

# PENGENDALI SISTEM PEMBANGKIT LISTRIK HIBRIDA TENAGA ANGIN-PMSG DENGAN *FUEL CELL* MENGGUNAKAN *FUZZY LOGIC CONTROLLER* (*CONTROL OF HYBRID POWER SYSTEM WIND POWER-PMSG AND FUEL CELL USING FUZZY LOGIC CONTROLLER*)

Destiany Prawidyasari, Dedy Kurnia Setiawan, Triwahju Hardianto  
Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Jember  
Jln. Kalimantan 37, Jember 68121  
E-mail: [dhezudesu@gmail.com](mailto:dhezudesu@gmail.com)

## Abstrak

Permintaan energi di seluruh dunia yang meningkat mengakibatkan sumber daya energi terutama energi konvensional menjadi langka. Berbagai inovasi para ahli pun muncul dalam memanfaatkan energi alternatif sebagai sumber energi untuk menggantikan energi konvensional. Namun untuk menghasilkan daya bergantung dari sumber energi yang diterimanya, seperti PLT Angin dapat menghasilkan daya hanya jika ada kecepatan angin yang diterima oleh turbin dan *fuel cell* yang menghasilkan daya jika ada bahan bakar hidrogen. Sistem hibrida menggabungkan kedua sumber energi untuk meningkatkan daya dan keandalan sistem. Penelitian ini mensimulasikan Pembangkit Listrik Tenaga Angin (PLTA) dengan *fuel cell* dalam sistem hibrida. Simulasi ini menggunakan pemodelan sistem dengan aplikasi Simulink MATLAB<sup>®</sup> R2010b. Sistem ini terdiri dari *wind power system* yang bekerja paralel dengan *fuel cell*, *electrolyzer*, tabung penyimpanan dan katup hidrogen yang mengatur laju aliran hidrogen, serta sistem pensaklaran. Dalam sistem hibrida ini, jika *wind power system* menghasilkan daya listrik melebihi daya permintaan beban, maka beban akan disuplai oleh *wind power system* dan daya yang berlebih disuplai ke *electrolyzer* untuk diubah menjadi hidrogen. Sebaliknya, jika *wind power system* tidak mampu memenuhi permintaan beban, maka *fuel cell* akan bekerja menghasilkan listrik untuk mengurangi kekurangan daya pada sistem. Kinerja sistem kontrol sistem hibrida antara tenaga angin-PMSG dengan *fuel cell* menggunakan *fuzzy logic controller* cukup baik sehingga kestabilan dan kontinuitas energi tetap terjaga dengan presentase 12,5% terjadi kondisi transien akibat adanya peralihan sumber antara *wind power system* dengan *fuel cell* dan tegangan tetap konstan 48V.

**Kata Kunci:** sistem hibrida, *wind power system*, *fuel cell*, *fuzzy logic controller*, *electrolyzer*.

## Abstract

*The increasing of the world energy demand affects energy source, especially in conventional energy will be scarce. Various of expert innovations emerge to exploit alternative energy as an energy source changing conventional energy. However, to produces electric power depend on energy source which is received, such as wind power system can produces electric power if there is only wind velocity and fuel cell produces electric power if there is hydrogen gas fuels. Hybrid system integrates both of energy sources to increase the system power and reliability. This research simulates wind power system with fuel cell in the hybrid system. This simulation uses system modelling with the application of Simulink MATLAB<sup>®</sup> R2010b. The system consists of wind power system that works parallel with fuel cell, electrolyzer, storage tube and hydrogen valve controlling the hydrogen flowing system, and also switching system. In this hybrid system, if the wind power system produces electric power exceeding the load of power demands, load will be supplied by wind power system and power that is excessive will be supplied to electrolyzer to be changed into hydrogen. Conversely, if the wind power system can not supply the load demands, fuel cell will produce electricity to minimize the lack of power in the system. Hybrid power system between wind power-PMSG and fuel cell using fuzzy logic controller works good enough so that the stability and continuity of energy is maintained with a percentage 12,5% occured due to transient conditions intermediate between the wind power system and fuel cell and voltage keep constant 48V.*

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

## PENDAHULUAN

Seiring berjalannya waktu, pertumbuhan penduduk di dunia semakin pesat. Semakin bertambahnya penduduk maka akan semakin bertambah pula konsumsi energi listrik. Permintaan energi di seluruh dunia yang meningkat

mengakibatkan sumber daya energi menjadi langka. Sedangkan sumber daya energi utama yang digunakan masih menggunakan energi konvensional. Beberapa energi konvensional seperti energi thermal yang diproduksi dari bahan bakar fosil semakin menipis dan terbatas sampai tahun 2030 [1].

Untuk mencegah krisis energi tersebut, diperlukan energi alternatif untuk mengatasi masalah tersebut. Berbagai inovasi para ahli pun muncul dalam memanfaatkan energi alternatif sebagai sumber energi untuk menggantikan energi konvensional, diantaranya energi matahari, angin, dan panas bumi yang merupakan sumber daya energi yang berlimpah di bumi. Namun, beberapa pembangkit energi alternatif bergantung pada keadaan alam dan bahan bakar tertentu saja, contohnya energi angin dan *fuel cell*.

Dalam aplikasi PLT Angin, penggunaan *variable speed wind turbines* atau turbin angin dengan kecepatan variabel sangat populer, terutama karena kemampuannya untuk menangkap lebih banyak daya angin menggunakan algoritma *maximum power point tracking* (MPPT) dan peningkatan efisiensi. Saat ini, *double feed induction generator* (DFIG) banyak digunakan sebagai generator dalam sistem turbin angin dengan kecepatan variabel. Dalam kasus DFIG, dibutuhkan *gearbox* untuk mencocokkan dengan turbin dan kecepatan rotor. *Gearbox* seringkali mengalami kerusakan dan membutuhkan perawatan berkala, membuat sistem tidak dapat diandalkan. Keandalan turbin angin dengan kecepatan variabel dapat ditingkatkan secara signifikan menggunakan penggerak langsung berbasis *permanent magnet synchronous generator* (PMSG). PMSG mendapat banyak perhatian dalam aplikasi energi angin karena kemampuan eksitasi sendiri, faktor daya dan efisiensi operasi yang tinggi [2].

Energi listrik yang dihasilkan oleh PLT Angin tergantung dari kecepatan angin yang diterima oleh turbin. Jika kecepatan angin besar, maka putaran turbin akan semakin cepat sehingga menggerakkan generator dan menghasilkan energi listrik yang besar, begitupun sebaliknya. Namun, jika tidak terdapat angin (*no wind*), maka turbin angin tidak akan berputar sehingga tidak menghasilkan energi listrik. Sedangkan *fuel cell* hanya menghasilkan energi listrik selama terdapat gas hidrogen yang dialirkan pada *fuel cell*, sehingga *fuel cell* tidak akan bekerja jika tidak ada persediaan gas hidrogen yang cukup. Namun, kedua pembangkit ini dapat digunakan secara bersama-sama dengan menggunakan sistem hibrida.

Sistem hibrida atau *hybrid power system* adalah sistem yang menggabungkan dua atau lebih pembangkit energi saling bekerja sama untuk mengatasi kekurangan dan memanfaatkan kelebihan masing-masing pembangkit sehingga menciptakan suatu sistem yang memiliki keandalan lebih baik dibandingkan hanya sebuah pembangkit listrik. Sistem hibrida PLT Angin yang menggunakan PMSG dengan *fuel cell* bekerja dengan memanfaatkan kelebihan daya yang dihasilkan oleh PLT Angin untuk disuplai dan disimpan pada baterai serta menghasilkan gas hidrogen, dimana gas tersebut nantinya digunakan sebagai bahan bakar *fuel cell* untuk membangkitkan energi listrik jika terdapat kekurangan daya pada sistem. Strategi kontrol sistem hibrida antara PLT Angin dengan *fuel cell* telah diteliti oleh C. N. Bhende dkk. dalam [2], namun dalam perancangan sistemnya masih menggunakan *PI controller* dimana memiliki respon yang lambat dan tidak cukup presisi.

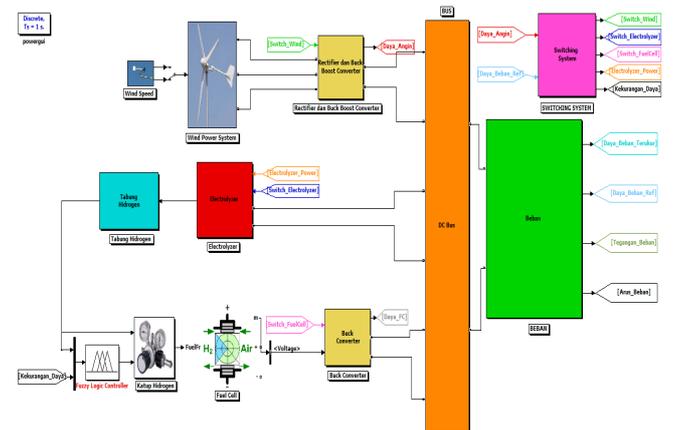
Penelitian ini merancang sistem hibrida pembangkit listrik hibrida tenaga angin-PMSG sebagai pembangkit listrik utama dengan *fuel cell* sebagai pembangkit listrik cadangan

menggunakan *simulink* MATLAB®R2010b dan mengaplikasikan *fuzzy logic controller* sebagai pengendali sistem hibrida guna kontinuitas suplai energi pada beban tetap terjaga.

### METODE PENELITIAN

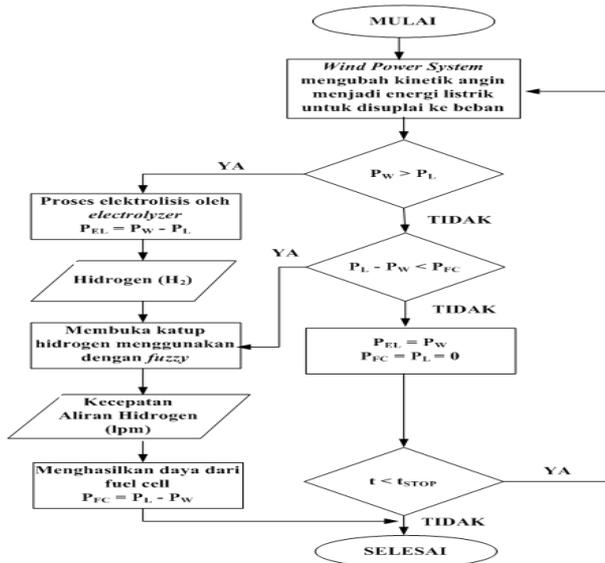
Penelitian ini dilaksanakan dalam 2 tahap. Tahap pertama adalah pengukuran kecepatan angin yang dilakukan selama 24 jam di Pantai Watu Ulo, sedangkan tahap kedua adalah analisis sistem pembangkit listrik hibrida tenaga angin-PMSG dengan *fuel cell* menggunakan MATLAB®R2010b. Kecepatan angin yang telah terukur tersebut menjadi *input wind power system* untuk membangkitkan energi listrik. Gambar 1. menunjukkan blok diagram sistem pembangkit listrik hibrida tenaga angin-PMSG dengan *fuel cell* menggunakan *fuzzy logic controller*.

Prinsip kerja dari sistem pembangkit listrik hibrida seperti yang ditunjukkan blok diagram pada Gambar 1 adalah sebagai berikut. *Wind power system* menghasilkan energi listrik dari *input* kecepatan angin. Apabila daya yang dihasilkan oleh *wind power system* lebih besar dibandingkan daya permintaan beban, maka daya yang berlebih tersebut akan disuplai ke *electrolyzer* sebagai perangkat untuk menghasilkan gas hidrogen melalui proses elektrolisis. Gas hidrogen yang dihasilkan disimpan dalam tabung penyimpanan (*storage tube*) untuk menyimpan gas hidrogen. Sebaliknya jika daya yang dihasilkan oleh *wind power system* tidak mampu untuk memenuhi permintaan beban, maka kekurangan daya pada sistem diatasi dengan suplai daya dari *fuel cell*. *Fuel cell* memanfaatkan gas hidrogen sebagai bahan bakar untuk menghasilkan energi listrik.



Gambar 1. Blok diagram sistem

Kontrol logika *fuzzy* diterapkan pada katup hidrogen (*hydrogen valve*) sebagai pengatur aliran kecepatan hidrogen (*fuel flow rate*) yang masuk pada *fuel cell*, sehingga kecepatan alir yang masuk diatur agar sesuai dengan kebutuhan *fuel cell* dalam menghasilkan daya. Gambar 2 menunjukkan *flowchart* prinsip kerja pembangkit listrik hibrida tenaga angin-PMSG dengan *fuel cell*.



Gambar 2. Flowchart prinsip kerja sistem

**HASIL PENELITIAN**

Sistem pembangkit listrik hibrida ini bekerja dalam waktu 24 jam dengan beban DC yang fluktuatif. Selama 24 jam terjadi 4 perubahan beban dengan daya berturut-turut 750W, 900W, 1250W, dan 1500W. Tabel 1 dan 2 menunjukkan data pembebanan dan kecepatan angin selama 24 jam.

Tabel 1. Data pembebanan

Real Time	Waktu Simulasi	Beban (Watt)	Real Time	Waktu Simulasi	Beban (Watt)
0	0	750	12	43200	1250
1	3600	750	13	46800	1250
2	7200	750	14	50400	1250
3	10800	750	15	57600	1500
4	14400	750	16	61200	1500
5	18000	750	17	64800	1500
6	21600	900	18	68400	1500
7	25200	900	19	72000	1500
8	28800	900	20	75600	1500
9	32400	900	21	79200	750
10	36000	1250	22	82800	750
11	39600	1250	23	86400	750

Tabel 2. Data kecepatan angin

Real Time	Waktu Simulasi	Beban (Watt)	Real Time	Waktu Simulasi	Beban (Watt)
0	0	2,5	12	43200	6,9
1	3600	2	13	46800	6,9
2	7200	2,1	14	50400	6,4
3	10800	2,1	15	57600	5
4	14400	2,4	16	61200	4,2

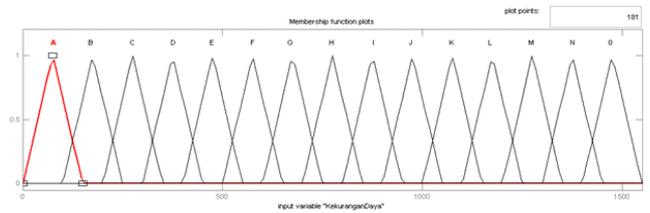
5	18000	2,6	17	64800	3,6
6	21600	2,8	18	68400	3,4
7	25200	3,7	19	72000	3,6
8	28800	4,5	20	75600	3,1
9	32400	5	21	79200	2,5
10	36000	4,5	22	82800	1,5
11	39600	5,5	23	86400	2,5

Sedangkan pengendali utama yaitu logika fuzzy yang diterapkan pada penelitian ini adalah bagaimana mengatur kecepatan aliran hidrogen sebagai input fuel cell dengan besarnya kekurangan suplai daya pada beban. Tabel 3 dan 4 menunjukkan ketentuan membership function input.

Tabel 3. Membership function kekurangan daya

Fungsi Anggota	Range	Fungsi Anggota	Range
A	0-150W	I	800-950W
B	100-250W	J	900-1050W
C	200-350W	K	1000-1150W
D	300-450W	L	1100-1250W
E	400-550W	M	1200-1350W
F	500-650W	N	1300-1450W
G	600-750W	O	1400-1550W
H	700-850W		

Dari ketentuan membership function pada Tabel 3, maka membership function kekurangan daya ditunjukkan pada Gambar 3.



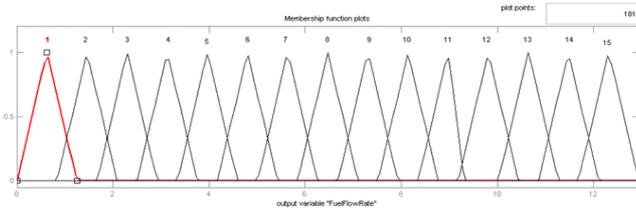
Gambar 3. Membership function kekurangan daya

Input kedua adalah volume hidrogen dimana hidrogen diperoleh dari tabung penyimpanan hidrogen ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Membership function volume hidrogen

Fungsi Anggota	Range	Fungsi Anggota	Range
a	0-1000 ltr	h	3500-4500 ltr
b	500-1500 ltr	i	4000-5000 ltr
c	1000-2000 ltr	j	4500-5500 ltr
d	1500-2500 ltr	k	5000-6000 ltr
e	2000-3000 ltr	l	5500-6500 ltr
f	2500-3500 ltr	m	6000-7000 ltr
g	3000-4000 ltr		

Dari ketentuan *membership function* pada Tabel 4, maka *membership function* volume hidrogen ditunjukkan pada Gambar 4.



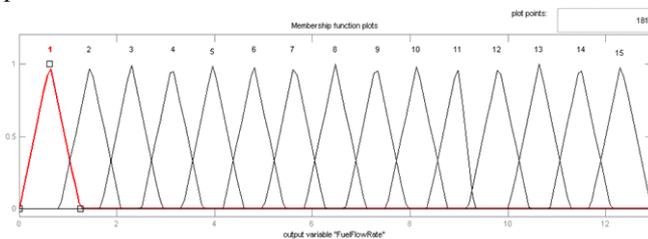
Gambar 4. *Membership function* volume hidrogen

Output logika *fuzzy* adalah kecepatan aliran hidrogen (*fuel flow rate*) ditunjukkan pada tabel 5.

Tabel 5. *Membership function fuel flow rate*

Fungsi Anggota	Range	Fungsi Anggota	Range
1	0-1,252lpm	9	6,676-7,928lpm
2	0,8345-2,086lpm	10	7,511-8,763lpm
3	1,669-2,921lpm	11	8,345-9,305lpm
4	2,504-3,755lpm	12	9,18-10,43lpm
5	3,338-5,409lpm	13	10,01-11,27lpm
6	4,173-5,424lpm	14	10,85-12,1lpm
7	5,007-6,259lpm	15	11,68-12,94lpm
8	5,842-7,093lpm		

Dari ketentuan *membership function* pada Tabel 5, maka *membership function* kecepatan aliran hidrogen ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. *Membership function* kecepatan aliran hidrogen

Dari *membership function* tersebut membentuk *rule fuzzy* sebanyak 195 buah yang ditunjukkan pada Tabel 6.

Tabel 6. *Rule Fuzzy*  
Volume Hidrogen

	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m
<b>A</b>	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
<b>B</b>	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
<b>C</b>	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
<b>D</b>	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
<b>E</b>	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
<b>F</b>	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
<b>G</b>	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7

<b>H</b>	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
<b>I</b>	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
<b>J</b>	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
<b>K</b>	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
<b>L</b>	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
<b>M</b>	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
<b>N</b>	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14
<b>O</b>	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15

**PEMBAHASAN**

*Wind power system* membutuhkan kecepatan angin agar turbin angin dapat bekerja sehingga menghasilkan tegangan. Kecepatan angin yang digunakan pada rancangan simulasi sistem *wind power* ini diperoleh dari hasil pengukuran yang dilakukan oleh peneliti selama 24 jam di pesisir pantai Watu Ulo, Kabupaten Jember. Data kecepatan angin yang digunakan sebagai data *input* pada simulasi ini berdasarkan hasil pengukuran yang telah penulis lakukan di Pantai Watu Ulo Kabupaten Jember pada bulan Maret 2014 yang ditunjukkan pada Tabel 1. Dari data tersebut diperoleh kecepatan angin yang fluktuatif, sehingga dengan perubahan tersebut menghasilkan daya yang fluktuatif pula. Daya maksimal yang mampu dihasilkan oleh turbin angin adalah sebesar 3200 W.

Beban yang diberikan pada sistem adalah beban DC yang fluktuatif dimana besarnya adalah 750W, 900W, 1250W, dan 1500W. Jika *wind power system* menghasilkan daya yang melebihi daya permintaan beban, maka *wind power system* menyuplai daya pada beban dan kelebihan daya yang dihasilkan akan disuplai pada *electrolyzer* sebagai perangkat untuk menghasilkan hidrogen. Daya berlebih terjadi pada sistem hibrida pada pukul 00.00-00.04 (*time* 0 hingga 500) akibat adanya *overshoot* pada saat sistem berjalan yaitu sebesar 6000 W dan kemudian daya menurun hingga pukul 00.04, kemudian pada pukul 06.30 (*time* 25200) terjadi kelebihan daya hingga lebih kurang sebesar 2500 W. Kelebihan daya yang dihasilkan karena daya listrik yang dihasilkan *wind power system* lebih besar dibandingkan daya permintaan beban, maka daya tersebut dialirkan ke *electrolyzer* untuk diubah menjadi hidrogen sebagai bahan bakar *fuel cell* untuk menghasilkan daya listrik.

Sedangkan kekurangan daya terjadi pada 01.00-05.00 (*time* 3600 hingga 18000) dan terjadi kembali pada pukul 17.00-00.00 (*time* 61200 hingga 86400). Sebaliknya, jika *wind power system* tidak mampu memenuhi permintaan beban, maka akan terjadi kekurangan daya. Kekurangan daya ini kemudian disuplai oleh *fuel cell* agar tidak terjadi *drop* tegangan akibat daya beban yang besar disesuaikan dengan kekurangan yang ada yaitu 750 W dan 1500 W.

Untuk menghasilkan hidrogen, *electrolyzer* mengubah arus listrik yang melewatinya menjadi molekul O<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub> melalui proses elektrolisis yang ditunjukkan pada persamaan 1.

$$mH_2 = \eta_F \left( \frac{n \cdot I}{F} \right) \tag{1}$$

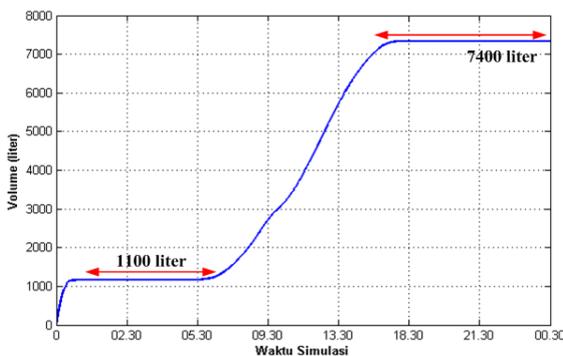
Sedangkan untuk menghasilkan volume hidrogen menggunakan persamaan 2.

$$V = \frac{n.R.T}{P} \tag{2}$$

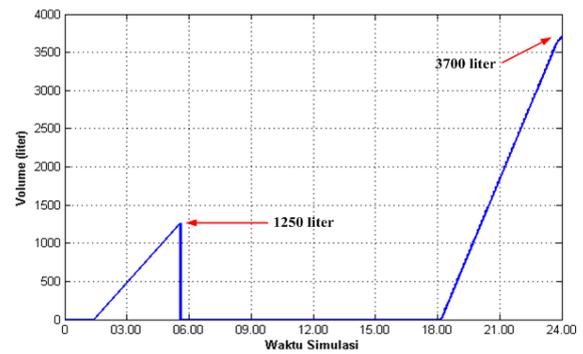
Dari persamaan 1 dan 2, *electrolyzer* mampu menghasilkan mol hidrogen sebanyak 300 mol sehingga volume hidrogen yang diproduksi adalah sebanyak 7400 liter dalam waktu 24 jam. Hidrogen dikonsumsi sebagai bahan bakar *fuel cell* jika terjadi kekurangan daya. Jika terjadi kondisi tersebut, maka katup akan mengalirkan hidrogen sesuai dengan kebutuhan *fuel cell* untuk membangkitkan daya listrik. Pemakaian hidrogen terjadi dalam 2 rentang waktu yaitu pada pukul 01.00-05.30 dan 18.00-24.00. Jika katup hidrogen tidak dikendalikan oleh logika *fuzzy* maka pemakaian hidrogen berturut-turut 1510 dan 4400 liter. Sedangkan jika dikendalikan oleh logika *fuzzy* maka pemakaian hidrogen berturut-turut 1250 dan 3700 liter. Volume hidrogen yang tersisa tanpa menggunakan kontrol logika *fuzzy* adalah 3000 liter sedangkan dengan menggunakan kontrol logika *fuzzy* adalah 3700 liter sehingga dengan penggunaan logika *fuzzy* mampu menghemat pemakaian hidrogen hingga 700 liter dibandingkan dengan tanpa kontrol logika *fuzzy*.

Gambar 8 menunjukkan daya beban aktual dan beban referensi pada sistem hibrida. Antara daya beban aktual dengan beban referensi cukup berhimpit, meskipun beberapa jika terjadi *drop*. Hal ini disebabkan karena adanya koordinasi antara *wind power system* dengan *fuel cell*, yang membutuhkan waktu respon dalam membangkitkan daya sehingga *drop* pun terjadi. Selain itu, perubahan kondisi sistem yang seketika akibat adanya perubahan beban baik penambahan maupun pengurangan beban secara tiba-tiba menyebabkan sistem harus menyesuaikan kondisi tetap stabil. Namun adanya waktu respon yang singkat akibat peralihan tersebut menyebabkan adanya *drop* dan transien. Secara keseluruhan sistem hibrida PLT Angin dengan *fuel cell* mampu menjaga kontinuitas suplai energi pada beban. Presentase terjadinya kondisi transien dan *drop* pada daya adalah 12,5%.

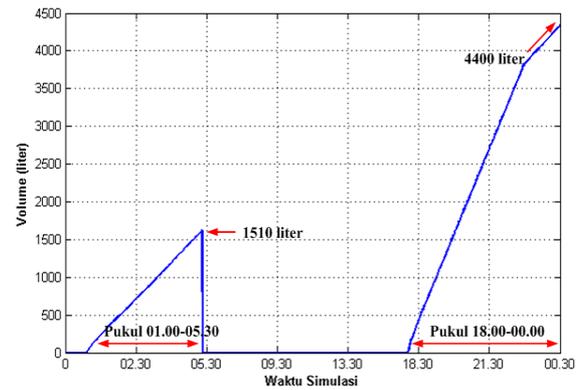
Tegangan yang bekerja pada beban adalah tegangan yang bekerja pada *wind power system* dan *fuel cell* yang diatur oleh *switch* yang ditunjukkan pada Gambar 9. Pada sistem hibrida ini tegangan diatur agar tetap stabil yaitu 48V. Terjadi beberapa kali *drop* tegangan akibat adanya koordinasi antara *wind power system* dengan *fuel cell*. Namun secara keseluruhan tegangan tetap stabil hingga akhir simulasi.



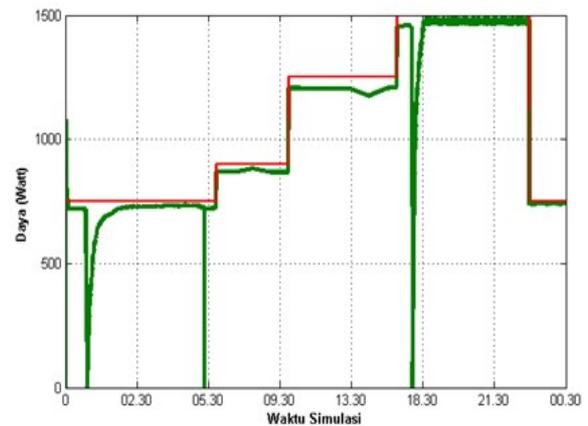
Gambar 6. Produksi volume hidrogen



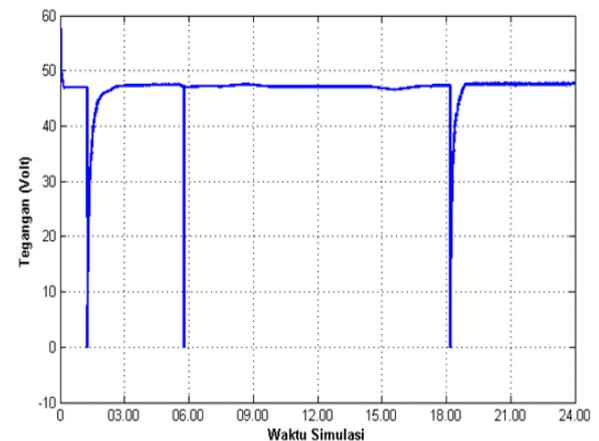
Gambar 7. Konsumsi hidrogen dengan logika *fuzzy*



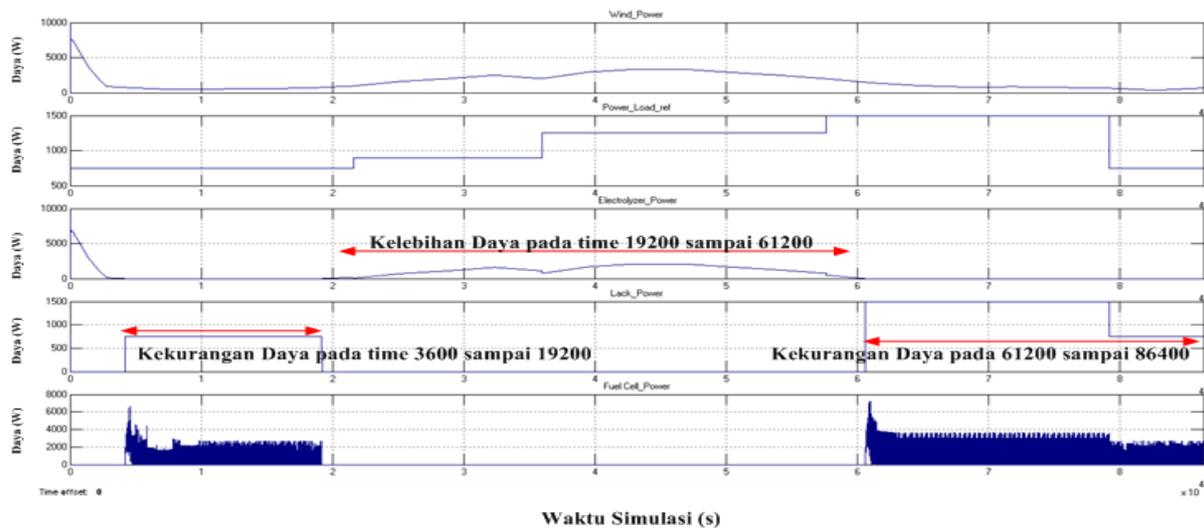
Gambar 8. Konsumsi hidrogen tanpa logika *fuzzy*



Gambar 9. Daya pada beban



Gambar 10. Tegangan pada beban



Gambar 10. Kelebihan dan kekurangan daya pada sistem pembangkit listrik hibrida

## KESIMPULAN

Dari hasil pengujian dan penelitian diperoleh kesimpulan bahwa pemodelan sistem pembangkit listrik hibrida tenaga angin dengan *fuel cell* mampu menjaga kontinuitas suplai permintaan daya beban baik tegangan sebesar 48V maupun daya yang fluktuatif sebesar 750W, 900W, 1250W, dan 1500W. Kinerja sistem kontrol sistem hibrida antara tenaga angin-PMSG dengan *fuel cell* menggunakan *fuzzy logic controller* cukup baik sehingga kestabilan dan kontinuitas energi tetap terjaga dengan presentase 12,5% terjadi kondisi transien akibat adanya peralihan sumber antara *wind power system* dengan *fuel cell*.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] P. Udhayakumar, Saravanan C., Lydia M. *Stand-Alone Wind Energy Supply System Using Permanent Magnet Synchronous Generator. International Journal of Innovative Technology Engineering*. ISSN : 2278-3075, vol. 2, issue 3, Feb 2013.
- [2] Malla, Siva Ganesh, S. Mishra, C.N. Bhende. *Permanent Magnet Synchronous Generator. IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 2 no. 4, Oct. 2011.