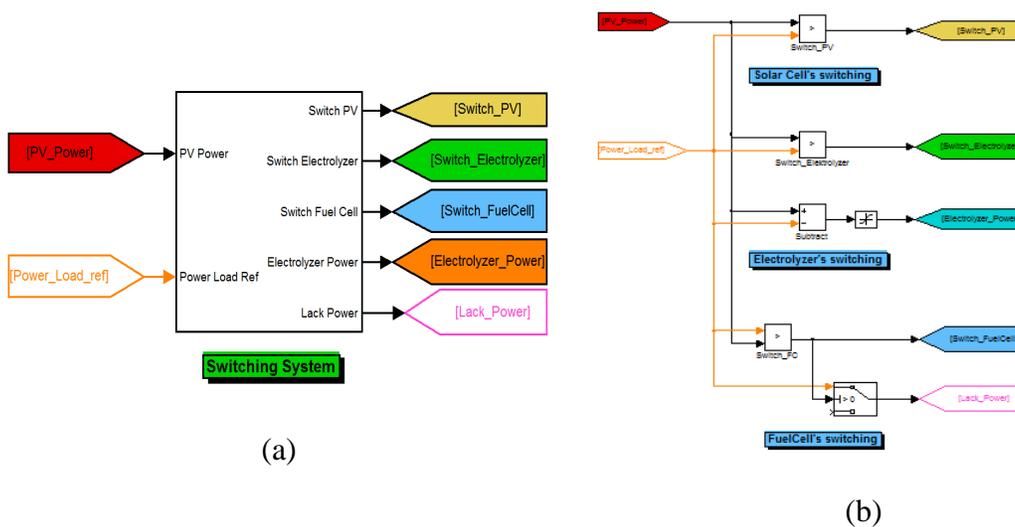


(a) Blok Diagram (b) Blok Parameter
Gambar 3.5 Pemodelan Photovoltaic

Output dari blok *photovoltaic* ini adalah tegangan (V_{pv}) dan daya (P_{pv}). V_{pv} akan menjadi input pada blok *boost DC – DC converter* sedangkan P_{pv} akan menjadi input pada blok *switching system*.

3.4.4 Pemodelan Switching System

Gambar 3.6 adalah gambar pemodelan *switching system* dalam simulink. Blok ini berfungsi untuk mengontrol *on-off* pada blok *boost DC – DC converter photovoltaic, electrolyzer* dan *buck DC – DC converter fuel cell*.

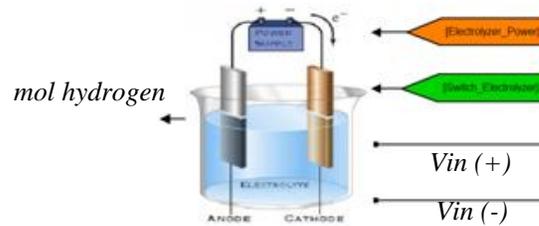


(a) Blok Diagram (b) Blok Kontrol
Gambar 3.6 Pemodelan *Switching System*

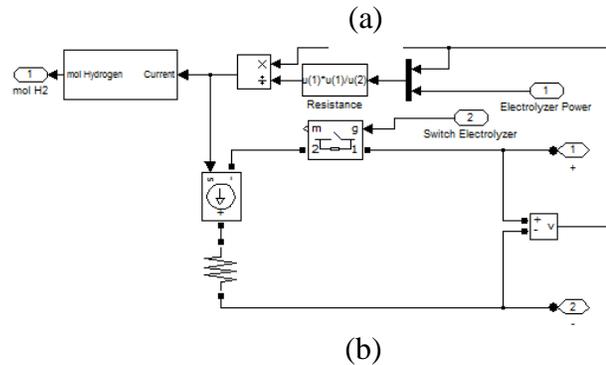
Switch photovoltaic dan *electroyzer* akan *on* jika $P_{pv} > P_{pref}$. Selisih keduanya adalah besarnya daya listrik yang dialirkan pada *electrolyzer* (P_{el}). *Switch fuel cell* akan *on* jika $P_{pv} < P_{pref}$. Selisih keduanya adalah kekurangan daya (P_{lack}) yang akan disuplai oleh *fuel cell* (P_{fc}).

3.4.6 Pemodelan *Electrolyzer*

Gambar 3.8 adalah gambar blok *electrolyzer* dalam simulink. *Electrolyzer* mengubah arus yang melaluinya menjadi mol *hydrogen* dan mol oksigen.



Boost DC – DC Converter



(a) Blok Diagram (b) Blok Kontrol
Gambar 3.8 Pemodelan *Electrolyzer*

Besarnya mol *hydrogen* yang dihasilkan per detik dapat diketahui dengan persamaan (3.1)

$$m_{H2} = \eta_F (nI / F) \dots\dots\dots (3.1)$$

keterangan,

- m_{H2} adalah kecepatan produksi hydrogen, mol per sekon (mol/s)
- η_F adalah efisiensi Faraday, bernilai 0.942
- n adalah banyaknya *cell* yang terhubung seri, sebanyak 55 *cells*
- I adalah arus yang menuju *electrolyzer* (A)
- F adalah konstanta Faraday (96.485 C mol⁻¹)

Total mol *hydrogen* yang dihasilkan adalah *output* dari blok ini. Nilai totalnya didapat dengan menambahkan hasil perhitungan saat ini dengan sebelumnya.

3.4.7 Pemodelan Tabung Penyimpanan *Hydrogen*

Gambar 3.9 adalah gambar blok tabung penyimpanan *hydrogen*. Berdasarkan pada hukum ideal gas, persamaan tekanan pada sebuah tabung penyimpanan yaitu

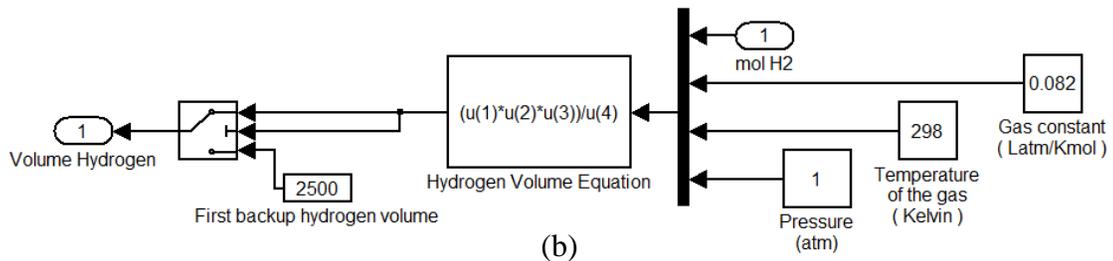
$$P \times V = n \times R \times T \dots\dots\dots (3.2)$$



Tabung hydrogen

(a)

(a) Blok Diagram (b) Rangkaian Kontrol
Gambar 3.9 Pemodelan Tabung Penyimpanan *Hydrogen*



(b)

Besarnya volume *hydrogen* didapat dengan persamaan (3.3)

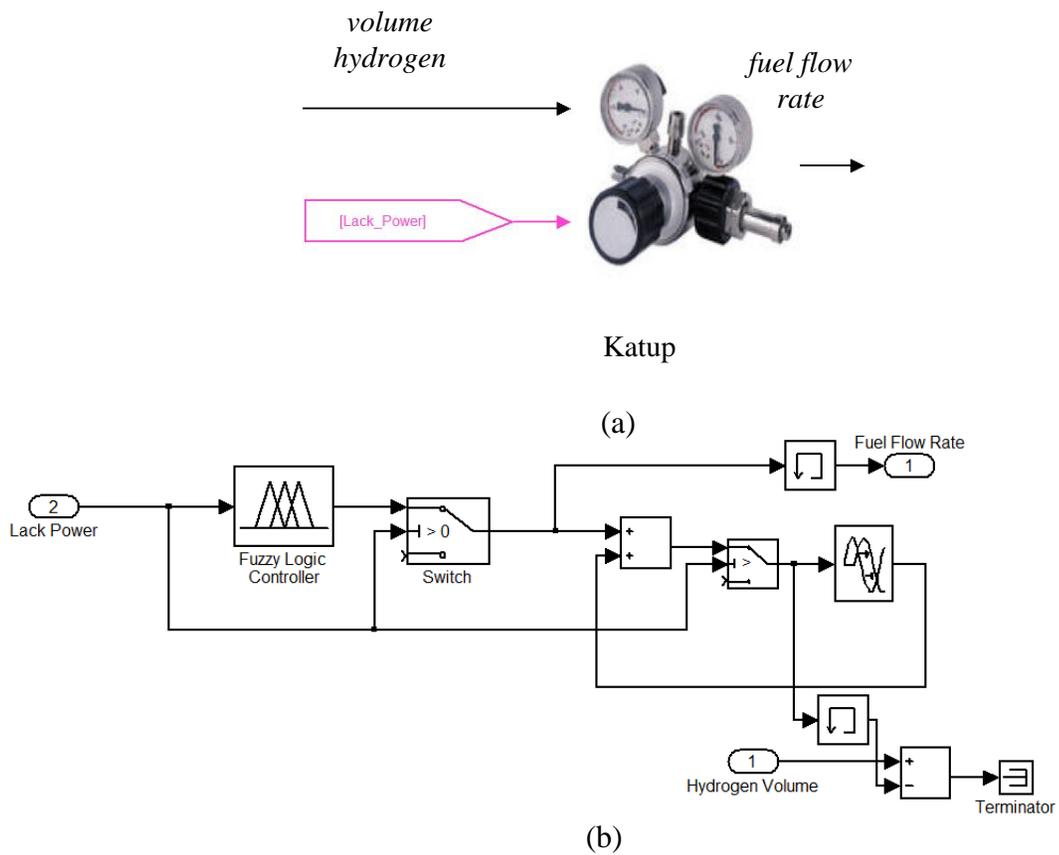
$$V = (nRT / P) \dots\dots\dots (3.3)$$

keterangan,

- P adalah tekanan di dalam tabung (atm)
- n adalah banyaknya mole (mol)
- R adalah konstanta gas (0.082 L atm K⁻¹ mol⁻¹)
- T adalah suhu dari gas (Kelvin)
- V adalah volume gas (liter)

3.4.8 Pemodelan Katup

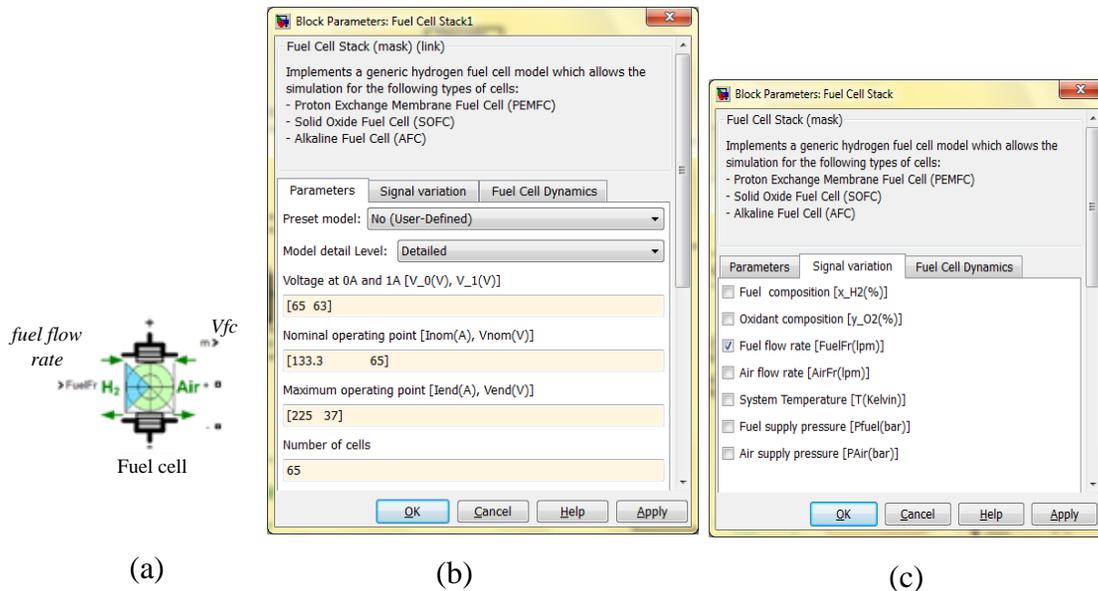
Gambar 3.10 adalah gambar blok katup dalam simulink. Pada blok ini berisi kontrol *fuzzy* dengan masukan *volume hydrogen* dan kekurangan daya (Plack), outputnya adalah kecepatan aliran *hydrogen* (*fuel flow rate*) dengan satuan lpm (liter per menit).



(a) Blok Diagram (b) Rangkaian Kontrol
Gambar 3.10 Pemodelan Katup

3.4.9 Pemodelan *Fuel Cell*

Gambar 3.11 adalah gambar blok *fuel cell* dalam simulink. Blok *fuel cell* diambil dari *library* simulink Matlab 2010b dengan tipe PEMFC 650W, tegangan nominal (V_{nom}) adalah 65V. *Input* berupa *fuel flow rate* dari pengaturan katup.

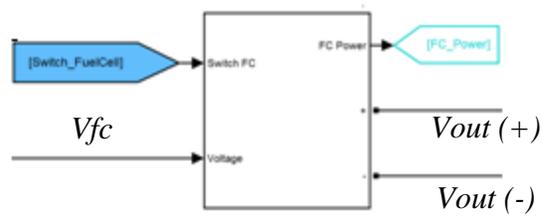


(a) Blok Diagram (b) Rangkaian Kontrol (c) Parameter *Fuel Flow Rate*
Gambar 3.11 Pemodelan *Fuel Cell*

Pemilihan *fuel flow rate* sebagai input bagi *fuel cell* dilakukan dengan mencentang pilihan *fuel flow rate* pada tab *signal variation* yang ada pada blok parameter *fuel cell*. Tegangan *output fuel cell* (V_{fc}) akan menjadi *input* pada *buck DC-DC converter*.

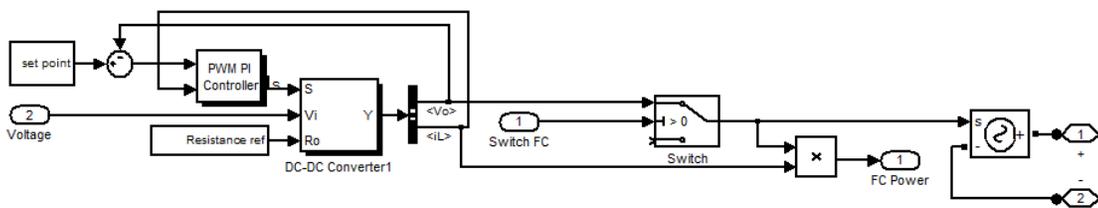
3.4.10 Pemodelan Buck DC – DC Converter

Gambar 3.12 adalah gambar pemodelan *buck DC – DC converter*. Blok ini berfungsi untuk menurunkan tegangan *photovoltaic* (V_{pv}) menjadi 48V dengan memakai kontrol *PID*. Kontrol *PID* memerlukan set point untuk membandingkan data outputnya. *Set point* yang dibutuhkan tergantung dari besarnya daya beban.



Buck DC – DC converter

(a)



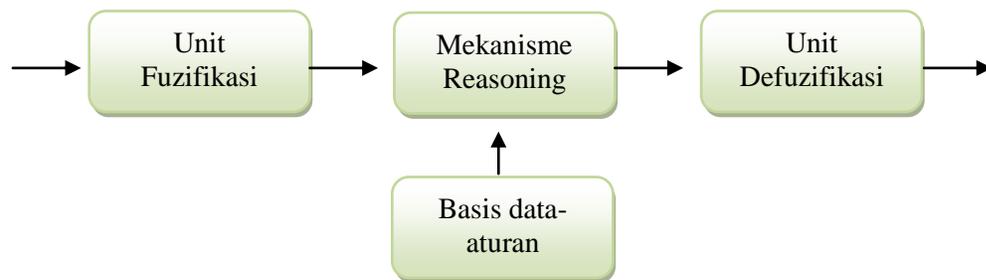
(b)

(a) Blok Diagram (b) Rangkaian Kontrol

Gambar 3.12 Pemodelan *Buck DC – DC Converter*

3.5 Prosedur Logika Fuzzy

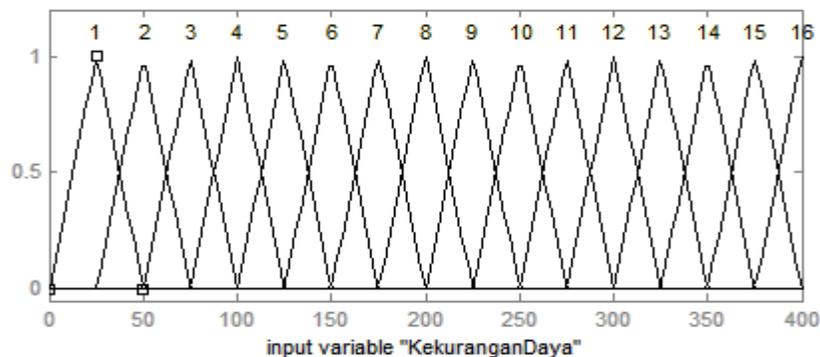
Masukan berupa kekurangan daya (Plack) diproses oleh sistem fuzzy yang meliputi langkah fuzifikasi, inferensi (basis data dan aturan), dan defuzifikasi. Langkah fuzifikasi didasari oleh fungsi keanggotaan setiap variable masukan. Dari membership function yang diperoleh maka dapat dibentuklah struktur dasar sebuah mekanisme kontrol fuzzy. Secara sederhana dapat digambarkan seperti pada Gambar 3.13 berikut :



Gambar 3.13 Model *Fuzzy Logic Controller*

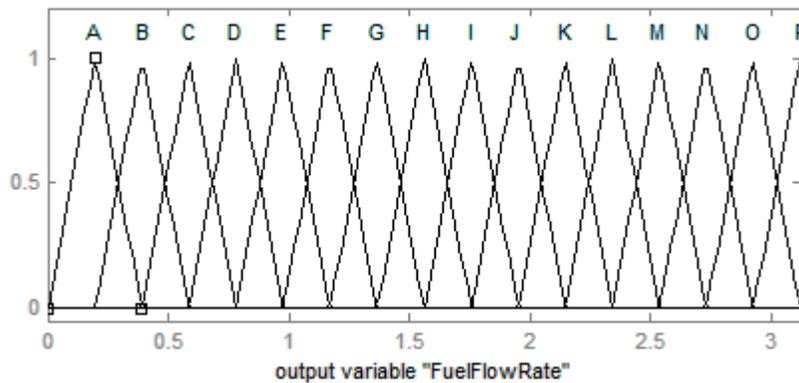
1. Fuzifikasi

Membership function untuk input kekurangan daya (Plack) adalah seperti Gambar 3.14, dengan ketentuan: 1 = 0 – 50W, 2 = 25 – 75W, 3 = 50 – 100W, 4 = 75 – 125W, 5 = 100 – 150W, 6 = 125 – 175W, 7 = 150 – 200W, 8 = 175 – 225W, 9 = 200 – 250W, 10 = 225 – 275W, 11 = 250 – 300W, 12 = 275 – 325W, 13 = 300 – 350W, 14 = 325 – 375W, 15 = 350 – 400W, 16 = 375 – 425W.



Gambar 3.14 Fungsi Keanggotaan Kekurangan Daya

Membership function untuk output *fuel flow rate* adalah seperti Gambar 3.15, dengan ketentuan: A: 0 – 0.39lpm, B: 0.195 – 0.585lpm, C: 0.39 – 0.78lpm, D: 0.585 – 0.975lpm, E: 0.78 – 1.17lpm, F: 0.975 – 1.365lpm, G: 1.17 – 1.56lpm, H: 1.365 – 1.755lpm, I: 1.56 – 1.95lpm, J: 1.755 – 2.145lpm, K: 1.95 – 2.34lpm, L: 2.145 – 2.535lpm, M: 2.34 – 2.73lpm, N: 2.535 – 2.925lpm, O: 2.73 – 3.12lpm, P: 2.925 – 3.2lpm.



Gambar 3.15 Fungsi Keanggotaan *Fuel Flow Rate*

2. Aturan / Rules

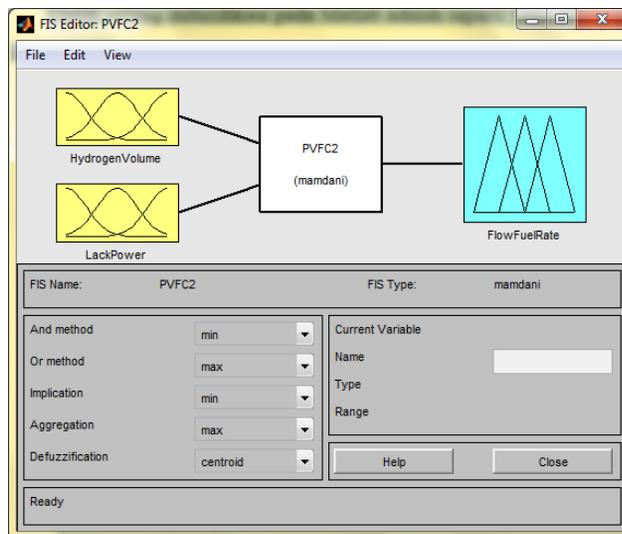
Aturan atau rules untuk masing-masing blok logika fuzzy dibuat sebanyak 105 buah, ditunjukkan pada Tabel 3.6.

Tabel 3.6 Aturan Fuzzy Logic Controller

Kekurangan daya	Fuel flow rate
1	A
2	B
3	C
4	D
5	E
6	F
7	G
8	H
9	I
10	J
11	K
12	L
13	M
14	N
15	O
16	P

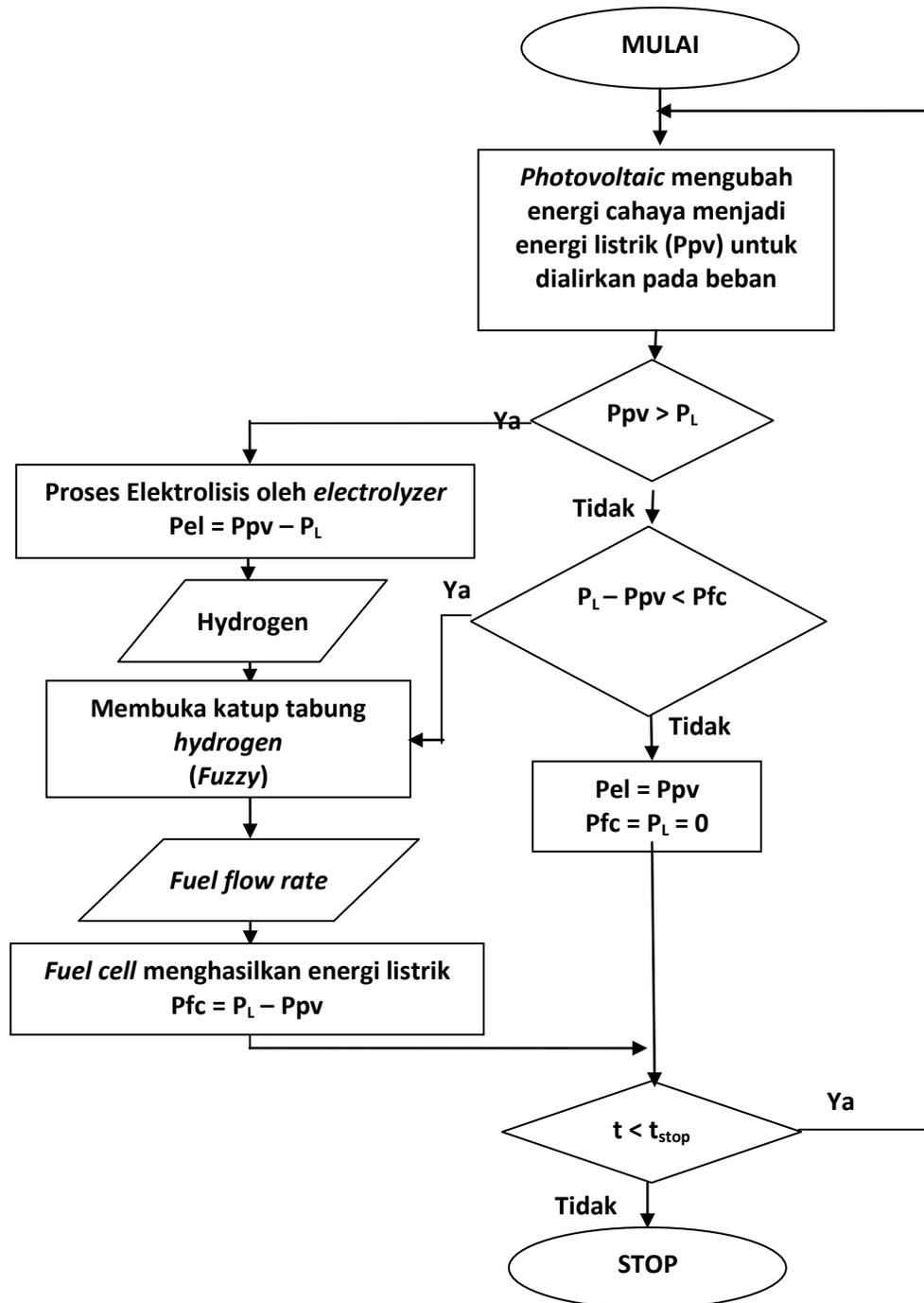
3. Defuzifikasi

Untuk setting defuzifikasi pada Matlab adalah seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.16



Gambar 3.16 Pemodelan Defuzifikasi Pada Matlab

3.6. Flowchart Kerja Sistem Hybrid Antara Photovoltaic dan Fuel Cell



Gambar 3.17 Flowchart Kerja Sistem Hybrid Photovoltaic dengan Fuel Cell

keterangan,

P_L = *Power load*

P_{pv} = *Power photovoltaic*

P_{fc} = *Power fuel cell*

P_{el} = *Power electrolyzer*

BAB 4. ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

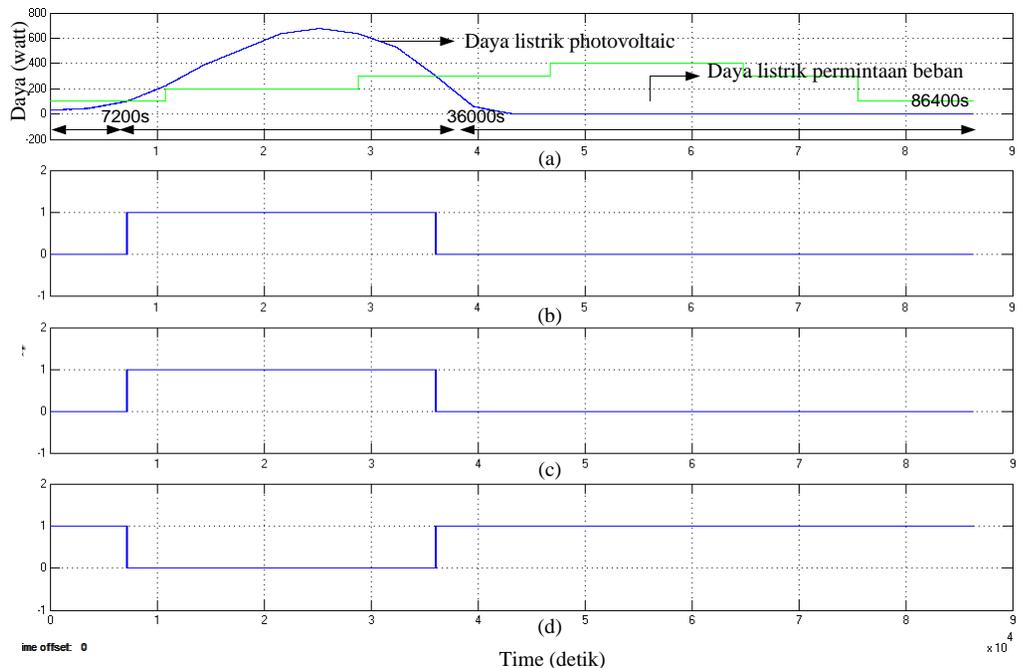
Berdasarkan metodologi pada bab 3, maka bab berikut ini akan dibahas mengenai hasil simulasi dan analisa data dari pengujian *hybrid power system* antara *photovoltaic* dengan *fuel cell*. Berdasarkan Tabel 3.2 – 3.5, estimasi waktu yang disimulasikan adalah dua puluh empat jam dimulai dari pukul 05.00 – 05.00 esok hari dengan *simulation stop time* 24 jam x 3600 detik sama dengan 86400 detik. Pancaran sinar matahari seperti ditunjukkan pada Gambar 3.3 adalah input bagi *photovoltaic* dengan puncak intensitas cahaya pada *time* 25200 (pukul 12.00). Referensi pembebanan ditunjukkan pada Gambar 3.4 dengan beban terendah dan tertinggi adalah 100W dan 400W.

4.1 Sistem Switching

Gambar 4.1 menggambarkan waktu *on* dan *off* pada *photovoltaic*, *electrolyzer*, dan *fuel cell* dengan langkah – langkah kerja sebagai berikut:

1. Tahap I, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.1a dan 4.1d, pada saat *time* 0 – 10800 (pukul 05.00 – 08.00), beban yang diminta adalah 100W sedangkan daya listrik yang dihasilkan *photovoltaic* masih di bawah 100W sampai pada *time* 7200, sehingga pada *time* 0 – 7200 *photovoltaic* tidak bekerja dan *fuel cell* bekerja. Pada *time* 0 – 7200 *switch photovoltaic off* ditunjukkan dengan nilai 0 dan *fuel cell on* ditunjukkan dengan nilai 1.
2. Tahap II, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.1a – 4.1c, pada saat *time* 7200 – 36000 (\pm pukul 7.00 – 15.00) permintaan beban semakin tinggi dari 100W ke 200W sampai 300W. Pada waktu ini daya listrik yang dihasilkan *photovoltaic* di atas daya listrik yang diminta beban, sehingga *photovoltaic* dan *electrolyzer* bekerja dan *fuel cell* tidak bekerja. Pada *time* 7200 – 3600 *switch photovoltaic* dan *electrolyzer on* ditunjukkan dengan nilai 1 sedangkan *switch fuel cell off* ditunjukkan dengan nilai 0,

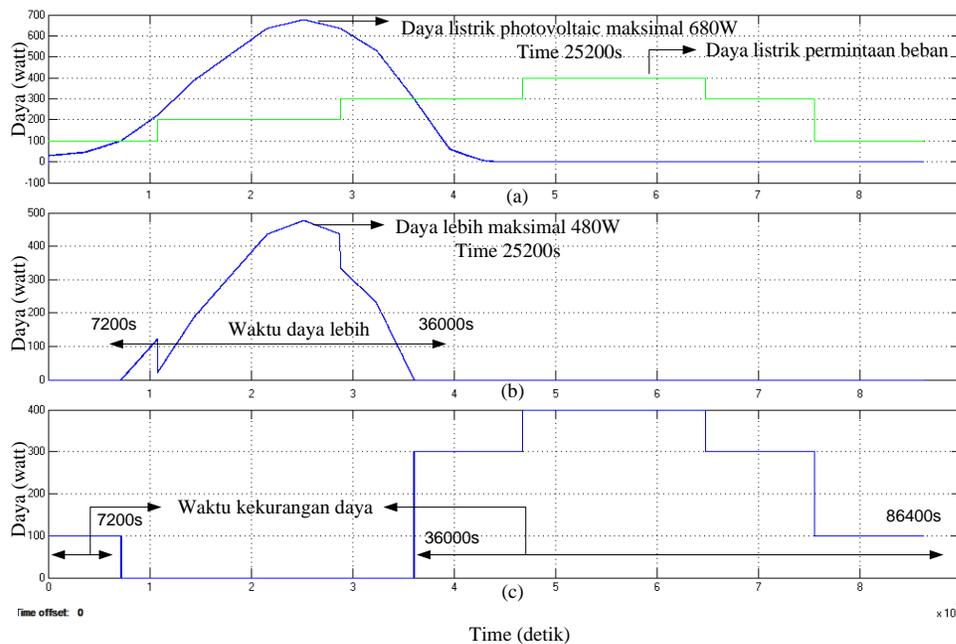
3. Tahap III, pada Gambar 4.1a dan 4.1d, saat time 36000 – 86400 (\pm pukul 16.00 – 05.00) daya listrik yang diminta beban berubah-ubah dari 300W sampai beban puncak 400W pada pukul 18.00 – 21.00 lalu menurun menjadi 300W sampai 100W. Pada waktu ini intensitas cahaya yang diterima *photovoltaic* sangat kecil, sehingga daya listrik yang dihasilkan kecil bahkan tidak ada sama sekali. Oleh karena itu, pada *time* 36000 – 86400 *photovoltaic* dan *electrolyzer* tidak bekerja sedangkan *fuel cell* bekerja. Pada waktu ini *switch photovoltaic* dan *electrolyzer* *off* ditunjukkan dengan nilai 0 sedangkan *switch fuel cell on* ditunjukkan dengan nilai 1.



(a) Daya Listrik *Photovoltaic* dan Daya Listrik Permintaan Beban
 (b) *Switch Photovoltaic* (c) *Switch Electrolyzer* (d) *Switch Fuel Cell*
 Gambar 4.1 *Switch On / Off* dari *Photovoltaic*, *Electrolyzer*, dan *Fuel Cell*

4.2 Daya Lebih dan Kekurangan Daya

Pada sistem ini, Gambar 4.2 menunjukkan grafik besarnya daya lebih dan kekurangan daya. Kekurangan daya terjadi ketika daya listrik *photovoltaic* lebih kecil dari permintaan beban dan besarnya kekurangan daya adalah selisih dari daya listrik *photovoltaic* dengan daya listrik permintaan beban. Kekurangan daya terjadi pada *time* 0 – 7200 dan 36000 – 86400. Sedangkan daya lebih terjadi ketika daya listrik *photovoltaic* lebih besar dari permintaan beban dan besarnya daya lebih adalah selisih dari daya listrik daya permintaan beban dengan daya listrik *photovoltaic*. Besarnya daya lebih ini akan dialirkan pada *electrolyzer*. Daya lebih terjadi pada *time* 7200 – 36000.



(a) Daya Listrik *Photovoltaic* dan Daya Listrik Permintaan Beban

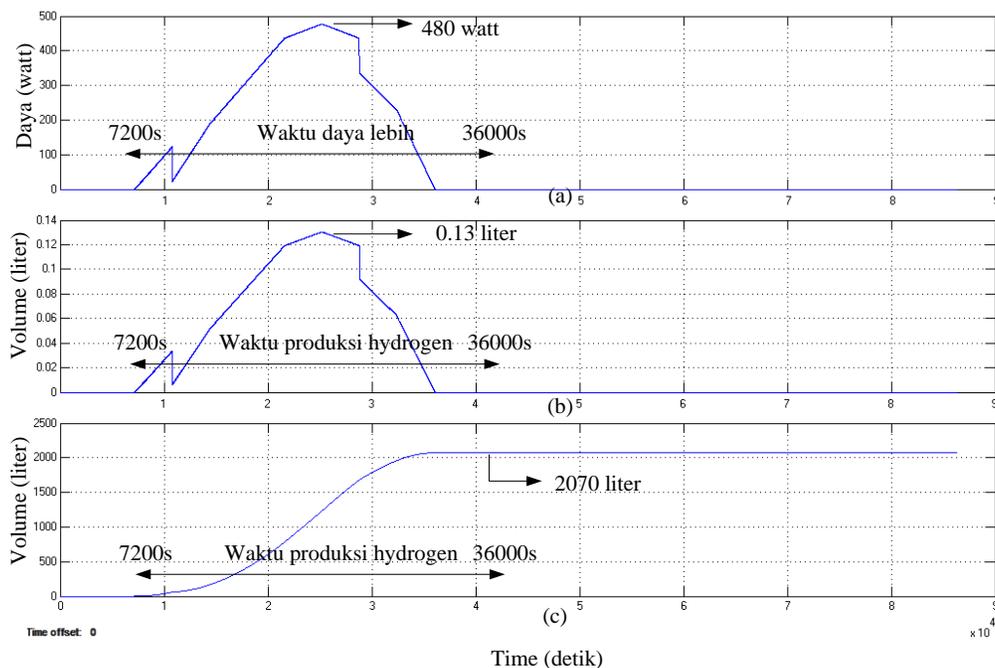
(b) Daya Lebih (c) Kekurangan Daya

Gambar 4.2 Grafik Daya Lebih dan Kekurangan Daya

Pada Gambar 4.2b menunjukkan bahwa besarnya daya lebih maksimal terjadi pada *time* 25200. Pada saat itu daya listrik yang dihasilkan *photovoltaic* mencapai nilai maksimalnya, yaitu 680W sedangkan nilai permintaan daya beban adalah 200W. Maka nilai daya lebih maksimalnya adalah $680W - 200W = 480W$.

4.3 Produksi *Hydrogen*

Kelebihan daya yang dialirkan pada *electrolyzer* akan diubah menjadi *hydrogen* melalui proses elektrolisa, sehingga proses produksi *hydrogen* terjadi pada *time* 7200 – 36000 seperti ditunjukkan pada Gambar 4.3. Total *hydrogen* yang diproduksi semakin besar sampai pada *time* 36000, namun akan menjadi konstan setelahnya karena tidak ada daya lebih yang digunakan untuk memproduksi *hydrogen*. *Hydrogen* yang dihasilkan ini akan disimpan pada tabung *hydrogen*.



(a) Daya Lebih (b) Volume Produksi *Hydrogen*

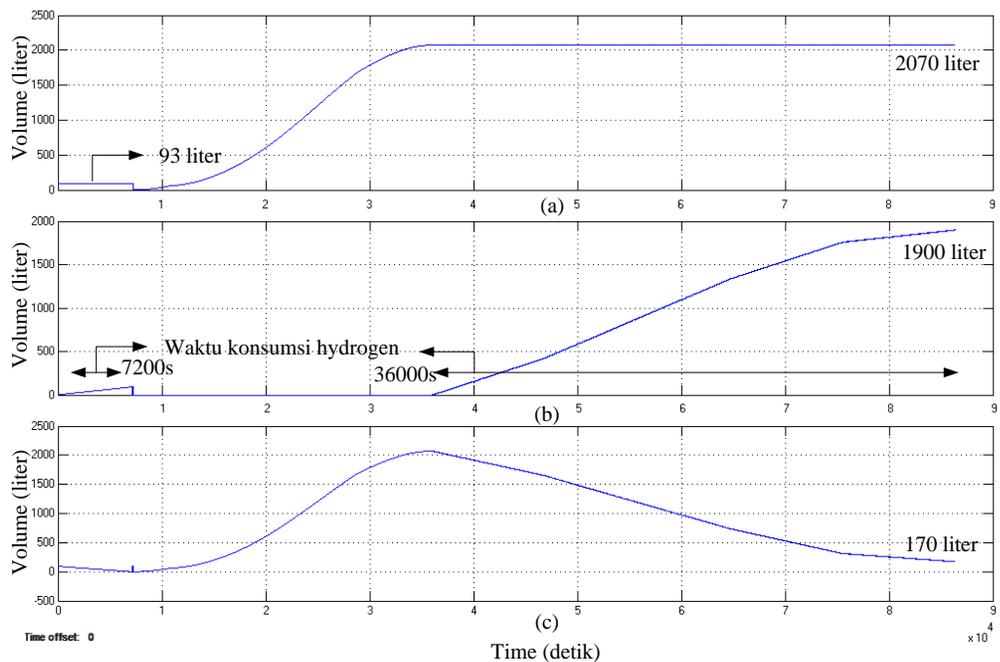
(c) Total Volume Produksi *Hydrogen*

Gambar 4.3 Volume *Hydrogen* Yang Dihasilkan Karena Kelebihan Daya

Pada Gambar 4.3a dan 4.3b, produksi *hydrogen* dengan daya 480W akan menghasilkan volume *hydrogen* sebesar 0.13 liter. Pada Gambar 4.3c, produksi *hydrogen* berhenti pada *time* 36000 dan menghasilkan total volume *hydrogen* sebesar 2070 liter.

4.4 Konsumsi *Hydrogen*

Pada saat terjadi kekurangan daya, *fuel cell* akan bekerja menghasilkan energi listrik dengan menggunakan bahan bakar *hydrogen* yang tersedia pada tabung. Besarnya daya listrik yang dihasilkan *fuel cell* tergantung pada kecepatan aliran *hydrogen* (*fuel flow rate*) yang menuju *fuel cell*. Nilai *fuel flow rate* diatur pada katup dengan menggunakan *fuzzy logic controller*. Gambar 4.4 adalah manajemen *hydrogen* yang menggunakan kontrol logika *fuzzy* pada katup. Satuan *fuel flow rate* adalah liter per menit (lpm), dengan menambahkan nilai *fuel flow rate* sekarang dengan nilai sebelumnya, maka didapat nilai total konsumsi *hydrogen* akhir yaitu 1900 liter, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.4b.

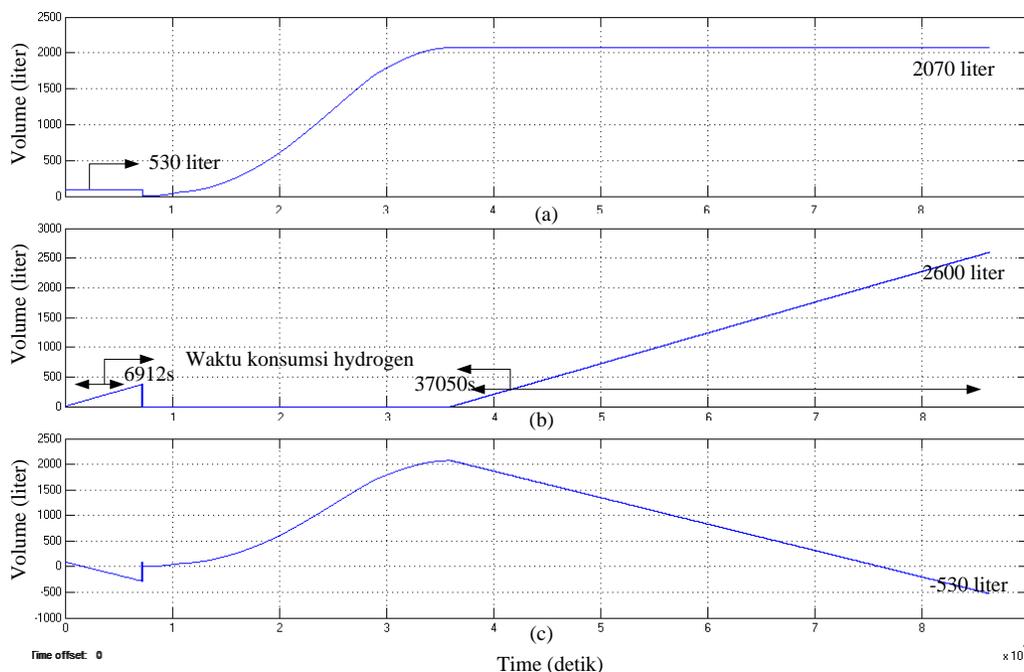


(a) Volume Produksi (b) Konsumsi *Hydrogen* (c) Volume *Hydrogen* Akhir
Gambar 4.4 Grafik Manajemen *Hydrogen* Dengan *Fuzzy Logic Controller*

Pada Gambar 4.4b konsumsi *hydrogen* oleh *fuel cell* terjadi pada saat kekurangan daya pada sistem, yaitu pada *time* 0 – 7200 dan 36000 – 86400. Pada saat *time* 0 – 7200 diperlukan volume *hydrogen* awal dengan estimasi nilai 93 liter karena pada saat itu belum ada *hydrogen* yang diproduksi. Pada Gambar 4.4c, besarnya

volume *hydrogen* akhir adalah pengurangan dari volume produksi *hydrogen* dengan volume konsumsi *hydrogen* yaitu $2070 \text{ liter} - 1900 \text{ liter} = 170 \text{ liter}$. Volume *hydrogen* sebesar 170 liter dapat digunakan untuk mengatasi kekurangan daya awal pada hari berikutnya, sehingga kelebihan volume *hydrogen* yang dihasilkan setiap hari sebanyak $170 - 93 \text{ liter} = 23 \text{ liter}$.

Katup yang tidak menggunakan *fuzzy logic controller* mengeluarkan nilai *fuel flow rate* yang konstan. Nilai *fuel flow rate* yang diberikan harus lebih besar dari nilai *stack consumption* maksimal agar *fuel cell* tidak kekurangan *hydrogen* sebagai bahan bakarnya dan sistem dapat terus beroperasi. Mengacu pada Gambar 4.6, nilai *fuel flow rate* maksimal adalah 3.06lpm, sehingga nilai *fuel flow rate* yang digunakan pada sistem tanpa menggunakan *fuzzy logic control* adalah 3.1lpm. Gambar 4.5 adalah manajemen *hydrogen* tanpa menggunakan kontrol logika *fuzzy* pada katup.



(a) Volume Produksi (b) Konsumsi *Hydrogen* (c) Volume *Hydrogen* Akhir
Gambar 4.5 Grafik Manajemen *Hydrogen* Tanpa *Fuzzy Logic Controller*

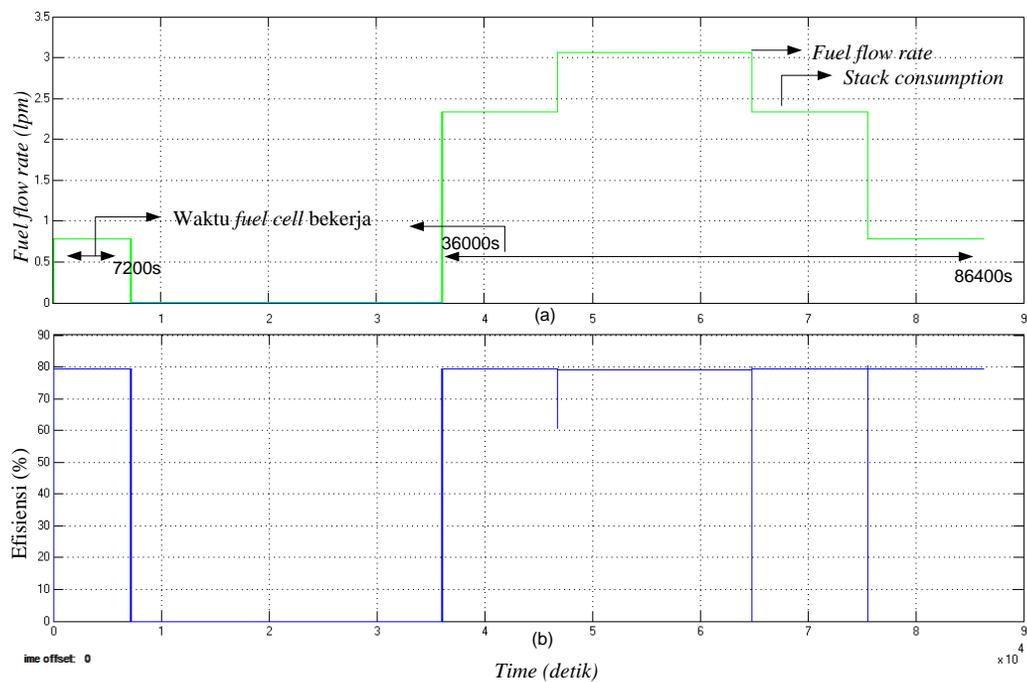
Pada Gambar 4.5b volume konsumsi *hydrogen* tanpa menggunakan *fuzzy logic controller* sebesar 2600 liter, sehingga pengurangan volume produksi *hydrogen*

dengan volume konsumsi *hydrogen* akan menghasilkan besarnya volume *hydrogen* akhir yang bernilai -530 liter, ini berarti bahwa sistem kekurangan volume hydrogen sebesar 530 liter, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.5c.

Pada percobaan yang menggunakan *fuzzy logic controller*, nilai volume *hydrogen* akhir adalah 170 liter, sedangkan besarnya volume *hydrogen* akhir tanpa *fuzzy logic controller* bernilai -530 liter. Dengan demikian, penggunaan *fuzzy logic controller* dapat menghemat volume *hydrogen* sebesar $170 \text{ liter} - (-530) \text{ liter} = 700 \text{ liter}$.

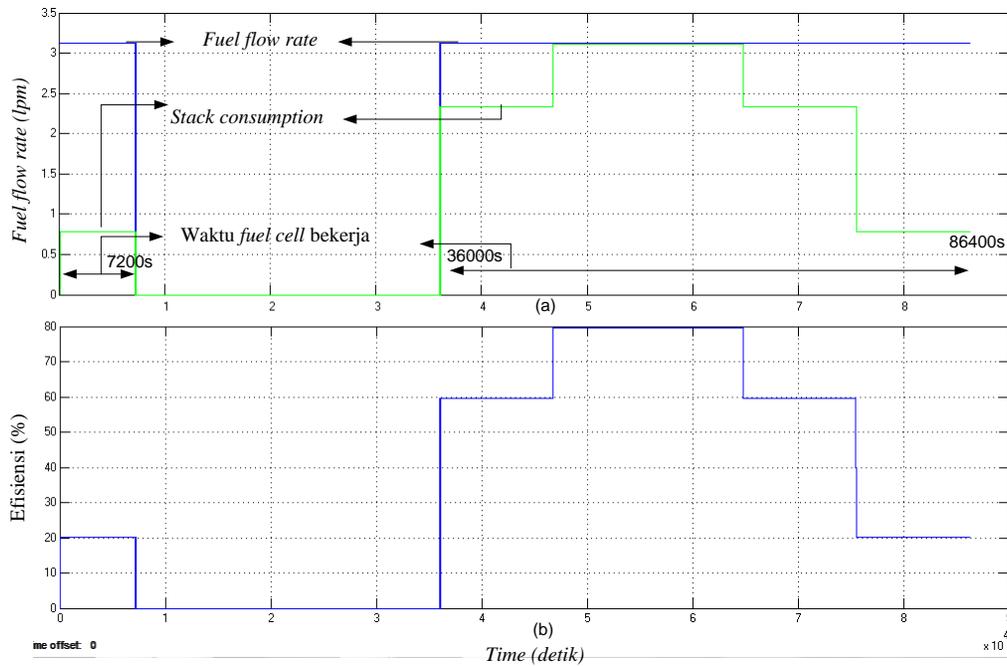
4.5 Efisiensi Penggunaan *Hydrogen*

Besarnya *hydrogen* yang dikonsumsi *fuel cell* (*stack consumption*) didapat dari data output *fuel cell* dengan satuan liter per menit (lpm). Nilai efisiensi penggunaan *hydrogen* didapat dengan membandingkan nilai *fuel flow rate* dengan *stack consumption*. Pada Gambar 4.6, *fuel flow rate* dan *stack consumption* terjadi ketika *fuel cell* bekerja, yaitu pada *time* 0 – 7200 dan 36000 – 86400 dan Gambar 4.6b menunjukkan nilai efisiensi penggunaan *hydrogen* sebesar 79 %.



(a) Grafik *fuel flow rate* dan *stack consumption* (b) Efisiensi
Gambar 4.6 *Fuel Flow Rate*, *Stack Consumption* dan Efisiensi Menggunakan *Fuzzy Logic Controller*

Nilai *fuel flow rate*, *stack consumption* dan efisiensi penggunaan *hydrogen* tanpa *fuzzy logic controller* dapat dilihat pada Gambar 4.7 dan pada Gambar 4.7b menunjukkan bahwa nilai efisiensi terendah dan tertinggi adalah 20% dan 79 %.

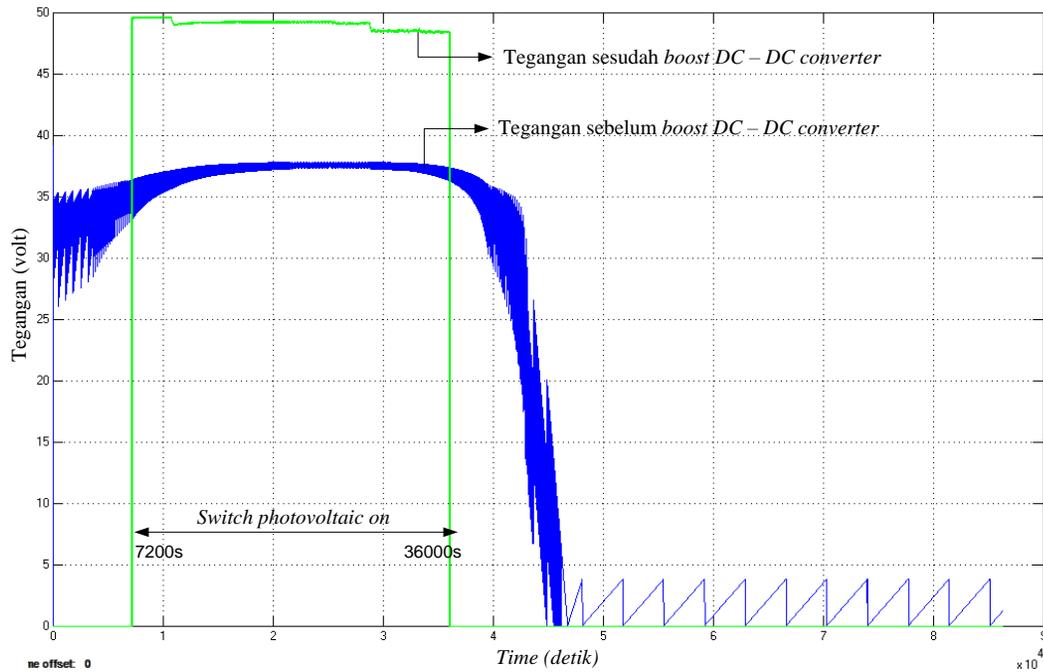


(a) Grafik *fuel flow rate* dan *stack consumption* (b) Efisiensi
 Gambar 4.7 *Fuel Flow Rate, Stack Consumption* dan Efisiensi Tanpa *Fuzzy Logic Controller*

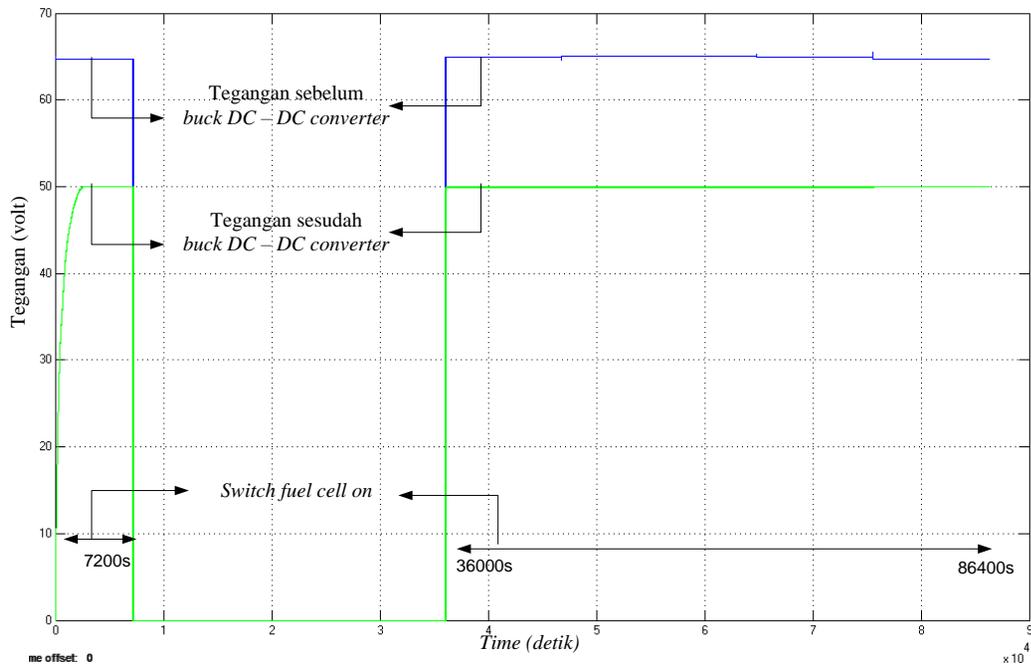
Dengan demikian, efisiensi penggunaan *hydrogen* jauh lebih baik dengan menggunakan *fuzzy logic controller* karena nilai efisiensinya sebesar 79%, sedangkan dengan sistem yang tanpa menggunakan *fuzzy logic controller* masih mempunyai efisiensi yang terendah yaitu 20%.

4.6 Tegangan dan Daya Pada Sistem

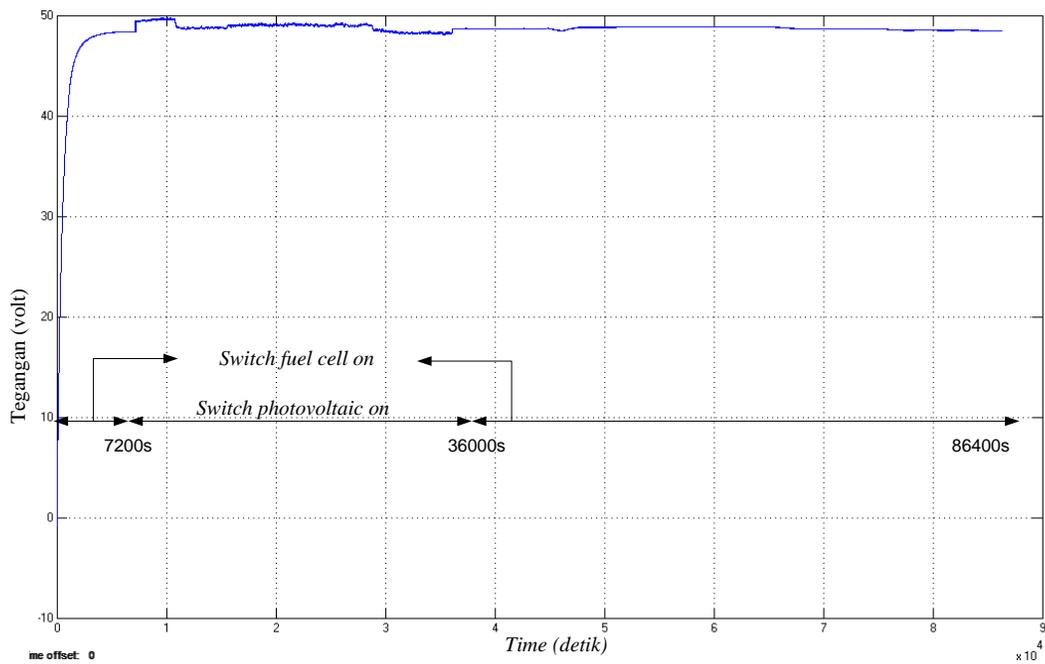
Grafik perubahan tegangan *output photovoltaic* dan *fuel cell* dapat dilihat pada Gambar 4.8 dan 4.9, sedangkan Gambar 4.10 adalah grafik tegangan pada beban. Tegangan yang diinginkan bekerja pada beban adalah 48V, sehingga tegangan *output photovoltaic* dengan nilai tegangan maksimal 37.8V harus dinaikkan dengan *boost DC – DC converter* dan tegangan *output fuel cell* dengan nilai tegangan nominal 65V harus diturunkan dengan *buck DC – DC converter*. *Boost DC – DC converter* bekerja ketika *switch photovoltaic on* yaitu pada time 7200 - 36000. *Buck DC – DC converter* bekerja ketika *switch fuel cell on* yaitu pada time 0 – 7200 dan 36000 – 86400.



Gambar 4.8 Grafik Tegangan *Photovoltaic* Sebelum dan Sesudah *Boost DC - DC Converter*

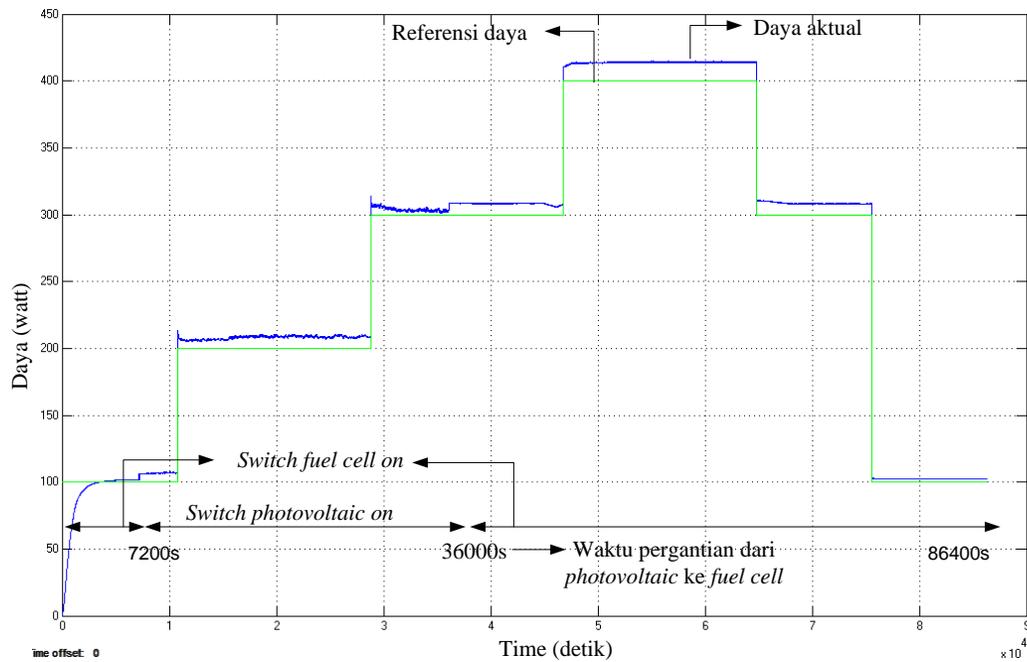


Gambar 4.9 Tegangan *Fuel Cell* Sebelum dan Sesudah *Buck DC – DC Converter*



Gambar 4.10 Tegangan Beban

Tegangan yang bekerja pada beban adalah tegangan yang bekerja pada *photovoltaic* atau *fuel cell* yang diatur oleh *switch*, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.10, sedangkan Gambar 4.11 adalah grafik referensi daya dan daya aktual pada beban.

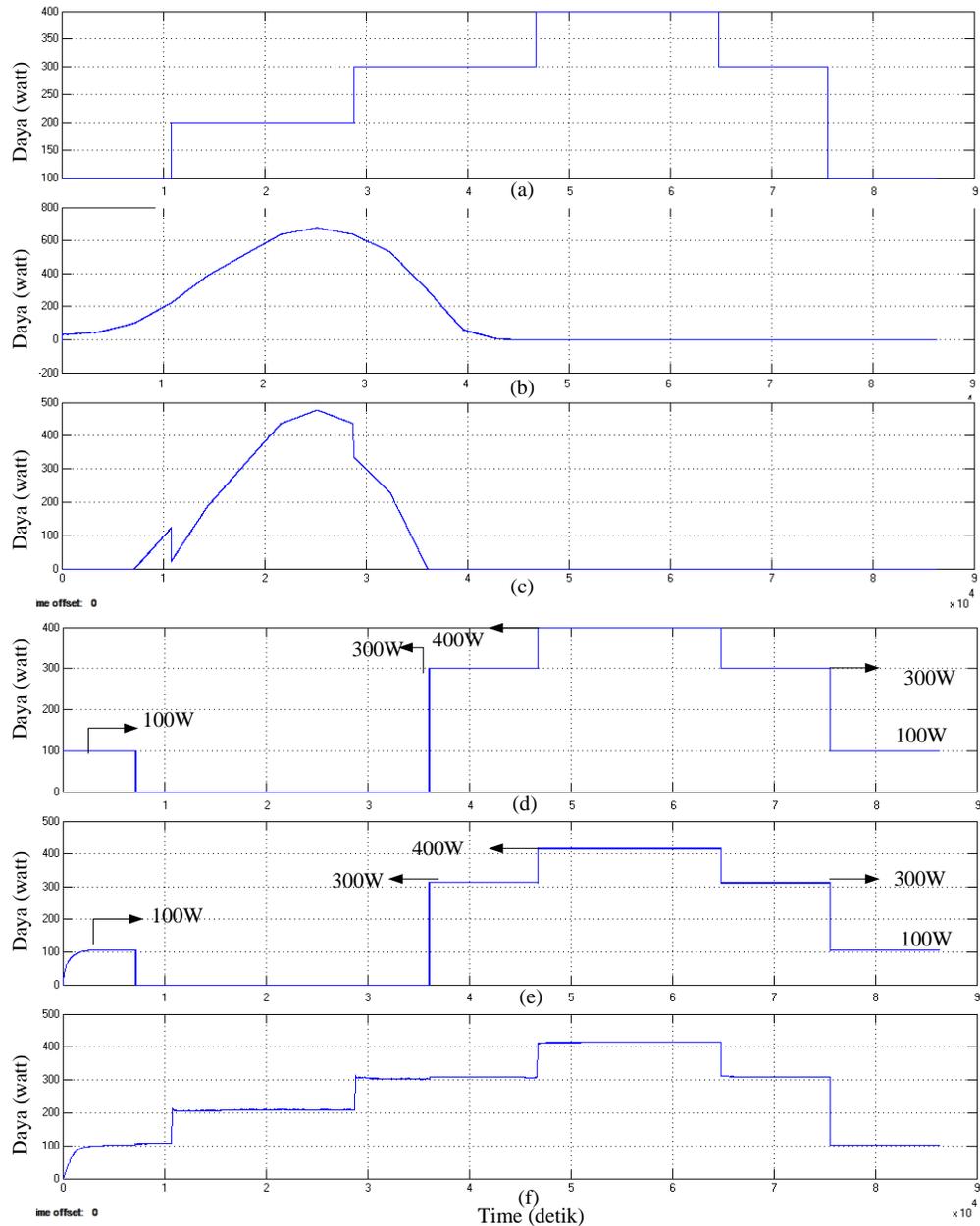


Gambar 4.11 Grafik Referensi Daya dan Daya Aktual Pada Beban

Pada Gambar 4.11, referensi daya dan daya aktual saling berhimpit. Ini menunjukkan bahwa daya aktual yang disuplai pada beban sesuai dengan daya permintaan beban.

Pada Gambar 4.12 bawah ini menunjukkan keseluruhan manajemen daya listrik yang bekerja pada sistem *hybrid photovoltaic – fuel cell*. Daya listrik yang dihasilkan *photovoltaic* pada Gambar 4.12a akan dibandingkan dengan daya listrik permintaan beban pada Gambar 4.12b. Daya *photovoltaic* yang lebih besar dari daya permintaan beban, akan dialirkan pada *electrolyzer* sehingga disebut daya *electrolyzer*, seperti pada Gambar 4.12c. Besarnya daya *photovoltaic* yang lebih kecil dari daya permintaan beban disebut kekurangan daya, seperti pada Gambar 4.12d. Besarnya kekurangan daya akan disupply oleh *fuel cell*. Daya yang dihasilkan

fuel cell dapat dilihat pada Gambar 4.12e. Nilai daya aktual yang diterima beban dapat dilihat pada Gambar 4.12f.



(a) Daya Permintaan Beban (b) Daya *Photovoltaic* (c) Daya *Electrolyzer*
 (d) Kekurangan Daya (e) Daya *Fuel Cell* (f) Daya Beban
 Gambar 4.12 *Power Management*

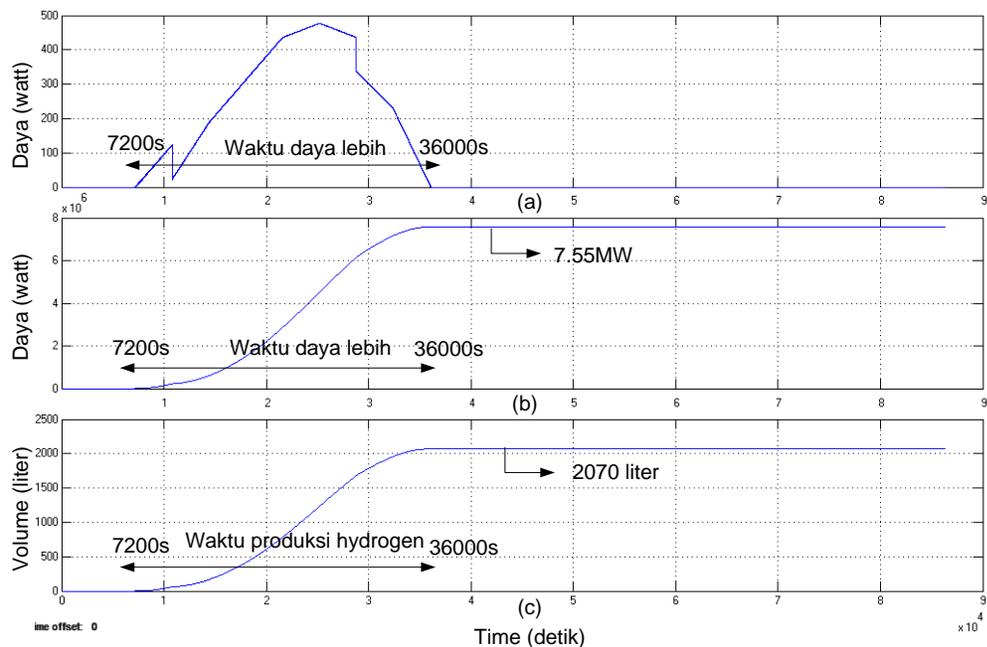
Pada Gambar 4.13d, saat sistem kekurangan daya 100W, *fuel cell* mampu menghasilkan daya 100W juga, seperti ditunjukkan Gambar 4.13e. Begitu juga dengan besar kekurangan daya 300W dan 400W, *fuel cell* dapat menghasilkan daya 300W dan 400W untuk disupply pada beban. Sehingga, terlihat bahwa nilai daya aktual pada Gambar 4.13f sesuai dengan grafik daya permintaan beban pada Gambar 4.13a.

4.7 Efisiensi Konversi Energi *Fuel Cell*

Perhitungan efisiensi konversi energi diperoleh dari persamaan (4.1)

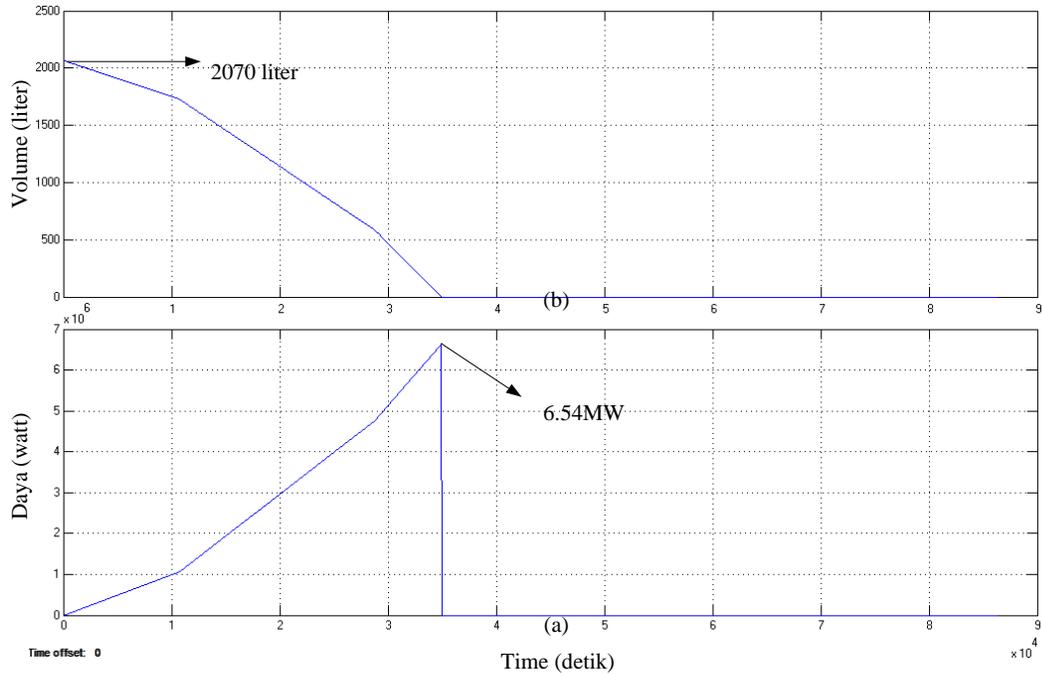
$$\text{Efisiensi Konversi Energi} = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \dots\dots\dots (4.1)$$

P_{in} adalah daya yang dibutuhkan untuk menghasilkan *hydrogen*, sedangkan P_{out} adalah daya yang dihasilkan dari penggunaan *hydrogen*. Daya yang dipakai untuk menghasilkan *hydrogen* adalah daya lebih pada sistem, sehingga total daya yang dibutuhkan untuk menghasilkan *hydrogen* adalah sebesar 7.55MW, seperti pada Gambar 4.13b



(a) Daya Lebih; (b) Total Daya Lebih; (c) Total Produksi *Hydrogen*
 Gambar 4.13 Grafik Produksi *Hydrogen* Oleh Daya Lebih

Pada Gambar 4.14c, total daya lebih akan menghasilkan volume *hydrogen* sebesar 2070 liter. Sedangkan pada Gambar 4.15b, 2070 liter *hydrogen* dapat digunakan untuk menyuplai total kebutuhan daya beban sebesar 6.54MW.



(a) Grafik Penggunaan *Hydrogen* (b) Grafik Pembangkitan Daya
Gambar 4.15 Grafik Pembangkitan Daya Oleh Penggunaan *Hydrogen*

Maka, efisiensi konversi daya listrik adalah

$$\begin{aligned}
 \text{Efisiensi konversi energi} &= \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} \times 100\% \\
 &= \frac{6,54 \cdot 10^6}{7,55 \cdot 10^6} \times 100\% \\
 &= 86.7\%
 \end{aligned}$$

BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Pada simulasi perancangan sistem *hybrid photovoltaic* dengan *fuel cell* ini, dapat disimpulkan bahwa:

- *Photovoltaic* dan *electrolyzer* bekerja jika daya listrik yang dihasilkan *photovoltaic* lebih besar dari daya listrik permintaan beban,
- *Fuel cell* bekerja jika daya listrik yang dihasilkan *photovoltaic* lebih kecil dari daya listrik permintaan beban.
- Daya yang bekerja pada *electrolyzer* diubah menjadi *hydrogen* dan menghasilkan volume *hydrogen* sebesar 2070 liter.
- Kekurangan daya pada sistem akan disupply oleh *fuel cell* dengan *fuel flow rate* yang menggunakan bahan bakar *hydrogen* dengan total konsumsi *hydrogen* sebesar 1900 liter.
- Besarnya *fuel flow rate* yang menjadi input bagi *fuel cell* dikendalikan melalui *fuzzy logic controller* dengan hasil efisiensi sebesar 79% yang dapat menghemat volume *hydrogen* sebesar 700 liter.
- Besarnya daya yang disupply *fuel cell* mampu mengatasi kekurangan daya pada sistem sehingga sistem *hybrid photovoltaic - fuel cell* ini dapat digunakan secara mandiri tanpa ada sumber energi tambahan lainnya.
- Efisiensi konversi energi pada *fuel cell* diperoleh dengan membandingkan antara total daya yang dibangkitkan dengan total daya yang dibutuhkan, sehingga diperoleh efisiensi sebesar 86.7%.

5.2 Saran

Agar *photovoltaic* dan *fuel cell* yang digunakan dalam penelitian ini dapat efisien dan sesuai dengan kondisi beban, sebaiknya diperlukan adanya perhitungan besar daya minimal yang akan digunakan baik untuk *photovoltaic* maupun *fuel cell*. Adanya perhitungan banyaknya sel untuk *electrolyzer* juga diperlukan untuk mendapatkan jumlah minimal sel *electrolyzer* yang sesuai dengan kondisi beban. Selain itu, diperlukan tabung *hydrogen* cadangan untuk menyimpan kelebihan volume *hydrogen* setiap harinya. Yang terakhir, rancangan ini masih berupa simulasi yang akan lebih baik apabila diterapkan pada realisasi yang sesungguhnya dengan melakukan riset yang lebih dalam untuk melengkapi peralatan sinkronisasi yang sudah ada.

DAFTAR PUSTAKA

- Li Wei. 2009. “*Modeling, Control and Simulation of a Small Photovoltaic Fuel Cell Hybrid Generation System,*” IEEE Transaction on Energy Conversion.
- M. Hashem Nehrir and Caisheng Wang. 2009. “*Modeling and Control of Fuel Cells: Distributed Generation Applications,*” IEEE Press.
- O. Ulleberg, “*Modeling of advanced alkaline electrolyzers: A system simulation approach,*” International Journal of Hydrogen Energy, 28(1) , 2003. pp. 21-33.
- Kuswadi, Son. 2007. *Kendali Cerdas : Teori dan Aplikasi Praktisnya*. Yogyakarta : CV. Andi Offset.
- Matlab and Simulink, The Mathworks, Ins. As of September 2006, <http://www.mathworks.com>
- Ecen 2060, Renewable sources and efficient electrical energy systems, <http://ecee.colorado.edu>

LAMPIRAN A