



**OPTIMASI MANAJEMEN DAYA PADA SISTEM HIBRIDA  
ANTARA TURBIN ANGIN, FOTOVOLTAIK, DAN *FUEL CELL*  
PADA STUDI KASUS KAWASAN WATU ULO**

**SKRIPSI**

oleh

**Yudha Megantara  
NIM 111910201025**

**JURUSAN TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS JEMBER  
2015**



**OPTIMASI MANAJEMEN DAYA PADA SISTEM HIBRIDA  
ANTARA TURBIN ANGIN, FOTOVOLTAIK, DAN *FUEL CELL*  
PADA STUDI KASUS KAWASAN WATU ULO**

**SKRIPSI**

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

oleh

**Yudha Megantara**  
**NIM 111910201025**

**JURUSAN TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS JEMBER  
2015**

## PERSEMBAHAN

Dengan ini saya persembahkan skripsi kepada:

1. Allah SWT yang Allah SWT yang Maha Pengasih lagi Maha Penyayang.
2. Kedua orang tua tercinta, Ayahku Alm Herry Soesanto dan mamaku Elok Yuliani atas kasih sayang, pengorbanan dan kesabaran yang tiada tara serta doa yang selalu menyertai.
3. Orang yang telah memperjuangkan saya sedari SMP hingga kuliah, tanteku Sri Widyaastuti
4. Teman-teman Teknik Elektro Universitas Jember Angkatan 2011.
5. Guru – guruku mulai SDN 1 Bligo, SMP 1 Magetan hingga SMA 2 Sidoarjo. Terima kasih untuk ilmu yang telah diajarkan selama ini.
6. Almamater Teknik Elektro Universitas Jember.

**MOTTO**

“Sesungguhnya dibalik dan sesudah kesulitan itu ada kemudahan, maka apabila kamu telah selesai (dari suatu urusan) kerjakanlah dengan sungguh-sungguh urusan yang lain. Dan hanya kepada Tuhanmulah hendaknya kamu berharap.”

(Qs. Al Insyrah 6-8)

“Tuhan menaruhmu di tempat yang sekarang, bukan karena kebetulan. Orang yang hebat tidak dihasilkan melalui kemudahan, kesenangan, dan kenyamanan.

Mereka dibentuk melalui kesukaran, tantangan, dan air mata

(Dahlan Iskan)

"Orang-orang hebat di bidang apapun bukan baru bekerja karena mereka terinspirasi, namun mereka menjadi terinspirasi karena mereka lebih suka bekerja. Mereka tidak menyia-nyiakan waktu untuk menunggu inspirasi."

(Ernest Newman)

"Orang-orang yang sukses telah belajar membuat diri mereka melakukan hal yang harus dikerjakan ketika hal itu memang harus dikerjakan, entah mereka menyukainya atau tidak."

(Aldus Huxley)

**PERNYATAAN**

Saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama: Yudha Megantara

NIM : 111910201025

menyatakan dengan sesungguhnya bahwa karya ilmiah yang berjudul "Optimasi Manajemen Daya Pada Sistem Hibrida Antara Turbin Angin, Fotovoltaik, Dan *Fuel cell* Pada Studi Kasus Kawasan Watu Ulo" adalah benar-benar hasil karya sendiri, kecuali kutipan yang sudah saya sebutkan sumbernya, belum pernah diajukan pada institusi mana pun, dan bukan karya jiplakan. Saya bertanggung jawab penuh 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 manapun serta bersedia mendapat sanksi akademik jika ternyata di kemudian hari pernyataan ini tidak benar.

Jember, 09 Juli 2015

Yang menyatakan,

Yudha Megantara

NIM 111910201025

**SKRIPSI**

**OPTIMASI MANAJEMEN DAYA PADA SISTEM HIBRIDA  
ANTARA TURBIN ANGIN, FOTOVOLTAIK, DAN *FUEL CELL*  
PADA STUDI KASUS KAWASAN WATU ULO**

Oleh

Yudha Megantara

NIM 111910201025

Pembimbing

Dosen Pembimbing Utama : Dedy Kurnia Setiawan, S.T., M.T.

Dosen Pembimbing Anggota : Dr. Bambang Sri Kaloko, S.T., M.T.

**PENGESAHAN**

Skripsi berjudul “Optimasi Manajemen Daya Pada Sistem Hibrida Antara Turbin Angin, Fotovoltaik, Dan *Fuel cell* Pada Studi Kasus Kawasan Watu Ulo” Telah diuji dan disahkan pada :

Hari : Selasa

Tanggal : 30 Juni 2015

Tempat : Fakultas Teknik Universitas Jember

Tim Penguji

Pembimbing Utama,

Pembimbing Anggota,

Dedy Kurnia Setiawan, S.T., M.T.  
NIP 19800610 200501 1 003

Dr. Bambang Sri Kaloko, S.T., M.T.  
NIP 19710402 200312 1 001

Penguji I,

Penguji II,

Ir. Widyono Hadi, M.T.  
NIP 19610414 198902 1 001

Dr. Triwahju Hardianto, S.T., M.T.  
NIP 19700826 199702 1 001

Mengesahkan

Dekan Fakultas Teknik  
Universitas Jember,

Ir. Widyono Hadi, M.T.  
NIP 19610414 198902 1 001

## RINGKASAN

**Optimasi Manajemen Daya Pada Sistem Hibrida Antara Turbin Angin, Fotovoltaik, Dan *Fuel cell* Pada Studi Kasus Kawasan Watu Ulo;** Yudha Megantara, 111910201025; 2015: 53 halaman; Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Jember.

Permintaan kebutuhan beban listrik yang semakin meningkat menimbulkan berbagai macam masalah. Mulai dari proses pembangkitan energi sampai dari jumlah pemakaian listrik yang terus melonjak 7.5 persen/tahun dari tahun 2008 – 2013. Namun di lain sisi perkembangan energi di Indonesia saat ini masih didominasi oleh batu bara sebagai bahan bakarnya. Salah satu solusi yang ada adalah mengganti bahan baku konvensional tersebut dengan bahan yang dapat diperbarui dan tersedia dalam jumlah yang besar. Hal ini mengarah pada sebuah konsep energi baru terbarukan (EBT). Energi yang menjadi perhatian publik saat ini adalah energi angin dan energi surya. Energi – energi tersebut merupakan energi yang bersumber dari alam. Energi angin dan surya tersebut dikonversi menjadi listrik melalui turbin angin dan fotovoltaik.

Sistem hibrida dapat menjadi sebuah solusi atas krisis energi yang terjadi. Hal ini menggabungkan beberapa pembangkit yaitu turbin angin, fotovoltaik dan *fuel cell*. Salah satu manfaat sistem hibrida adalah mengatasi masalah pada satu buah pembangkit, misal masalah fotovoltaik yang hanya dapat beroperasi pada saat terdapat sinar matahari. Manajemen energi diperlukan dalam penelitian ini. Manajemen energi tersebut berguna agar tidak terjadi kurang daya, kelebihan daya secara ekstrim dan pemborosan sistem dalam pembangunan sumber EBT tersebut.

Studi kasus yang dilakukan bertempat di kawasan Watu Ulo Jember. Data beban listrik yang digunakan mengacu pada data beban yang dikeluarkan oleh PLN Jember Unit Ambulu. Data beban tersebut diambil bagian penyulang yang ada

dikawasan Watu Ulo Jember dan didapatkan beban pada fasa R 6.03 KVA, fasa S 3.61 KVA dan fasa T 12.06 KVA. Jumlah dari ketiga fasa tersebut yang akan digunakan sebagai beban puncak pada penelitian ini yaitu 21.078 KVA dibulatkan menjadi 22 KW (beban DC).

Tiga buah sumber yang akan dimodelkan kedalam simulink matlab adalah turbin angin, fotovoltaik, dan *fuel cell*, sedangkan untuk media penyimpanan menggunakan *electrolyzer* dan tabung hidrogen. Turbin angin, fotovoltaik dan *fuel cell* mensuplai beban nyata pada kawasan Watu Ulo Jember. Beban dengan nilai puncak sebesar 22 KW dengan rincian kapasitas turbin angin mensuplai sebanyak 80% dari puncak yaitu sebesar 17 KW dengan memparalel turbin angin 500 W sebanyak 36 buah. Fotovoltaik mensuplai kekurangan 20% total beban menjadi 4.4 KW, sehingga dibutuhkan fotovoltaik 500 Wp sebanyak 9 buah. *Fuel cell* digunakan jika terdapat kekurangan daya (*lack power*) pada sistem.

Pembangkit sistem hibrida turbin angin 500W x 36, fotovoltaik 500 Wp x 10, dengan *fuel cell* mampu mensuplai beban nyata di kawasan Watu Ulo Jember dengan rincian, *excess power* terjadi pukul 11.00 – 14.00 mencapai 14 KW, 15.00 – 16.00 sebesar 13.5 KW dan pukul 01.00 sebesar 3 KW dengan produksi gas hidrogen masing – masing mencapai 0.25, 0.18, dan 0.12 mol/s serta tekanan tangki mencapai 625 pascal.

## SUMMARY

**Power Management Optimization on Hybrid Power System Wind Turbine, Photovoltaic, And Fuel cell on Case Study of Watu Ulo Area;** Yudha Megantara; 111910201025; 2015: 53 pages; Electrical Engineering Departement, Faculty of Engineering, Jember University.

Request of requirement of electric load which progressively mount to generate assorted of problem in it. Start from energy generation until mount of electrics usage non-stopped leap horizontally - flatten 7.5% / year from 2008 – 2013. But in the othen hand, energy expantion in Indonesia still be predominated by generating using coal. The solution is change and replace coal material with the other energy that can be renewable. Thats means renewable energy concept. Energy that have a good public attention now is wind energy and sun radiation energy. It is a energy that of natural resources. It is can be convert to electical through wind turbine and photovoltaic.

Hybrid system can become a solution for energy crisis that happened. Its matter join some generating likes wind turbine, photovoltaic and fuel cell. One of benefit of hybrid system is overcome the problem in one source generation, example the problem of photovoltaic that can produce energy when sun shines. Energy management is needed for there is no lack power, extreme excess power and wasteful system in development renewable energy resource.

Case study conducted by to have place in Watu Ulo Jember. Data of electrics load used relate at load data released by PLN Jember, Ambulu Unit. the Load Data participated by existing feeder is Watu Ulo Jember and got by load at phase R 6.03 KVA, phase S 3.61 KVA and phase T 12.06 KVA. Sum up from third the fasa to be used as by peak load at this research that is 21.078 KVA rounded up to become 22 KW (DC load).

Three source to be modeled into simulink matlab is wind turbine, photovoltaic, and fuel cell, while for the storage media of to use the electrolyzer and hydrogen tank. Wind turbine, photovoltaic and real fuel cell load supply at area of Watu Ulo Jember. Load with the value culminate equal to 22 KW by the detail of capacities of turbine of supply wind as much 80% from top that is equal to 17 KW by parallel of wind turbine 500 W as much 36. Photovoltaic of insufficiency Supply 20% totalizing load become 4.4 KW, so that required by photovoltaic 500 Wp as much 9. Fuel Cell used if there are energy insufficiency (lack power) at system.

Generating of Hybrid System of wind turbine 500W x 36, fotovoltaik 500 Wp x 10, fuel cell is cell of load supply able to be real in Watu Ulo Jember with the detail, excess power happened to at 11.00 - 14.00 reaching 14 KW, 15.00 - 16.00 equal to 13.5 KW and at 01.00 equal to 3 KW with the production of gas of hydrogen each reach 0.25, 0.18, and 0.12 mole / s and also tank pressure reach 625 pascal.

## PRAKATA

Puji syukur kehadirat Allah SWT atas limpahan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Optimasi Manajemen Daya pada Sistem Hibrida antara Turbin Angin, Fotovoltaik, dan *Fuel cell* pada Studi Kasus Kawasan Watu Ulo”. Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan program studi strata satu (S1) Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Jember.

Selama penyusunan skripsi ini penulis mendapat bantuan dari berbagai pihak, untuk itu penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Bapak Ir. Widyono Hadi, M.T., selaku dekan Fakultas Teknik Universitas Jember;
2. Bapak Dedy Kurnia Setiawan, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing utama;
3. Bapak Dr. Bambang Sri Kaloko, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing anggota;
4. Bapak Ir. Widyono Hadi, M.T., selaku dosen penguji utama;
5. Bapak Dr. Triwahju Hardianto, S.T., M.T., selaku dosen penguji anggota;
6. Bapak Suprihadi Prasetyono, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing akademik;
7. Kedua orang tua dan saudara - saudaraku yang telah memberikan dukungan moril dan materiil selama penyusunan skripsi ini;
8. Tim Project D, yang telah membantu memberikan dukungan semangat dan pengarahan dalam penyusunan skripsi ini;
9. Rusydina Tamimi atas bantuan, waktu dan motivasi yang telah diberikan;
10. Sahabat – sahabat US dan lainnya, atas semangat yang telah ditularkan selama pengerjaan skripsi ini.
11. Kawan – kawan kontrakan U2 Yopi, Bani, Ghofur, Marwah dan Angga atas kebersamaan selama ini.

DAFTAR ISI

	Halaman
<b>HALAMAN SAMPUL</b> .....	i
<b>HALAMAN JUDUL</b> .....	ii
<b>HALAMAN PERSEMBAHAN</b> .....	iii
<b>HALAMAN MOTTO</b> .....	iv
<b>HALAMAN PERNYATAAN</b> .....	v
<b>HALAMAN PEMBIMBING</b> .....	vi
<b>HALAMAN PENGESAHAN</b> .....	vii
<b>RINGKASAN</b> .....	viii
<b>SUMARRY</b> .....	x
<b>PRAKATA</b> .....	xii
<b>DAFTAR ISI</b> .....	xiii
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	xvi
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	xvii
<b>BAB 1. PENDAHULUAN</b> .....	1
<b>1.1 Latar Belakang Masalah</b> .....	1
<b>1.2 Rumusan Masalah</b> .....	3
<b>1.3 Batasan Masalah</b> .....	3
<b>1.4 Tujuan Penelitian</b> .....	3
<b>1.5 Manfaat Penelitian</b> .....	4
<b>BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	5
<b>2.1 Energi Baru Terbarukan (EBT)</b> .....	5
2.1.1 Turbin Angin .....	6
2.1.2 Sel Surya (Fotovoltaik) .....	8
2.1.3 <i>Fuel cell</i> .....	10
<b>2.2 Media Penyimpanan</b> .....	12

2.2.1 <i>Electrolyzer</i> .....	12
2.2.2 Tabung Hidrogen.....	13
<b>2.3 Perangkat Lunak MATLAB</b> .....	14
<b>BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN</b> .....	15
<b>3.1 Bagian-Bagian Simulasi Sistem Pada MATLAB</b> .....	15
3.1.1 Pemodelan Fotovoltaik.....	15
3.1.2 Pemodelan Turbin Angin .....	17
3.1.3 Pemodelan <i>Fuel cell</i> .....	18
3.1.4 Pemodelan <i>Electrolyzer</i> .....	21
3.1.5 Pemodelan Tabung Hidrogen .....	22
3.1.6 Pemodelan Kontrol.....	23
3.1.7 Data Pembebanan .....	24
<b>3.2 Diagram Alir Penelitian</b> .....	25
<b>3.3 Diagram Alir Sistem Hibrida Turbin Angin, Fotovoltaik dan <i>Fuel cell</i></b> .....	26
<b>BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN</b> .....	28
<b>4.1 Pengujian Pembebanan</b> .....	28
4.1.1 Beban Nyata .....	28
4.1.2 Beban Rancangan .....	29
<b>4.2 Penentuan Kapasitas Pembangkit</b> .....	30
4.2.1 Skenario I – Pengujian Sistem Hibrida Turbin Angin dan <i>Fuel Cell</i> .....	30
4.2.2 Skenario II – Pengujian Sistem Hibrida Fotovoltaik dan <i>Fuel Cell</i> .....	30
4.2.3 Skenario III – Pengujian Sistem Hibrida Turbin Angin, Fotovoltaik, dan Fuel Cell (Beban Nyata). ..	31
4.2.4 Skenario IV – Pengujian Sistem Hibrida Turbin Angin, Fotovoltaik, dan Fuel Cell (Beban Rancangan) .....	31

<b>4.3 Pengukuran Iradiasi Sinar Matahari .....</b>	<b>32</b>
<b>4.4 Pengujian Modul Fotovoltaik .....</b>	<b>34</b>
<b>4.5 Pengujian Turbin Angin .....</b>	<b>35</b>
<b>4.6 Pengujian <i>Fuel cell</i>, Tabung Hidrogen dan <i>Elektrolyzer</i> .....</b>	<b>37</b>
<b>4.7 Skenario I – Pengujian Sistem Hibrida</b>	
<b>Turbin Angin dan <i>Fuel Cell</i> .....</b>	<b>38</b>
4.7.1 Manajemen Daya Turbin Angin dan <i>Fuel Cell</i> .....	39
4.7.2 Produksi Gas dan Tekanan Tangki Hidrogen .....	40
<b>4.8 Skenario II – Pengujian Sistem Hibrida</b>	
<b>Fotovoltaik dan <i>Fuel Cell</i> .....</b>	<b>41</b>
4.8.1 Manajemen Daya Fotovoltaik dan <i>Fuel Cell</i> .....	41
4.8.2 Produksi Gas dan Tekanan Tangki Hidrogen .....	43
<b>4.9 Skenario III – Pengujian Sistem Hibrida</b>	
<b>Turbin Angin, Fotovoltaik, dan <i>Fuel Cell</i> (Beban Nyata) ....</b>	<b>44</b>
4.9.1 Manajemen Daya Turbin Angin, Fotovoltaik dan <i>Fuel Cell</i> (Beban Nyata) .....	45
4.9.2 Produksi Gas dan Tekanan Tangki Hidrogen .....	46
<b>4.10 Skenario IV – Pengujian Sistem Hibrida</b>	
<b>Turbin Angin, Fotovoltaik, dan <i>Fuel Cell</i>     (Beban Rancangan) .....</b>	<b>47</b>
4.10.1 Manajemen Daya Turbin Angin, Fotovoltaik dan <i>Fuel Cell</i> (Beban Rancangan) .....	47
4.10.2 Produksi Gas dan Tekanan Tangki Hidrogen .....	49
<b>BAB 5. PENUTUP.....</b>	<b>51</b>
<b>5.1 Kesimpulan.....</b>	<b>51</b>
<b>5.2 Saran .....</b>	<b>52</b>
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>53</b>

**DAFTAR TABEL**

	Halaman
3.1 Spesifikasi Elektrik .....	16
3.2 Spesifikasi Turbin Angin ECO - 500 W .....	18
3.3 Logika Sistem Penyaklaran .....	24
3.4 Data Pembebanan .....	24
4.1 Tabel Daya per Fase .....	28
4.2 Data Beban Nyata .....	28
4.3 Data Beban Rancangan .....	29
4.4 Data Radiasi Sinar Matahari di Pantai Watu Ulo Jember .....	32
4.5 Data Kecepatan Angin di Pantai Watu Ulo .....	46

## DAFTAR GAMBAR

	Halaman
2.1 Sumber EBT – Turbin Angin .....	5
2.2 Diagram Blok Umum dari Turbin Angin .....	6
2.3 Bidang Udara yang Melewati Turbin Angin .....	8
2.4 Modul Fotovoltaik.....	8
2.5 Karakteristik Arus Tegangan (I-V) Sel Surya .....	9
2.6 Operasi Sel Surya Berdasarkan Bahan Semikonduktor .....	10
2.7 Lapisan PEMFC .....	11
2.8 Proses Elektrolisis .....	12
2.9 Tampilan Program MATLAB .....	14
3.1 Model Utama Fotovoltaik .....	15
3.2 Subsistem Bagian Pada Fotovoltaik.....	16
3.3 Model <i>Simpower</i> Blok Fotovoltaik .....	17
3.4 Model Turbin Angin .....	17
3.5 Subsistem Model Turbin Angin .....	18
3.6 Model <i>Fuel cell</i> .....	18
3.7 Subsistem Model <i>Fuel cell</i> .....	19
3.8 Model <i>Electrolyzer</i> .....	22
3.9 Model Tabung Hidrogen .....	23
3.10 Model Sistem Kontrol .....	23
3.11 Diagram Alir Penelitian .....	25
3.12 Diagram Alir Sistem .....	27
4.1 Grafik Beban Nyata .....	29
4.2 Grafik Daya Beban Rancangan .....	30
4.3 Lokasi Pantai Watu Ulo Jember .....	32
4.4 Grafik Radiasi Sinar Matahari .....	33

4.5	Pengujian Fotovoltaik .....	34
4.6	Grafik Hubungan Daya dengan Tegangan pada Fotovoltaik .....	34
4.7	Grafik Hubungan Arus dengan Tegangan pada Fotovoltaik.....	35
4.8	Grafik Data Kecepatan Angin .....	36
4.9	Pengujian <i>Fuel cell</i> , Tabung Hidrogen, dan <i>Electrolyzer</i> .....	37
4.10	Grafik Daya Sumber dan Daya Beban .....	37
4.11	Grafik Daya <i>Electrolyzer</i> dan Daya <i>Fuel cell</i> .....	38
4.12	Blok Sistem Hibrida Turbin Angin dan <i>Fuel cell</i> .....	38
4.13	Grafik Daya Turbin Angin dan <i>Fuel cell</i> .....	39
4.14	Grafik Daya <i>Electrolyzer</i> dan Beban .....	39
4.15	Produksi Gas Hidrogen .....	40
4.16	Grafik Tekanan Dalam Tabung Hidrogen .....	41
4.17	Pemodelan Sistem Hibrida Fotovoltaik dan <i>Fuel cell</i> .....	41
4.18	Grafik Daya Fotovoltaik dan <i>Fuel cell</i> .....	42
4.19	Grafik Daya Beban dan Daya <i>Electrolyzer</i> .....	42
4.20	Produksi Gas Hidrogen .....	43
4.21	Tekanan Tangki Hidrogen .....	44
4.22	Sistem Hibrida Turbin Angin, Fotovoltaik, dan <i>Fuel cel</i> .....	44
4.23	Grafik Daya Turbin Angin, Fotovoltaik, dan <i>Fuel cell</i> .....	45
4.24	Grafik Daya <i>Electrolyzer</i> dan Beban .....	46
4.25	Produksi Gas Hidrogen .....	46
4.26	Tekanan Tangki Hidrogen .....	47
4.27	Grafik Daya Turbin Angin, Fotovoltaik, dan <i>Fuel cell</i> .....	48
4.28	Grafik Daya <i>Electrolyzer</i> dan Beban .....	49
4.29	Produksi Gas Hidrogen .....	49
4.30	Tekanan Tangki Hidrogen .....	50

## BAB 1. PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang Masalah

Permintaan kebutuhan beban listrik yang semakin meningkat menimbulkan berbagai macam masalah. Mulai dari proses pembangkitan energi sampai dari jumlah pemakaian listrik yang terus melonjak 7.5 persen/tahun dari tahun 2008 – 2013. (RUPTL PLN, 2013). Namun di lain sisi perkembangan energi di Indonesia saat ini masih didominasi oleh batu bara sebagai bahan bakarnya. Perlu diperhatikan bahwa bahan bakar batu bara tersebut merupakan sumber daya alam (SDA) yang tidak dapat diperbarui dan akan mengalami susut (habis) dalam waktu 70 tahun mendatang (jika tidak ada eksplorasi baru). (RUPTL PLN, 2013)

Salah satu solusi yang ada adalah mengganti bahan baku konvensional tersebut dengan bahan yang dapat diperbarui dan tersedia dalam jumlah yang besar. Hal ini mengarah pada sebuah konsep energi baru terbarukan (EBT). EBT merupakan sumber energi yang murah, bebas polusi dan memanfaatkan energi yang ada di alam sekitar seperti angin, ombak, hingga sinar matahari. Konsep EBT tersebut juga merupakan sebuah usaha perwujudan perpres 5/2006 tentang target pemerintah tahun 2025 untuk mengoptimalkan sumber EBT sebesar 25% dari total bauran energi yang ada (Dadan Kusdiana, 2013).

Energi yang menjadi perhatian publik saat ini adalah energi angin dan energi surya. Energi – energi tersebut merupakan energi yang bersumber dari alam. Energi angin dan surya tersebut dikonversi menjadi listrik melalui turbin angin dan fotovoltaik.

Potensi energi angin di Indonesia sampai saat ini mencapai 166 titik. Potensi tersebut masih dapat terus dikaji guna mendukung perpres 5/2006 untuk memasang energi angin hingga total sebesar 250 MW pada tahun 2025. Energi lain yang dapat dimanfaatkan adalah energi sinar matahari. Energi tersebut mensuplai fotovoltaik untuk menghasilkan energi listrik. Walaupun masih terganjal dengan harga yang

mahal namun fotovoltaik merupakan energi masa depan yang dapat dijadikan sebuah pilihan yang bijak. Salah satu potensi angin di Jember berada di kawasan Watu Ulo. Penelitian sebelumnya yaitu Novitasari, 2014 mengungkapkan bahwa kecepatan angin bisa mencapai 10 m/s pada satu waktu (Novitasari, 2014). Sehingga berpotensi jika dibangun sebuah turbin angin. Untuk energi surya, radiasi matahari di kawasan Watu Ulo mencapai  $975 \text{ W/m}^2$ .

Sumber – sumber EBT tersebut dapat menghasilkan daya yang besar. Namun dalam praktiknya energi surya dan angin merupakan energi yang dipengaruhi oleh kondisi alam (tidak stabil). Angin yang tidak selalu berhempus tiap jamnya dan radiasi matahari yang hanya bersinar pada waktu pagi hingga siang hari. Berdasar pada kelemahan itulah perlu dibuatnya sistem hibrida, yaitu menggabungkan beberapa sumber EBT untuk bekerja sama guna mengatasi kekurangan maupun memanfaatkan kelebihan masing–masing sumber energi agar tercipta sebuah sistem yang handal. (Kumar *et al*, 2013).

Media penyimpanan yang digunakan dalam penelitian menggunakan *fuel cell*. Baterai tidak digunakan dalam penelitian dikarenakan fisik baterai yang harus diperbesar jika kapasitas baterai ingin ditambah, hal ini yang menjadi dasar pemilihan *fuel cell* sebagai media penyimpanan dalam penelitian ini.

*Fuel cell* dibutuhkan sebagai sumber energi tambahan yang menyokong dua sumber energi lain (turbin angin dan fotovoltaik) jika daya beban berada dalam kondisi yang tinggi. Selain *fuel cell* juga dibutuhkan alat bernama *electrolyzer*. *Electrolyzer* pada *fuel cell* ini juga berfungsi sebagai pengubah energi listrik yang dihasilkan turbin angin atau fotovoltaik menjadi gas hidrogen. Gas hidrogen itu digunakan sebagai bahan baku *fuel cell* untuk membangkitkan energi listrik jika terdapat kekurangan daya pada sistem. (Andik, 2012)

Manajemen energi diperlukan dalam penelitian ini. Manajemen energi tersebut berguna agar tidak terjadi kurang daya, kelebihan daya secara ekstrim dan pemborosan sistem dalam pembangunan sumber EBT tersebut.

## 1.2 Rumusan Masalah

Pada penelitian ini dibuat sebuah rumusan masalah yang menjadi fokus masalah yang akan dibahas selama penelitian ini berlangsung antara lain :

1. Bagaimana merancang pemodelan sistem hibrida antara turbin angin, fotovoltaik, dan *fuel cell* pada program MATLAB R2010a?
2. Bagaimanakah sistem manajemen daya pada sistem hibrida dengan sumber turbin angin, fotovoltaik, dan *fuel cell* pada kawasan Watu Ulo Jember?

## 1.3 Batasan Masalah

Dalam penelitian ini, menggunakan beberapa batasan masalah agar penelitian ini tidak terlalu luas yaitu :

1. Beban yang digunakan adalah beban DC.
2. Simulasi menggunakan program MATLAB R2010a.
3. Tidak membahas mengenai sistem secara ekonomis.
4. Peneliti tidak membahas detail mengenai sistem mekanik turbin angin
5. Perancangan model beban dirancang oleh peneliti sendiri.
6. Spesifikasi komputer/laptop yang digunakan adalah intel celeron B813 dan RAM 2 GB.

## 1.4 Tujuan Penelitian

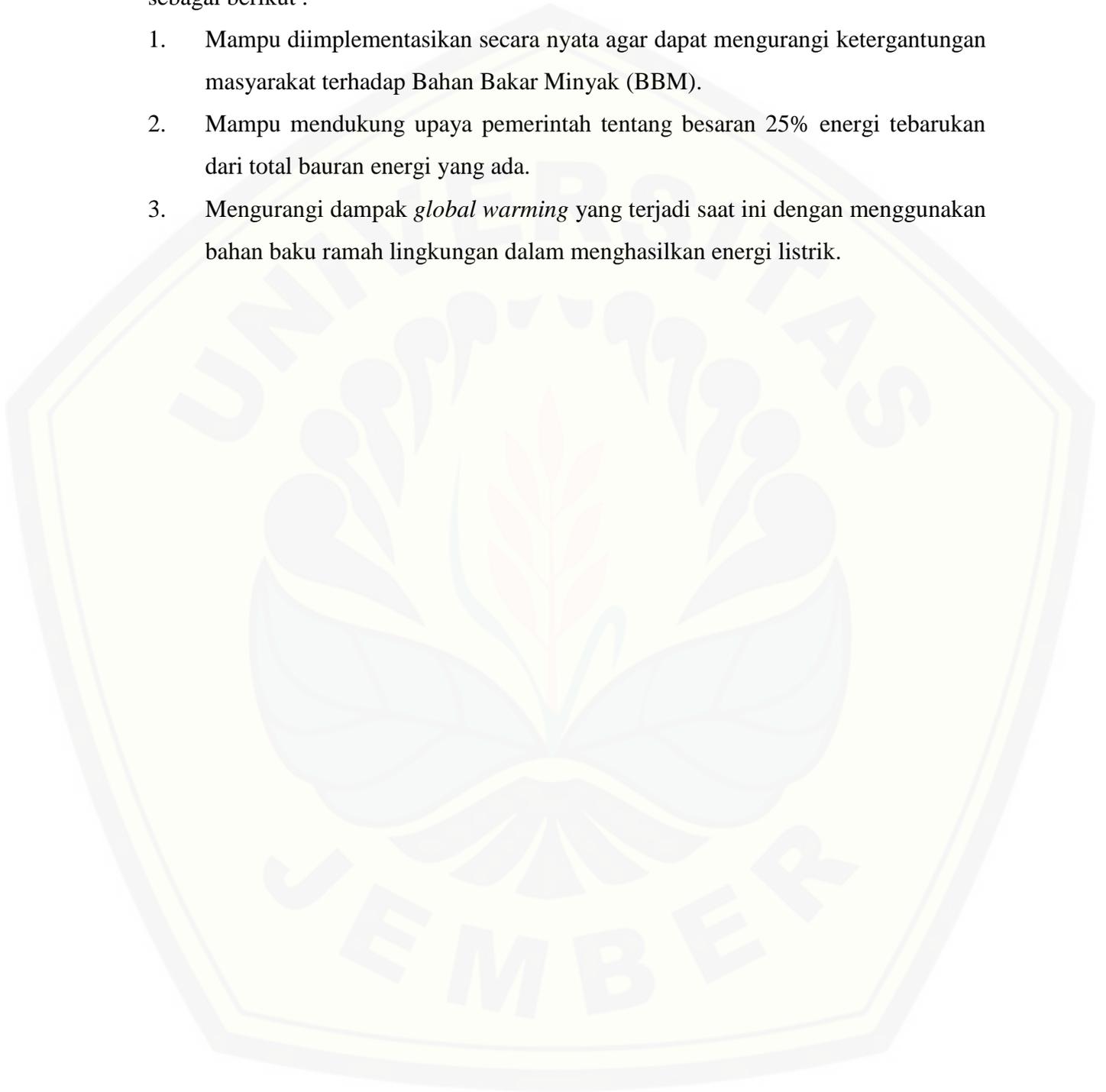
Tujuan yang ingin dicapai peneliti dalam melakukan penelitian ini antara lain adalah :

1. Merancang pemodelan sistem hibrida dengan sumber turbin angin, fotovoltaik, dan *fuel cell* pada program MATLAB R2010a.
2. Mengetahui manajemen daya pada sistem hibrida dengan sumber turbin angin, fotovoltaik, dan *fuel cell* pada daerah kawasan Watu Ulo Jember.

### 1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang ingin peneliti harapkan dengan tercapainya penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Mampu diimplementasikan secara nyata agar dapat mengurangi ketergantungan masyarakat terhadap Bahan Bakar Minyak (BBM).
2. Mampu mendukung upaya pemerintah tentang besaran 25% energi tebarukan dari total bauran energi yang ada.
3. Mengurangi dampak *global warming* yang terjadi saat ini dengan menggunakan bahan baku ramah lingkungan dalam menghasilkan energi listrik.



## BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Energi Baru Terbarukan (EBT)

EBT merupakan salah satu solusi untuk mengatasi masalah pertumbuhan beban di Indonesia. Sistem pembangkitan ini mampu mengatasi ketergantungan bahan bakar terhadap batu bara. Masalah lingkungan yang tercemar pun dapat diminimalisir dengan menggunakan EBT.

Pembangunan EBT di Indonesia disinyalir berkembang dari tahun ke tahun. Dukungan pemerintah direalisasikan dengan cara mengeluarkan perpres 5/2006 tentang target pemerintah tahun 2025 tentang pengoptimalan sumber energi baru terbarukan sebesar 25% dari total bauran energi yang ada (Dadan Kusdiana, 2013). Energi yang berasal dari fosil akan mengalami susut dalam beberapa tahun ke depan. Oleh karena itu dengan adanya EBT membantu upaya penghematan energi fosil tersebut.

Hal lain yang mendukung pembangunan EBT adalah pengetahuan dan kesadaran masyarakat terhadap pelestarian lingkungan hidup yang menunjukkan gejala positif. Masyarakat semakin peduli terhadap upaya penanggulangan segala bentuk polusi. Mulai dari sekedar menjaga kebersihan lingkungan sampai dengan mengontrol limbah buangan dan sisa produksi.



Gambar 2.1 Sumber EBT – Turbin Angin (Sumber : Sathyajith Mathew, 2006)

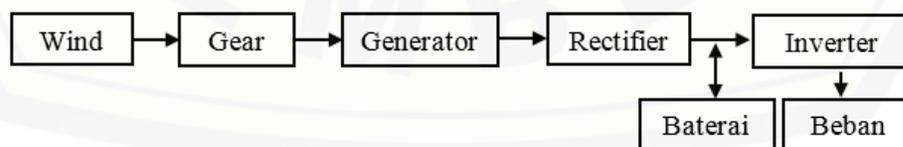
Beberapa dampak negatif dari penggunaan bahan baku konvensional (minyak bumi dan batu bara) antara lain adalah penambangan batu bara dapat memberikan pengaruh buruk terhadap kesehatan para penambang dan masyarakat di sekitar tambang karena menghirup debu terus-menerus. Rembesan air tambang yang bersifat asam juga menurunkan produktivitas. Nilai dari tanah yang telah menjadi bekas tambang berubah dan daratan terancam tenggelam. Begitu pula pada pembakaran tidak sempurna pada karbonmonoksida (CO) yang menjadi racun.

### 2.1.1 Turbin Angin

Turbin angin adalah sebuah sistem pembangkit yang memanfaatkan angin sebagai sumber gerak rotor yang memutar generator sehingga terbentuklah energi listrik. Angin sendiri sejatinya adalah udara bergerak yang diakibatkan oleh rotasi bumi dan perbedaan tekanan udara di sekitarnya. Angin bergerak dari tempat bertekanan udara tinggi ke bertekanan udara rendah.

Turbin angin merupakan sebuah pembangkit listrik yang mendukung konsep penghijauan. Tidak seperti pembangkit listrik yang lainnya yang berbahan baku batu bara dan gas alam, turbin angin hanya memerlukan angin sebagai bahan bakunya. Turbin angin mengkonversikan energi angin menjadi energi listrik dengan menggunakan sudu/*blade*. Cara kerjanya cukup sederhana, energi angin yang memutar sudu, diteruskan memutar rotor pada generator dibagian belakang turbin sehingga menghasilkan energi listrik. Energi listrik ini biasanya disimpan kedalam baterai sebelum dapat dimanfaatkan.

Secara umum, sistem keseluruhan dari sistem turbin angin ini adalah ditunjukkan pada gambar 2.2.



Gambar 2.2 Diagram Blok Umum dari Turbin Angin

Pemanfaatan energi angin sebagai sumber energi ini merupakan salah satu perwujudan dalam mendukung usaha mendukung perwujudan perpres 5/2006 tentang target pemerintah tahun 2025. (Dadan Kusdiana, 2013)

Indonesia mengalami peningkatan mengenai pengembangan turbin angin. Data Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) pada tahun 2010 di Indonesia telah terpasang turbin angin dengan total energi yang dihasilkan 1.962,45 kw/tahun. Hal ini mengalami peningkatan jika dibandingkan pada tahun 2005 yang hanya menghasilkan 1.029 kw/tahun. (Statistik EBTK, 2011)

Turbin angin adalah kincir angin yang memutar generator agar dapat menghasilkan tenaga listrik. Energi yang dihasilkan adalah energi kinetik dari angin yang bergerak pada permukaan bumi. Sudu turbin angin menerima energi kinetik sehingga bertransformasi menjadi energi listrik melalui generator. Efisiensi dari pengkonversian angin menjadi energi listrik sangat dipengaruhi oleh efisiensi rotor dan aliran angin yang didapat.

Energi kinetik adalah energi yang berhubungan dengan massa dan kecepatan. Persamaan energi kinetik ditunjukkan pada persamaan 2.1.

$$E = \frac{1}{2} m V^2 \quad (2.1)$$

Menganggap bahwa area yang dilewati angin pada rotor angin adalah A, maka energi kinetik pada aliran angin ditunjukkan pada persamaan 2.2.

$$E = \frac{1}{2} \rho_a v V^2 \quad (2.2)$$

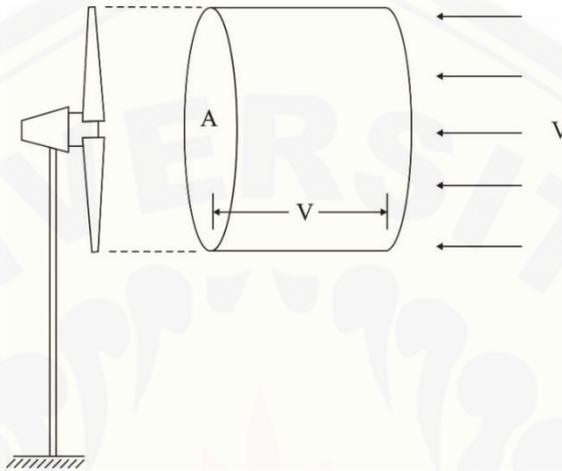
$\rho_a$  adalah kerapatan udara dan v adalah volume bidang yang tersedia di rotor angin. Bidang angin tersebut berinteraksi dengan rotor per satuan unit waktu sehingga sama dengan luas dari rotor ( $A_T$ ) sehingga energi angin yang dihasilkan ditunjukkan pada persamaan 2.3

$$E = \frac{1}{2} A_T V^3 \quad (2.3)$$

Luas rotor adalah  $\pi r^2$  sehingga persamaan 2.3 dapat ditulis menjadi persamaan 2.4.

$$P = \frac{1}{2} \pi r^2 V^3 \quad (2.4)$$

Seperti yang terlihat dalam Gambar 2.3 bahwa terdapat sebuah bidang udara yang melewati turbin angin sehingga terjadi energi mekanik pada turbin tersebut.



Gambar 2.3 Bidang Udara yang Melewati Turbin Angin

### 2.1.2 Fotovoltaik

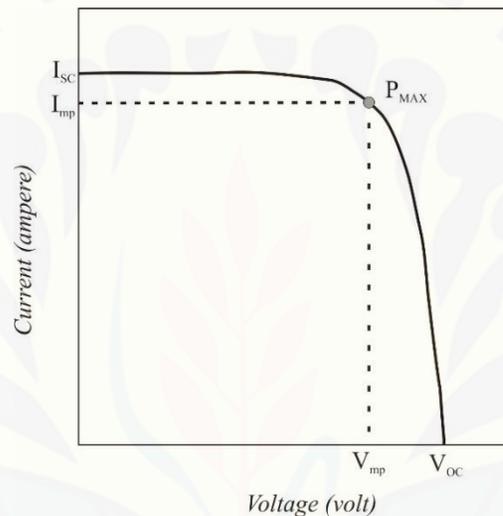
Fotovoltaik adalah alat yang dapat mengkonversi energi radiasi matahari menjadi energi listrik. Sel fotovoltaik secara sederhana adalah sebuah *diode junction* pn semikonduktor dengan *junction* ditempatkan sangat dekat dengan permukaan atas.. Pembawa-pembawa minoritas dibangkitkan oleh peristiwa *photon-photon* dengan energi yang lebih besar atau sama dengan celah energi (*energi gap*) dari bahan semikonduktor.



Gambar 2.4 Modul Fotovoltaik

Keluaran setiap sel fotovoltaik masih tergolong rendah (1-2 W). Beberapa sel kemudian dikombinasikan untuk membentuk sebuah modul. Rentang rating modul dari 40-50 W dengan tegangan 15-17 V. Modul fotovoltaik ditempatkan secara bersamaan untuk membentuk panel, array, grup, segmen, dan sebuah pembangkit fotovoltaik terdiri dari beberapa segmen.

Keuntungan fotovoltaik meliputi operasi dan biaya pemeliharaan yang rendah, tidak ada bagian yang bergerak, tenang, operasi yang sederhana dan umur yang tidak terbatas jika dipelihara dengan tepat. Kerugiannya adalah biayanya mahal, perlu area kolektor yang luas untuk menangkap radiasi.



Gambar 2.5 Karakteristik Arus Tegangan (I-V) Sel Surya

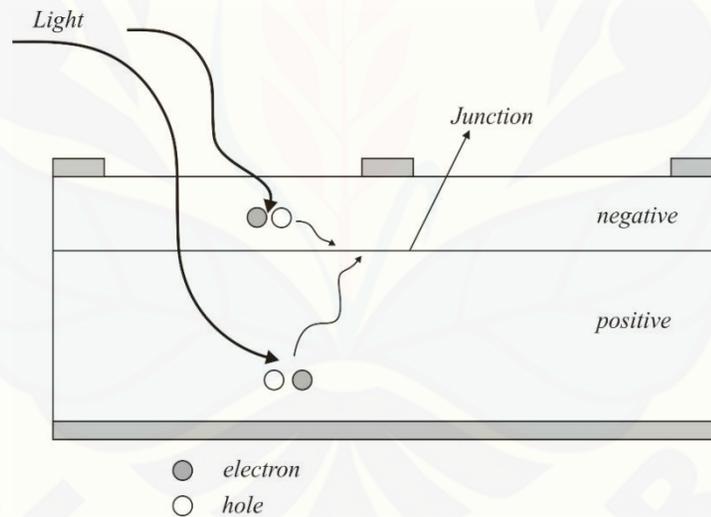
Keluaran tegangan fotovoltaik adalah DC. Diperlukan *inverter* untuk mensuplai beban-beban AC. Masukkan untuk sistem fotovoltaik ditentukan oleh faktor dari luar. Faktor tersebut adalah lapisan awan, waktu harian, musim tahunan, lokasi geografis, orientasi, dan geometri kolektor surya. Oleh karena itu sistem fotovoltaik dioperasikan sedapat mungkin dekat dengan daya maksimumnya.

Karakteristik arus-tegangan (I-V) dari fotovoltaik ditunjukkan pada Gambar 2.5. Persamaan karakteristik tersebut diberikan dengan persamaan 2.5.

$$I = I_S - I_D \left[ \exp\left(\frac{eV}{KT}\right) - 1 \right] \quad (2.5)$$

$I_D$  adalah *dark current* (arus gelap),  $I_s$  adalah *source current* (arus sumber),  $k$  adalah konstanta Boltzman ( $1,38 \times 10^{-23}$  J/K),  $T$  adalah suhu dalam kelvin, dan  $e$  adalah muatan elektron. Arus sumber  $I_s$  bervariasi secara linier dengan radiasi surya. *Dark current* ( $I_D$ ) meningkat bila suhu operasi sel meningkat. Rasio  $I_s$  terhadap  $I_D$  dibuat sebesar mungkin untuk memperbaiki operasi. Fotovoltaik adalah dioda semikonduktor yang didesain untuk menyerap cahaya matahari dan mengkonversinya menjadi listrik. Penyerapan cahaya matahari menghasilkan beberapa pembawa minoritas bebas yang menentukan arus fotovoltaik. Pembawa ini terpisah oleh *diode junction* yang menentukan besar tegangannya.

Operasi dasar fotovoltaik ditunjukkan pada Gambar 2.6. Foton cahaya diserap oleh bahan semikonduktor. Setiap foton yang diserap membangkitkan sepasang *electron-hole*. Pembawa minoritas yang dibangkitkan berdifusi ke *junction*. Jumlah pembawa yang terkumpul menentukan arusnya. Tegangan ditentukan oleh karakteristik *junction*.



Gambar 2.6 Operasi Sel Surya Berdasarkan Bahan Semikonduktor

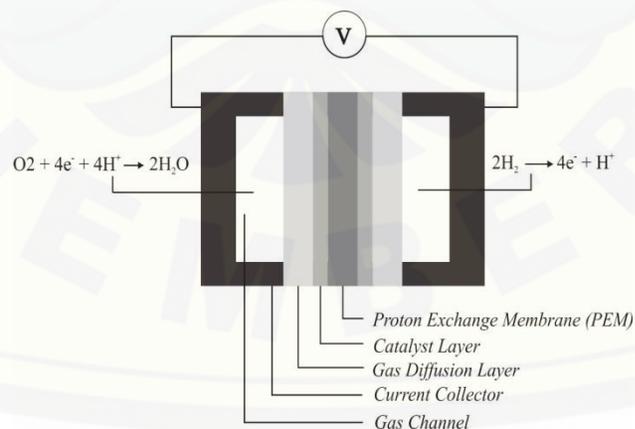
### 2.1.3 Fuel Cell

*Fuel cell* adalah alat elektrokimia yang dapat mengkonversi energi kimia menjadi energi listrik. Berdasarkan jenis elektrolitnya *fuel cell* dikelompokkan menjadi lima jenis, yaitu *polymer electrolyte fuel cell* (PEFC), *alkaline fuel cell* (AFC),

*phosphoric fuel cell* (PAFC), *molten carbonate fuel cell* (MCFC), dan *solid oxide fuel cell* (SOFC). PEFC sendiri terdiri dari dua jenis, yaitu yang berbahan bakar hidrogen dinamakan PEMFC (*Proton Exchange Membran Fuel Cell*) dan yang berbahan bakar metanol disebut DMFC (*Direct Methanol Fuel Cell*). PEMFC memiliki beberapa keunggulan dibandingkan jenis lainnya, yaitu suhu operasinya lebih rendah (40°C-80°C), densitas dan efisiensi energinya lebih tinggi, serta dapat dibuat dalam bentuk yang lebih kompak dan portabel.

*Fuel cell* jenis PEMFC memiliki efisiensi konversi energi yang tinggi hingga 40 sampai 70%, tidak menimbulkan efek getaran pada saat beroperasi, dan tidak menimbulkan emisi gas rumah kaca. Karena keunggulan tersebut, PEMFC sangat potensial untuk diaplikasikan dalam teknologi transportasi. PEMFC sangat cocok dikombinasikan dengan pembangkit listrik ramah lingkungan lainnya seperti fotovoltaik dan turbin angin. PEMFC dapat digunakan sebagai pembangkit energi listrik tersendiri dengan memakai bahan bakar hydrogen. PEMFC sangat menguntungkan jika digunakan sebagai sumber energi listrik pada beragam kebutuhan karena sangat fleksibel dan kompak.

Reaksi kimia yang terjadi adalah :



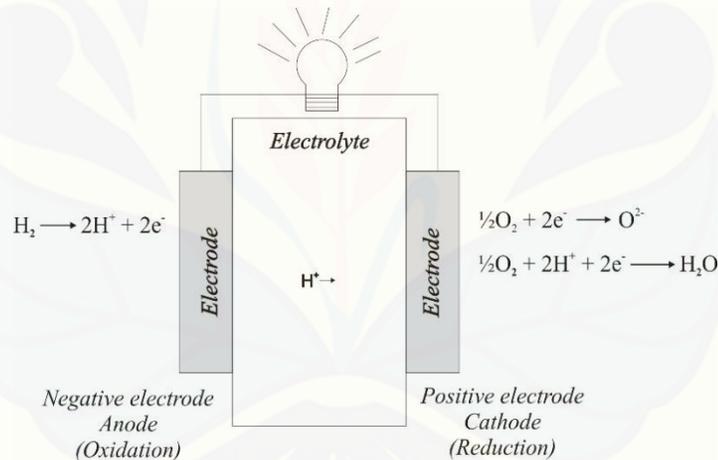
Gambar 2.7 Lapisan PEMFC

## 2.2 Media Penyimpanan

Media penyimpanan adalah sebuah alat yang dapat menyimpan daya listrik yang tersisa (daya lebih) ketika sumber energi utama mengalami kelebihan daya. Pada dasarnya media penyimpanan terdapat beberapa macam yaitu baterai, *electrolyzer* dan tabung hidrogen. Penelitian ini menggunakan *electrolyzer* dan tabung hidrogen yang digunakan untuk mensuplai *fuel cell*.

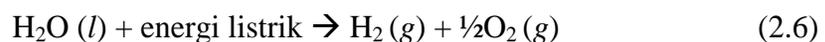
### 2.2.1 Electrolyzer

*Electrolyzer* adalah sebuah alat yang digunakan untuk memisahkan hidrogen dan oksigen dari air melalui metode elektrolisis. Air dipisahkan menjadi gas hidrogen dan oksigen dengan proses elektrolisis. Air murni mengalirkan listrik sangat buruk, sehingga dengan menambahkan elektrolit memungkinkan sebuah arus listrik kecil mengalir melalui air dengan mudah. Gas hidrogen dan oksigen kemudian menggelembung naik dari elektroda masuk ke dalam air.



Gambar 2.8 Proses Elektrolisis

Pada *elektrolyzer* terjadi sebuah proses yang dinamakan elektrolisis. Elektrolisis adalah proses yang memecah air menjadi gas hidrogen dan oksigen dengan mengalirkan arus listrik diantara dua elektroda. Reaksi elektrokimia dari elektrolisis air ditunjukkan pada persamaan 2.6.



Nilai hidrogen yang diproduksi pada sebuah elektrolisis dapat dihitung dengan persamaan 2.7

$$m_{h_2} = \eta_F \left( \frac{nI}{F} \right) \quad (2.7)$$

Keterangan :

$m_{h_2}$  : kecepatan produksi hidrogen (mol/s)

$\eta_F$  : efisiensi Faraday

N : banyaknya cell yang terhubung seri

I : arus yang menuju *electrolyzer* (A)

F : konstanta Faraday (96.485 C/mol)

### 2.2.2 Tabung Hidrogen

Tabung hidrogen adalah tempat untuk menampung hidrogen yang telah diproduksi oleh *electrolyzer*. Tabung ini digunakan sebagai media penyimpanan agar tidak ada daya yang terbuang percuma pada sistem. Berdasarkan pada hukum ideal gas, persamaan gas ideal ditunjukkan pada persamaan 2.8.

$$P \times V = n \times R \times T \quad (2.8)$$

Besarnya volume hidrogen didapat dengan persamaan 2.9.

$$V = \frac{nRT}{P} \quad (2.9)$$

Keterangan :

P : tekanan di dalam tabung (atm)

n : banyaknya mol (mol)

R : konstanta gas (0.082 L atm K<sup>-1</sup> mol<sup>-1</sup>)

T : suhu gas (Kelvin)

V : volume gas (liter)

## 2.3 Perangkat Lunak Matlab

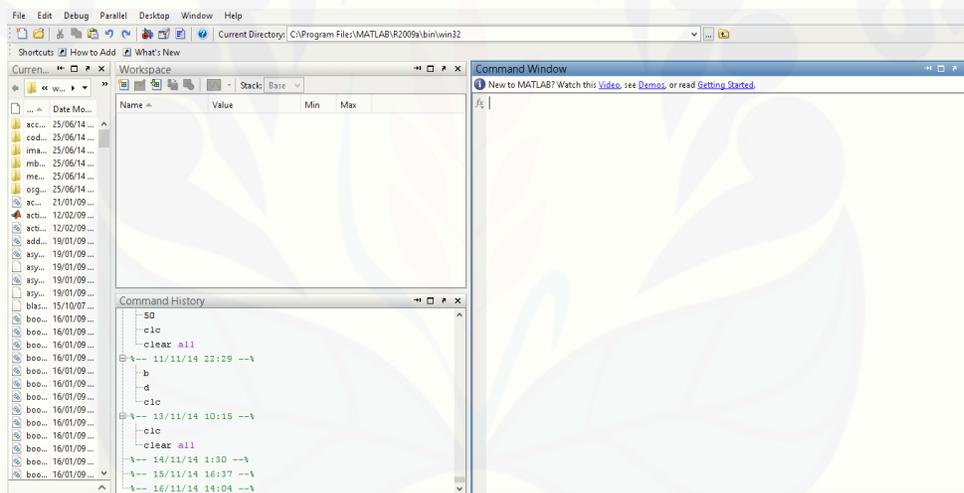
Penelitian ini menggunakan sistem pemodelan yang disusun menggunakan bantuan *software* matlab. Matlab adalah sebuah bahasa pemrograman dengan

kemampuan tinggi untuk komputasi teknis. Matlab menggabungkan komputasi, visualisasi, dan pemrograman dalam satu kesatuan yang mudah digunakan.

Pemakaiannya meliputi beberapa bidang sebagai berikut :

- a. Matematika dan komputasi.
- b. Pengembangan algoritma.
- c. Akuisisi data.
- d. Pemodelan, simulasi, dan prototipe.
- e. Perluasan pemakaian seperti *Graphical User Interface* (GUI)

Matlab adalah sistem interaktif yang mempunyai basis data *array* yang tidak membutuhkan dimensi. Hal ini memungkinkan untuk menyelesaikan berbagai masalah komputasi teknis, khususnya yang berkaitan dengan formulasi matrik dan vektor.



Gambar 2.9 Tampilan Program Matlab

### BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN

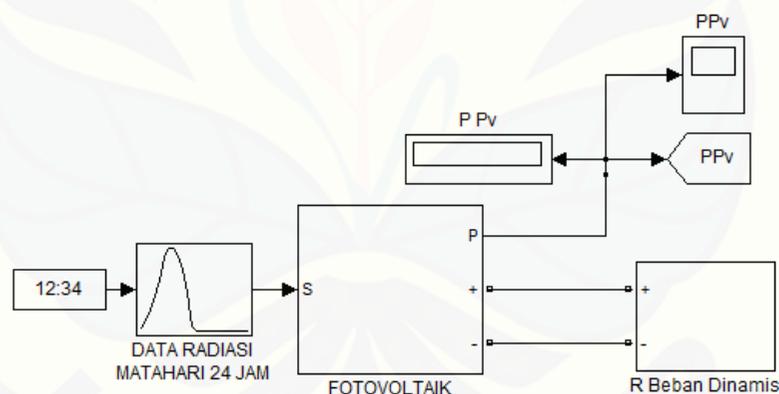
Pada bab tiga ini dijelaskan mengenai beberapa metodologi peneliti dalam melakukan penelitian ini agar tidak terjadi beberapa kerancuan dalam melakukan penelitian.

#### 3.1 Bagian – Bagian Simulasi Sistem Pada MATLAB

Dalam sistem simulasi ini terdapat beberapa sistem yang akan dibuat dalam bentuk simulasi yaitu :

##### 3.1.1 Pemodelan Fotovoltaik

Pemodelan fotovoltaik menggunakan data model fotovoltaik 500 Wp. Modul disusun sebanyak 25 buah secara paralel. Model fotovoltaik yang ditunjukkan pada Gambar 3.1. Masukkan dari model fotovoltaik tersebut adalah nilai radiasi matahari yang diukur di kawasan Watu Ulo Kabupaten Jember.



Gambar 3.1 Model Utama Fotovoltaik

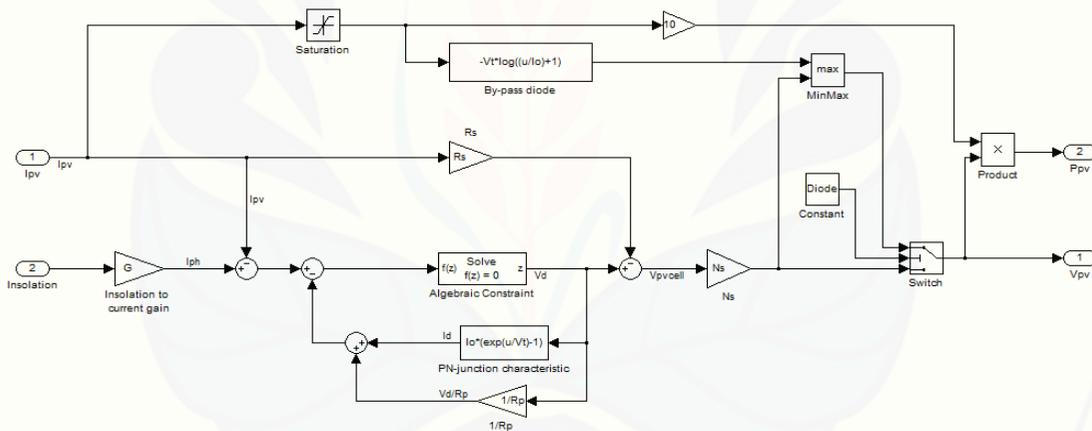
Fotovoltaik yang ditunjukkan pada Gambar 3.1 dimodelkan menggunakan beberapa parameter. Pada penelitian ini digunakan parameter radiasi sinar matahari. Fotovoltaik ini dianggap dalam keadaan ideal secara konstan (tidak

memperhitungkan parameter lain seperti suhu udara). Parameter elektrik dari fotovoltaik yang digunakan pada penelitian ini tertuang pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Spesifikasi Elektrik

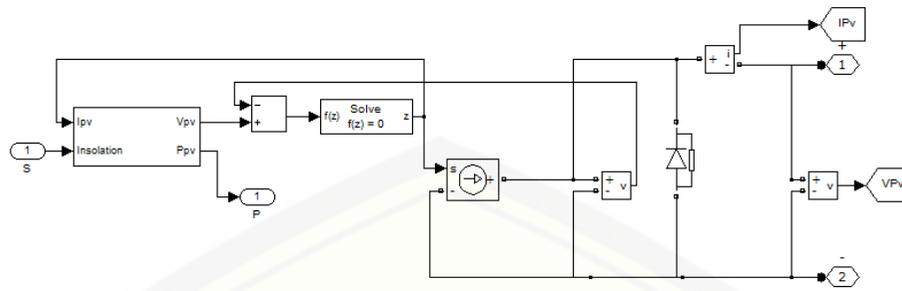
No	Parameter	Nilai
1	Daya puncak	500 Wp
2	Jumlah sel	126 sel
3	Tegangan pada Daya Maksimum	63.3 V
4	Arus pada Daya Maksimum	7.9 A
5	Tegangan Hubung Terbuka	79.5 V
6	Arus Hubung Singkat	8.5 A

Fotovoltaik pada penelitian ini menggunakan modul fotovoltaik 500 Wp yang disusun paralel dengan memasukkan nilai intensitas radiasi matahari yang berubah – ubah. Fotovoltaik yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Subsistem Bagian pada Fotovoltaik

Gambar 3.2 masih belum dijadikan blok *Simpower*. Blok *Simpower* dibutuhkan agar sistem dapat dihubungkan dengan berbagai macam blok yang ada pada *simpower* misal, resistor dan baterai. Gambar 3.3 adalah model subsistem fotovoltaik yang diubah kedalam bentuk *simpower*.



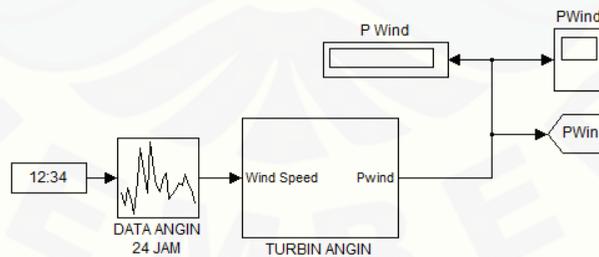
Gambar 3.3 Model *Simpower* Blok Fotovoltaik

### 3.1.2 Pemodelan Turbin Angin

Pada Penelitian ini, pemodelan turbin angin menggunakan mengacu pada jurnal milik MJ Khan yaitu menggunakan sebuah fungsi alih dalam memodelkan turbin angin *Permanent Magnet Synchronous Generator* (PMSG) (MJ Khan, 2005). Dalam jurnal tersebut dijelaskan bahwa fungsi alih sistem PMSG ditunjukkan pada persamaan 3.1.

$$\frac{y(s)}{x(s)} = \frac{0.25}{s^2 + 0.7s + 0.25} \quad (3.1)$$

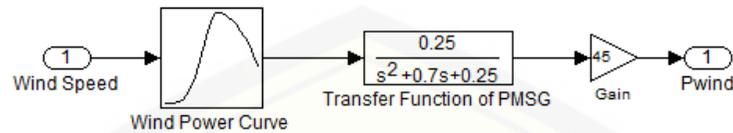
Pemodelan turbin angin ini menggunakan spesifikasi turbin angin 500 W. Model yang digunakan menggunakan masukan berupa data angin di kawasan Watu Ulo Kabupaten Jember yang diambil dari penelitian sebelumnya yaitu Novitasari tahun 2014. Keluarannya model berupa daya turbin angin seperti yang dijelaskan pada Gambar 3.4



Gambar 3.4 Model Turbin Angin

Model turbin angin pada Gambar 3.4 memiliki sebuah subsistem didalamnya. Subsistem ini terdiri dari kurva daya turbin angin dan fungsi alih. Kurva daya yang

digunakan pada penelitian ini didasarkan pada kurva daya turbin angin 500 W. Adapun model subsistem dari Gambar 3.4 telah dijabarkan pada Gambar 3.5.



Gambar 3.5 Subsistem Model Turbin Angin

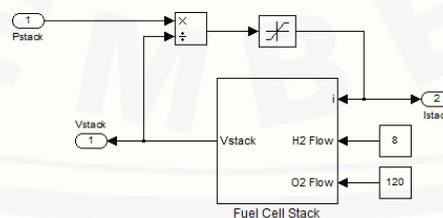
Model turbin angin 500 W memiliki beberapa spesifikasi umum, dalam penelitian ini menggunakan spesifikasi turbin angin ECO – 500 W seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Spesifikasi Turbin Angin ECO - 500 W

No	Parameter	Nilai
1	<i>Rated Power Output</i>	500 W
2	<i>Rated Wind Speed</i>	8 m/s
3	<i>Start-up Wind Speed</i>	2.5 m/s
4	<i>Generator</i>	<i>Permanent Magnet</i>
5	<i>Rated Rotate Speed</i>	480 rpm

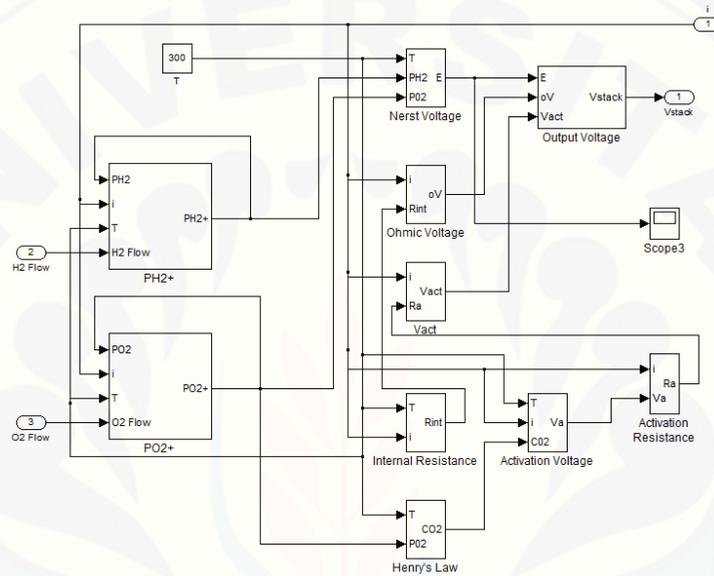
### 3.1.3 Model *Fuel Cell*

Pemodelan *fuel cell* pada penelitian ini menggunakan perhitungan matematis. Blok model simulinknya dijelaskan pada Gambar 3.6. Masukkan sistem berupa daya yang kurang dalam mensuplai beban (*lack power*), aliran gas hidrogen dan oksigen dalam satuan SLPM (*Standart Liter Per Minute*). Aliran gas dibuat konstan 8 lpm untuk gas hidrogen dan 120 lpm untuk oksigen. Nilai dari tegangan dan arus *fuel cell* bergantung pada besar daya *fuel cell*.



Gambar 3.6 Model *Fuel cell*

Model *fuel cell* pada Gambar 3.6 memiliki tiga buah masukan yaitu arus *fuel cell*, aliran hidrogen ( $H_2$  flow), dan aliran oksigen ( $O_2$  Flow), dengan keterangan bahwa arus *fuel cell* didapatkan dari pembagian antara daya *fuel cell* dengan tegangan *fuel cell*. Tegangan dan arus *fuel cell* dipengaruhi oleh tiga parameter yaitu, daya *fuel cell*, aliran hidrogen ( $H_2$  flow), dan aliran oksigen ( $O_2$  Flow). Adapun sistem dari *fuel cell* pada Gambar 3.6 dijelaskan pada Gambar 3.7.



Gambar 3.7 Subsistem Model *Fuel Cell*

Sistem *fuel cell* tersebut menggunakan metode perhitungan matematis yang dijelaskan pada bab dua yang terdiri dari tekanan gas hidrogen, tekanan gas oksigen, *nerst voltage*, *ohmic voltage*, *activation voltage*, *internal resistance*, *pressure of CO<sub>2</sub>*, *activation resistance* dan *temperature fuel cell*. Persamaan tersebut dapat dituliskan menjadi persamaan 3.2 – 3.10. (Zehra Ural, 2007)

Tekanan gas hidrogen pada *fuel cell*

$$\frac{V_a}{RT} \frac{dP_{H_2}}{dt} = m_{H_2in} - m_{H_2out} - \frac{i}{2F} \quad (3.2)$$

Tekanan gas oksigen pada *fuel cell*

$$\frac{V_c}{RT} \frac{dP_{O_2}}{dt} = m_{O_2.in} - m_{O_2.out} - \frac{i}{4F} \quad (3.3)$$

Tegangan *Ohmic*

$$\eta_{ohmic} = -iR_{int} \quad (3.4)$$

Konsentrasi kelarutan gas oksigen menjadi karbondioksida

$$CO_2 = \frac{PO_2}{(5.08 \times 10^6 \exp(-498/T))} \quad (3.5)$$

Tegangan lebih akibat aktivasi

$$\eta_{act} = -0.951 + 0.00312T - 0.000187T \ln(i) + 7.4 \times 10^{-5}T \ln(CO_2) \quad (3.6)$$

Teristansi Internal *Fuel Cell*

$$R_{int} = 0.01605 - 3.5 \times 10^{-5} + 8 \times 10^{-5}i \quad (3.7)$$

Persamaan Nerst

$$E = 1.229 - 0.85 \times 10^{-3}(T - 298.15) + 4.308 \times 10^{-5}T(\ln P_{H_2} + 0.5 \ln P_{O_2}) \quad (3.8)$$

Tegangan Aktivasi

$$\frac{dv_{act}}{dt} = i / C - v_{act} / R_a C \quad (3.9)$$

Tegangan Total Stack

$$V_{Stack} = 65V_{cell} \quad (3.10)$$

Keterangan

$V_a$  : Volume Anoda (Liter)

$V_c$  : Volume Katoda (Liter)

$R$  : Konstanta Gas Universal [L atm / (mol K)]

$T$  : Suhu *Fuel Cell* (Kelvin)

$F$  : Konstanta Faraday (96465 C/mol)

$i$  : Arus *Fuel Cell* (A)

$P_{O_2}$  : Tekanan Gas Oksigen (atm)

$P_{H_2}$  : Tekanan Gas Hidrogen (atm)

$E$  : Persamaan Nerst

#### 3.1.4 Pemodelan *Electrolyzer*

*Electrolyzer* adalah alat yang dapat mengubah arus listrik menjadi gas hydrogen. Gas hidrogen tersebut disimpan kedalam tabung hidrogen. Arus listrik yang mengalir kedalam *electrolyzer* akan dikonversi menjadi molekul hidrogen dalam satuan mol/s. Model *electrolyzer* ditunjukkan pada Gambar 3.8. Persamaan matematis yang *electrolyzer* ditunjukkan pada persamaan 3.11 dan 3.12 (Tourkia Lajnef *et al*, 2013).

Efisiensi Faraday

$$n_F = 96.5e^{(0.09/i_e - 75.5/i_e^2)} \quad (3.11)$$

Jumlah gas hidrogen yang diproduksi dalam satuan mol/s

$$n_{H_2} = \frac{\eta_F \eta_C i_e}{2F} \quad (3.12)$$

Keterangan

$i_e$  : Arus *electrolyzer* (A)

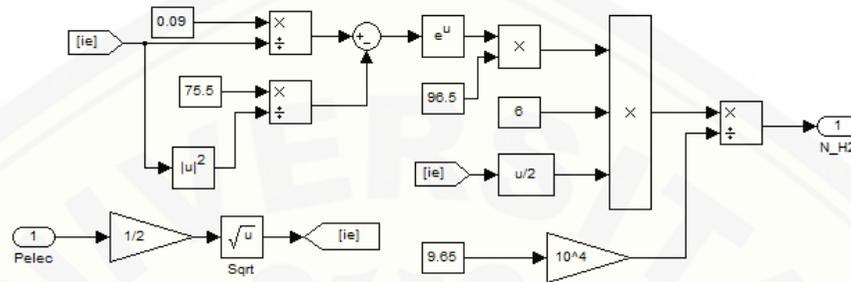
$n_F$  : Faraday Efisiensi

$n_{H_2}$  : Produksi Hidrogen (mol/s)

$n_C$  : Jumlah sel seri pada *electrolyzer*

$F$  : Konstanta Faraday (C/mol)

Fungsi matematis pada persamaan 3.11 dan 3.12 dapat dijadikan model *electrolyzer*. Model *electrolyzer* ditunjukkan pada Gambar 3.8. Daya *electrolyzer* yang dikonversi untuk mendapatkan arusnya ( $R_{beban} = 2\Omega$ ) dan keluaran berupa aliran produksi gas  $H_2$  (mol/s)



Gambar 3.8 Model *Electrolyzer*

### 3.1.5 Pemodelan Tabung Hidrogen

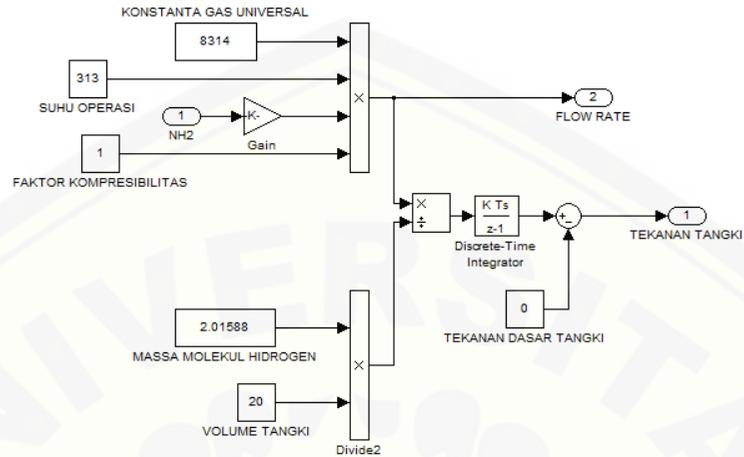
Tabung hidrogen adalah sebuah tabung penyimpanan hidrogen yang menyimpan gas hidrogen yang telah dikonversi oleh *electrolyzer* (Tourkia Lajnef *et al*, 2013).

$$P_b - P_{bi} = z \frac{N_{H_2} RT_b}{M_{H_2} V_b} \tag{3.13}$$

Keterangan

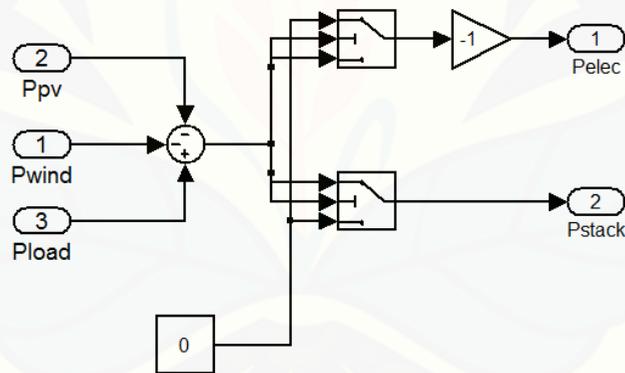
- $P_b$  : Tekanan Tangki Hirdogen (Pascal)
- $P_{bi}$  : Tekanan Dasar Tangki Penyimpanan Hidrogen (Pascal)
- $N_{H_2}$  : Jumlah Mol yang Disalurkan ke Tangki Penyimpanan (Kmol/s)
- $M_{H_2}$  : Massa Molar Hidrogen (Kg Kmol<sup>-1</sup>)
- $R$  : Konstanta Gas Universal [j/(kmol K)]
- $T_b$  : Suhu Operasi (Kelvin)
- $V_b$  : Volume Tangki Hidrogen (m<sup>3</sup>)
- $z$  : Faktor Kompresibilitas

Pemodelan tabung hidrogen kedalam blok simulink ditunjukkan pada Gambar 3.9. Keluaran tabung adalah *fuel flow rate* dan tekanan pada tangki tabung.



Gambar 3.9 Model Tabung Hidrogen

### 3.1.6 Pemodelan Kontrol



Gambar 3.10 Model Sistem Kontrol

Pemodelan kontrol menggunakan saklar biasa. Ketika hasil pengurangan antara nilai *generation*/pembangkitan dan nilai beban bernilai positif, maka daya mengalir ke daya *fuel cell*. Ketika hasil pengurangan *generation*/pembangkitan bernilai negatif, maka daya tersebut adalah daya sisa yang mengalir ke *electrolyzer*.

Proses logika penyaklaran pada sistem kontrol ditunjukkan pada Gambar 3.10. Proses ini dapat dijelaskan lebih mudah menggunakan Tabel 3.3.

Tabel 3.3 Logika Sistem Penyaklaran

No	Kondisi	Keterangan
1	$(PP_v + P_{Wind}) > P_{load}$	Daya sisa ( <i>excess power</i> ) dialirkan menuju <i>electrolyzer</i> untuk disimpan dalam bentuk $H_2$
2	$(PP_v + P_{Wind}) < P_{load}$	Daya <i>fuel cell</i> aktif untuk mensuplai besar daya yang kurang pada sistem ( <i>lack power</i> )

Seperti yang telah dijelaskan, bahwa pada sistem kontrol ini terdapat dua buah kondisi yaitu  $P_G > P_L$  dan  $P_G < P_L$ , dengan hasil daya yang disalurkan ke *electrolyzer* atau daya *fuel cell* yang aktif.

### 3.1.7 Data Pembebanan

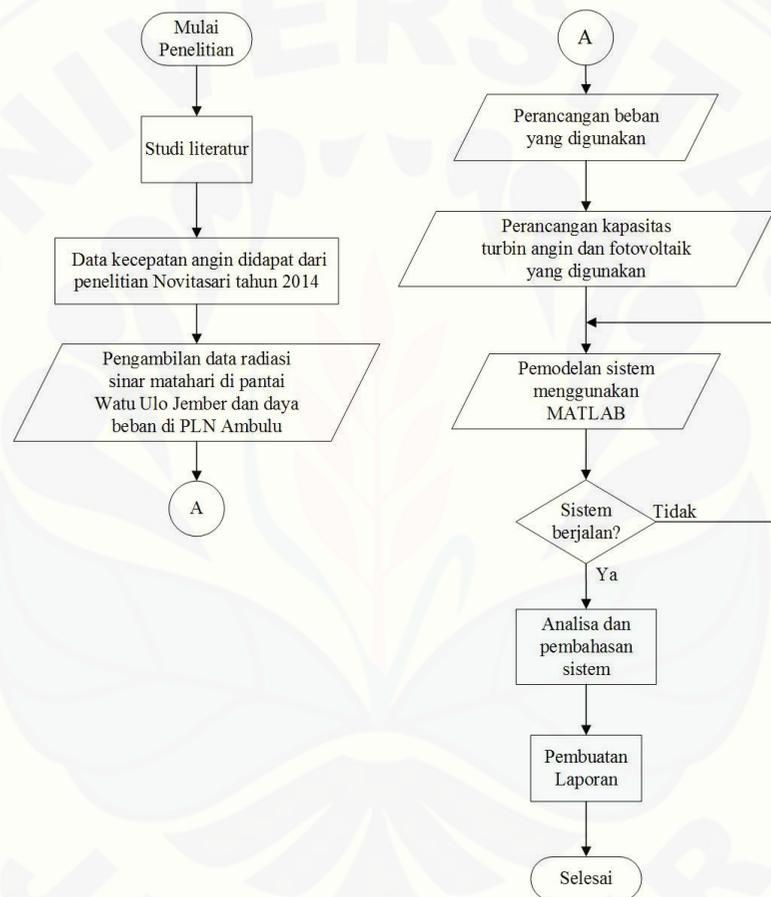
Pembebanan yang digunakan pada penelitian ini mengacu pada data yang diperoleh di Pembangkit Listrik Negara (PLN) Jember Unit Ambulu. Data beban yang didapatkan pada daerah kawasan Watu Ulo ditunjukkan pada Tabel 3.4.

Tabel 3.4 Data Pembebanan (Sumber : PLN Jember Unit Ambulu, 2015)

Parameter	Nilai
No GTT	GE151
Alamat	Desa Papuma – Watu Ulo
Unit	Ambulu
Gardu Induk	Jember
Penyulang	Watu Ulo
Section	VII
Daya Mampu Trafo	40 Kva
Merk	Starlite
Fasa	3 $\phi$
Tegangan Fase RST	201 V
Cos $\phi$	0.8
Daya Beban Fase R	6.03 kVA
Daya Beban Fase S	3.618 kVA
Daya Beban Fase T	12.06 kVA

### 3.2 Diagram Alir Penelitian

Penelitian dimulai adanya sebuah studi literatur mengenai hal yang menjadi objek penelitian, hingga menjadi sebuah laporan penelitian yang baik dan benar. Oleh karena itu perlu disusun sebuah diagram alir (*flowchart*) untuk memudahkan peneliti dalam mengambil setiap langkah dalam penelitian. *Flowchart* penelitian tersebut akan ditampilkan dan dijelaskan pada gambar 3.11.



Gambar 3.11 Diagram Alir Penelitian

Dalam melaksanakan penelitian ini terdapat beberapa tahapan utama yang harus dilalui yaitu :

1. Dimulai dari awal yaitu memulai untuk merencanakan penelitian ini pada tahapan mulai penelitian.

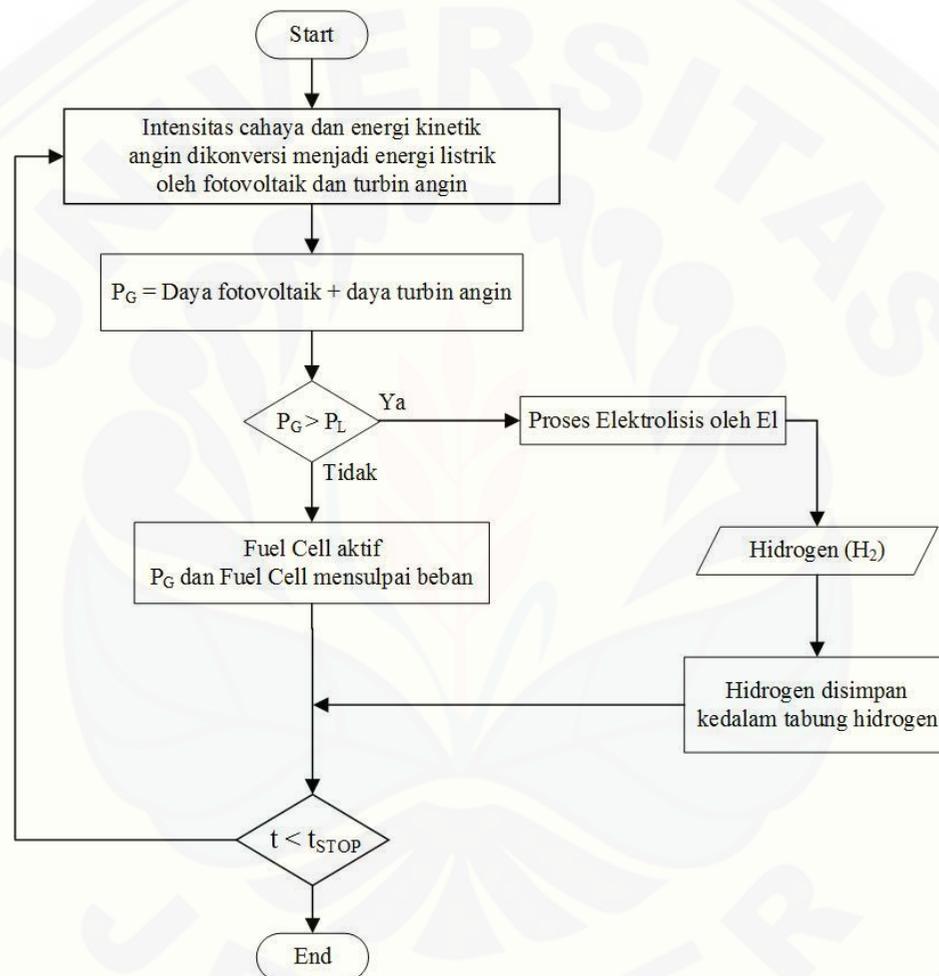
2. Studi literatur pada tahap selanjutnya guna mendapatkan informasi – informasi penting yang mendukung penelitian ini.
3. Mengambil data kecepatan angin dari penelitian Novitasari tahun 2014 yang berjudul “Optimalisasi Daya Output Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Angin Menggunakan Permanent Magnet Synchronous Generator Berbasis Neural Network”
4. Pengambilan data radiasi sinar matahari di pantai Watu Ulo Jember dan data pembebanan kawasan Watu Ulo Jember di PLN Ambulu, Jember.
5. Perancangan beban dengan data – data yang telah didapatkan sebelumnya di PLN Ambulu, Jember.
6. Merancang besar kapasitas daya turbin angin dan fotovoltaik yang akan digunakan.
7. Pemodelan sistem yang ada pada MATLAB R2010a menggunakan *Simulink library browser*.
8. Setelah simulasi dapat bekerja sesuai dengan sistem maka dilakukanlah analisa mengenai sistem tersebut.
9. Pembuatan laporan dilakukan setelah analisa telah didapatkan dan penelitian berakhir setelah laporan telah terbentuk.

### **3.3 Diagram Alir Sistem Hibrida Turbin Angin, Fotovoltaik, dan *Fuel Cell***

Penelitian ini menggunakan beberapa konsep sistem didalamnya. Untuk menjelaskan secara detail disusunlah diagram alir sistem secara keseluruhan yang dijelaskan pada Gambar 3.12. penjelasan diagram alir adalah sebagai berikut :

1. Awal penelitian dimana intensitas matahari dan energi kinetik angin akan dikonversi menjadi daya listrik oleh fotovoltaik dan turbin angin.
2. Daya yang dibangkitkan akan dijumlahkan sehingga menjadi satu kesatuan yaitu  $P_G$ .

3. Jika daya  $P_G$  lebih besar dari daya beban, maka terjadi daya sisa yang terbuang, dalam hal ini daya tersebut dimasukkan ke dalam *electrolyzer* (*electolyzer* aktif) sehingga daya electrolyzer muncul serta memproduksi gas hidrogen.
4. Jika daya  $P_G$  lebih kecil dari daya beban maka otomatis fuel cell akan aktif mensuplai kekurangan kebutuhan daya pembangkitan sehingga  $P_G + \text{daya fuel cell} = \text{daya beban}$  pada sistem.



Gambar 3.12 Diagram Alir Sistem

Keterangan :

$P_G$  : *Power Generation* (daya turbin angin ditambah dengan fotovoltaik)

$P_L$  : Daya beban

El : *Electrolyzer*

## BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Pengujian Pembebanan

Dalam penelitian ini menggunakan dua buah jenis pembebanan yaitu beban secara nyata dengan beban puncak pada malam hari dan beban yang telah dimodifikasi sendiri.

#### 4.1.1 Beban Nyata

Pembebanan nyata yang dilakukan pada penelitian ini adalah menggunakan data yang didapat di PLN Jember Unit Ambulu. Data ditunjukkan pada Tabel 3.4. data beban yang akan digunakan pada sistem ini seperti yang ada pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Tabel Daya Per Fase (Sumber : PLN Jember Unit Ambulu, 2015)

No	Fase	Daya Beban ( KW)
1	R	6.03
2	S	3.61
3	T	12.06
Total Beban		<b>21.078</b>

Pada Tabel 4.1 adalah daya yang dibutuhkan untuk kawasan Watu Ulo. Total beban yang dibutuhkan untuk kawasan Watu Ulo Jember adalah sebesar 22 KW

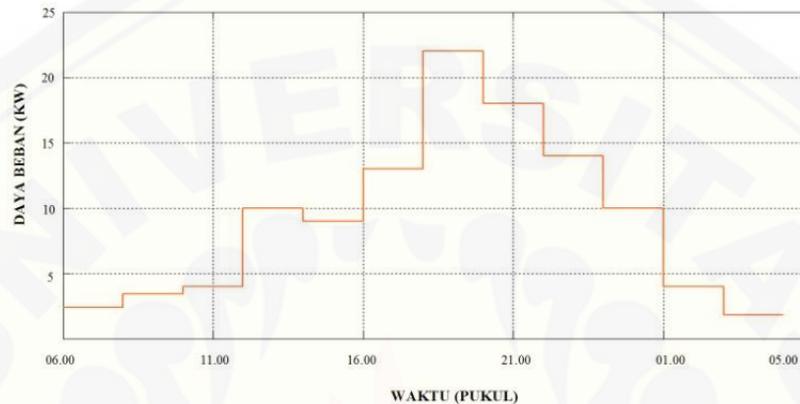
Tabel 4.2 Data Beban Nyata

No	Waktu	Beban (KW)	No	Waktu	Beban (KW)
1	06.00 – 08.00	2.4	7	18.00 – 20.00	22
2	08.00 – 10.00	3.4	8	20.00 – 22.00	18
3	10.00 – 12.00	4	9	22.00 – 24.00	14
4	12.00 – 14.00	10	10	24.00 – 02.00	10
5	14.00 – 16.00	9	11	02.00 – 04.00	4
6	16.00 – 18.00	13	12	04.00 – 06.00	1.8

Dapat dilihat pada Gambar 4.2 bahwa daya beban yang terjadi selalu mengalami kenaikan tiap jamnya. Beban puncak terjadi pada jam malam saat semua

alat kelistrikan hampir seluruhnya digunakan (22 KW sebagai beban puncak). Sumber EBT akan menyuplai beban ini secara bergantian maupun secara hidrida (bersama – sama).

Data pembebanan yang digambarkan secara grafik adalah sebagai berikut ini :



Gambar 4.1 Grafik Daya Beban Nyata

#### 4.1.2 Beban Rancangan

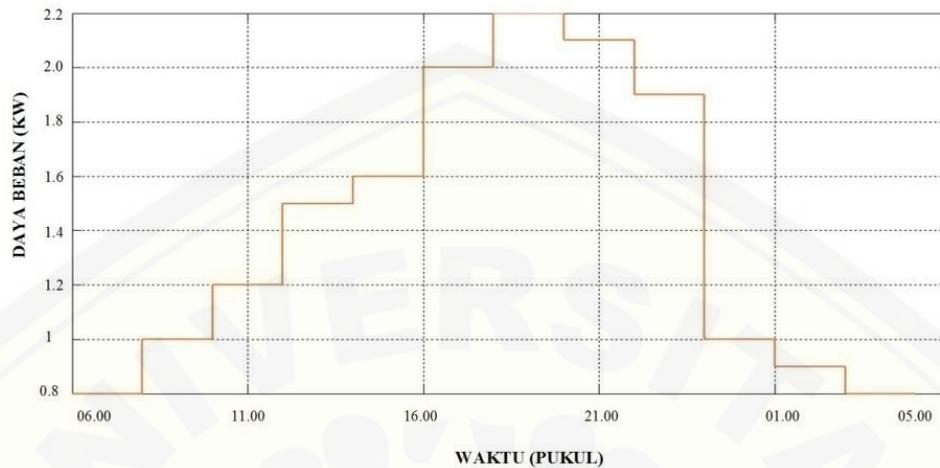
Beban rancangan adalah beban yang ditentukan sendiri dengan memperhatikan beban yang ada pada Tabel 4.1. Kawasan Watu Ulo diproyeksikan sebagai tempat industri dalam beberapa tahun kedepan sehingga beban yang diperlukan kawasan tersebut cenderung tinggi sepanjang hari.

Pada Tabel 4.2 dijelaskan mengenai rancangan beban yang terjadi di kawasan Watu Ulo.

Tabel 4.3 Data Beban Rancangan

No	Waktu	Beban (KW)	No	Waktu	Beban (KW)
1	06.00 – 08.00	8	7	18.00 – 20.00	22
2	08.00 – 10.00	10	8	20.00 – 22.00	21
3	10.00 – 12.00	12	9	22.00 – 24.00	19
4	12.00 – 14.00	15	10	24.00 – 02.00	10
5	14.00 – 16.00	16	11	02.00 – 04.00	9
6	16.00 – 18.00	20	12	04.00 – 06.00	8

Tabel 4.3 jika digambarkan kedalam bentuk grafik menjadi seperti Gambar 4.2.



Gambar 4.2 Grafik Daya Beban Rancangan

## 4.2 Penentuan Kapasitas Pembangkitan

Pembangkit yang digunakan pada penelitian ini menggunakan sumber EBT, yaitu fotovoltaik, turbin angin dan *fuel cell*. Pada penelitian ini akan dirancang empat skenario yang akan mensuplai sistem. Beberapa skenario pengujian tersebut digunakan mengetahui manajemen daya pada setiap skenario yang ada.

Berdasarkan hal itu maka disusunlah beberapa skenario pengujian dalam penelitian ini yaitu:

### 4.2.1 Skenario I – Pengujian Sistem Hibrida Turbin Angin dan *Fuel Cell*

Turbin angin dan *fuel cell* mensuplai beban nyata pada kawasan Watu Ulo Jember. Beban dengan nilai puncak sebesar 22 KW dengan data seperti pada Table 4.2. Turbin angin menggunakan turbin angin dengan kapasitas 500 W yang diparalel sebanyak 45 buah agar menghasilkan 22.5 KW. *Fuel cell* digunakan jika terdapat kurang daya (*lack power*) pada sistem.

### 4.2.2 Skenario II – Pengujian Sistem Hibrida Fotonvoltaik dan *Fuel Cell*

Fotonvoltaik dan *fuel cell* mensuplai beban nyata pada kawasan Watu Ulo Jember. Beban dengan nilai puncak sebesar 22 KW dengan data seperti pada

Table 4.2. Fotovoltaik menggunakan kapasitas 500 Wp yang diparalel sebanyak 45 buah agar menghasilkan 22.5 KW. *Fuel cell* digunakan jika terdapat kurang daya (*lack power*) pada sistem.

#### 4.2.3 Skenario III – Pengujian Sistem Hibrida Turbin Angin, Fotovoltaik, dan Fuel Cell (Beban Nyata)

Skenario ketiga adalah ketika sumber EBT turbin angin, fotovoltaik dan *fuel cell* mensuplai beban nyata pada kawasan Watu Ulo Jember. Beban dengan nilai puncak sebesar 22 KW dengan data seperti pada Table 4.2. Turbin angin mensuplai sebanyak 80% dari puncak yaitu sebesar 17 KW dengan memparalel turbin angin 500 W sebanyak 36 buah. Fotovoltaik mensuplai kekurangan 20% total beban menjadi 4.4 KW, sehingga dibutuhkan fotovoltaik 500 Wp sebanyak 9 buah. *Fuel cell* digunakan jika terdapat kurang daya (*lack power*) pada sistem.

#### 4.2.4 Skenario IV – Pengujian Sistem Hibrida Turbin Angin, Fotovoltaik, dan Fuel Cell (Beban Rancangan)

Skenario keempat yaitu turbin angin, fotovoltaik dan *fuel cell* mensuplai beban nyata pada kawasan Watu Ulo Jember. Beban dengan nilai puncak sebesar 22 KW dengan data seperti pada Table 4.3 (beban rancangan). Turbin angin mensuplai sebanyak 80% dari puncak yaitu sebesar 17 KW dengan memparalel turbin angin 500 W sebanyak 36 buah. Fotovoltaik mensuplai kekurangan 20% total beban menjadi 4.4 KW, sehingga dibutuhkan fotovoltaik 500 Wp sebanyak 9 buah. *Fuel cell* digunakan jika terdapat kurang daya (*lack power*) pada sistem.

### 4.3 Pengukuran Iradiasi Sinar Matahari

Fotovoltaik merupakan sebuah sumber arus yang sangat bergantung dalam beberapa hal yaitu, radiasi sinar matahari, kelembapan udara sekitar, suhu udara pengukuran, posisi fotovoltaik serta jenis semikonduktor yang dipakai.

Pengukuran dilakukan pada daerah dimana data angin didapatkan yaitu berlokasi di pantai Watu Ulo Jember dengan koordinat  $8^{\circ}25'37''$  lintang selatan  $113^{\circ}32'48''$  bujur timur.



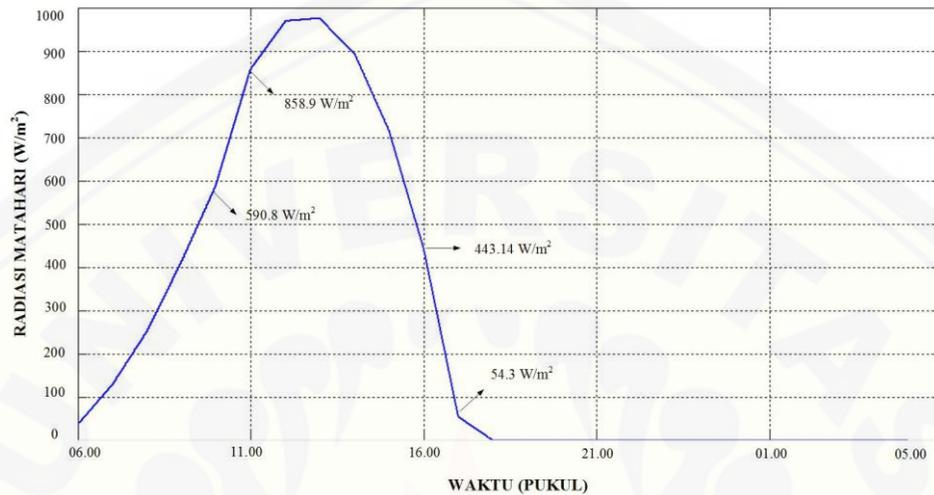
Gambar 4.3 Lokasi Pantai Watu Ulo Jember (Sumber: Google Maps)

Pengukuran radiasi matahari dilakukan dari pukul 06.00 sampai dengan pukul 18.00 WIB, dilakukan pada area pantai Watu Ulo Kecamatan Ambulu Kabupaten Jember dan didapatkan data radiasi matahari seperti yang tertera pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Data Radiasi Sinar Matahari di Pantai Watu Ulo Jember

No	Waktu	Radiasi (W/m <sup>2</sup> )	No	Waktu	Radiasi (W/m <sup>2</sup> )
1	06.00 – 07.00	36.32	9	14.00 – 15.00	893.7
2	07.00 – 08.00	128.78	10	15.00 – 16.00	714.9
3	08.00 – 09.00	252.2	11	16.00 – 17.00	443.14
4	09.00 – 10.00	413.4	12	17.00 – 18.00	54.3
5	10.00 – 11.00	590.8	13	18.00 – 19.00	0
6	11.00 – 12.00	858.9	14	19.00 – 20.00	0
7	12.00 – 13.00	968.9	15	20.00 – 21.00	0
8	13.00 – 14.00	975.4	16	21.00 – 06.00	0

Table 4.4 merupakan data radiasi matahari selama 24 jam di kawasan Watu Ulo Kabupaten Jember yang bila digambarkan secara grafik akan tampak seperti pada Gambar 4.4.



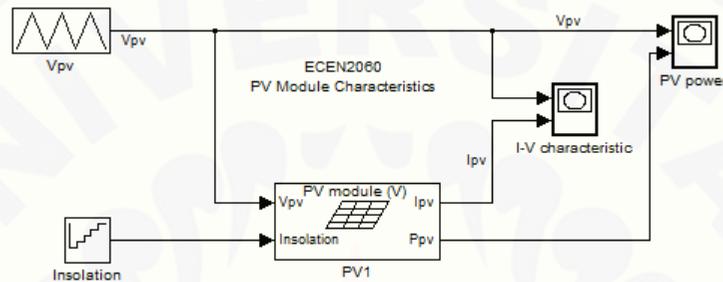
Gambar 4.4 Grafik Radiasi Sinar Matahari di Watu Ulo Jember

Gambar 4.4 telah menunjukkan pola grafik dari radiasi sinar matahari selama pencatatan. Radiasi matahari dipengaruhi beberapa parameter seperti yang telah dijelaskan sebelumnya. Dalam hal ini hanya digunakan radiasi matahari sebagai parameternya.

Radiasi sinar matahari mulai ada ketika pukul 06.00 pagi lalu naik secara hampir linier hingga pukul 11.00 siang sinar radiasi telah menunjukkan titik 590 W/m<sup>2</sup>. Titik puncak dari radiasi tersebut terjadi ketika pukul 13.00 – 14.00 siang yaitu sekitar 975.4 W/m<sup>2</sup> lalu perlahan turun sampai pukul 17.00 mencapai titik 54.3 W/m<sup>2</sup>. Tidak terdapat radiasi sinar matahari pada pukul 18.00 – 05.00 WIB. Hal inilah yang mendasari dirancangnya sebuah sistem hibrida dikarenakan pada pukul 18.00 – 05.00 tidak ada daya yang dihasilkan oleh fotovoltaik maka sebab itu dibutuhkan sumber daya dari sumber lain yang dalam penelitian ini adalah turbin angin dan *fuel cell*.

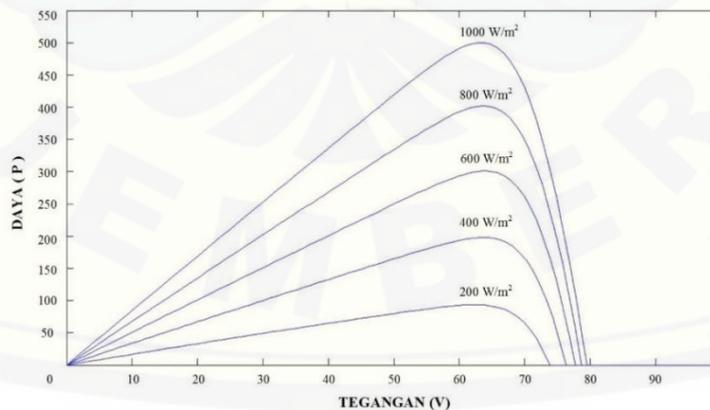
#### 4.4 Pengujian Modul Fotovoltaik

Modul fotovoltaik yang digunakan dalam penelitian ini adalah milik ECEN 2060. Modul tersebut diuji dengan memberikan nilai radiasi matahari secara berurutan yaitu 200, 400, 600, hingga 1000  $\text{W}/\text{m}^2$  untuk mengetahui grafik tegangan – arus dan grafik daya – tegangan. Pengujian modul fotovoltaik dijelaskan pada Gambar 4.5 dengan spesifikasi elektrik seperti yang tertera pada Tabel 3.1.



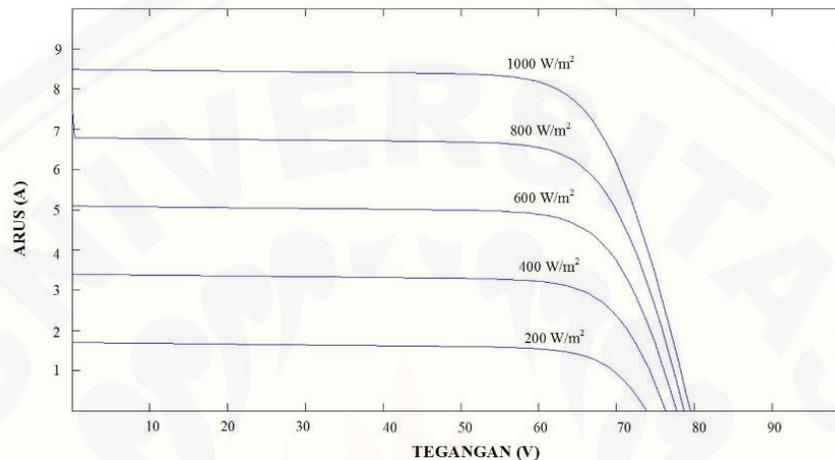
Gambar 4.5 Pengujian Fotovoltaik

Gambar 4.6 merupakan sebuah grafik daya tegangan pada fotovoltaik. Pada grafik tersebut tampak bahwa fotovoltaik dengan satu buah modul akan menghasilkan nilai 500  $\text{Wp}$  pada kondisi 1000  $\text{W}/\text{m}^2$ . Nilai Radiasi akan berpengaruh besar pada daya yang dihasilkan, hal ini terlihat saat nilai radiasi turun ke nilai 800  $\text{W}/\text{m}^2$ , nilai daya yang dihasilkan juga menurun secara drastis sedangkan nilai tegangannya cenderung konstan.



Gambar 4.6 Grafik Hubungan Daya Dengan Tegangan pada Fotovoltaik

Fotovoltaik sendiri merupakan sebuah sumber arus yang berarti radiasi matahari sangat rentan pada perubahan arus yang dihasilkan oleh fotovoltaik. Pada grafik  $1000 \text{ W/m}^2$  nilai arusnya hubung singkatnya mencapai 8.5 A namun saat radiasi  $800 \text{ W/m}^2$  nilai arusnya mengalami penurunan, yang dapat dilihat pada Gambar 4.7



Gambar 4.7 Grafik Hubungan Arus dan Tegangan pada Fotovoltaik

#### 4.5 Pengujian Turbin Angin

Turbin angin merupakan sumber EBT yang memanfaatkan sumber kinetik dari angin yang berhembus. Dalam penelitian ini, digunakan model fungsi alih untuk memodelkan turbin angin PMSG. Fungsi alih dari turbin angin PMSG adalah  $0.25/(s^2 + 0.7s + 0.25)$ . Sistem menggunakan spesifikasi dari turbin angin ECO 500W dengan nilai *cut in* 2.5 m/s, *rated speed* 8 m/s.

Data angin menggunakan data dari penelitian sebelumnya yaitu data dari Novitasari tahun 2014 yang memuat data kecepatan angin di pantaai Watu Ulo Kabupaten Jember. Data angin yang didapatkan dicatat selama 24 jam (satu hari) dikarenakan keterbatasan waktu. Tabel 4.5 menyajikan data kecepatan angin selama 24 jam yang didapatkan oleh Novitasari dalam penelitiannya. Data angin tersebut menyajikan data yang cukup menarik. Terlihat bahwa nilai angin rata – rata yang dicatat adalah kisaran 5 m/s dengan nilai angin tercepat yang tercatat adalah kisaran 10.4 m/s dan 3.2 m/s untuk kecepatan terendahnya.

Tabel 4.5 Data Kecepatan Angin di Pantai Watu Ulo (Sumber: Novitasari, 2014)

No	Waktu (WIB)	Kecepatan Angin (m/s)	No	Waktu (WIB)	Kecepatan Angin (m/s)
1	06.00 – 07.00	5.3	13	18.00 – 19.00	5.4
2	07.00 – 08.00	4.1	14	19.00 – 20.00	6.6
3	08.00 – 09.00	5.8	15	20.00 – 21.00	7.3
4	09.00 – 10.00	4.6	16	21.00 – 22.00	4.7
5	10.00 – 11.00	3.2	17	22.00 – 23.00	5.2
6	11.00 – 12.00	6.5	18	23.00 – 24.00	5.7
7	12.00 – 13.00	9.8	19	24.00 – 01.00	6.3
8	13.00 – 14.00	7.5	20	01.00 – 02.00	6.1
9	14.00 – 15.00	5.3	21	02.00 – 03.00	7.2
10	15.00 – 16.00	10.4	22	03.00 – 04.00	6.1
11	16.00 – 17.00	7.6	23	04.00 – 05.00	5.7
12	17.00 – 18.00	6	24	05.00 – 06.00	4.3

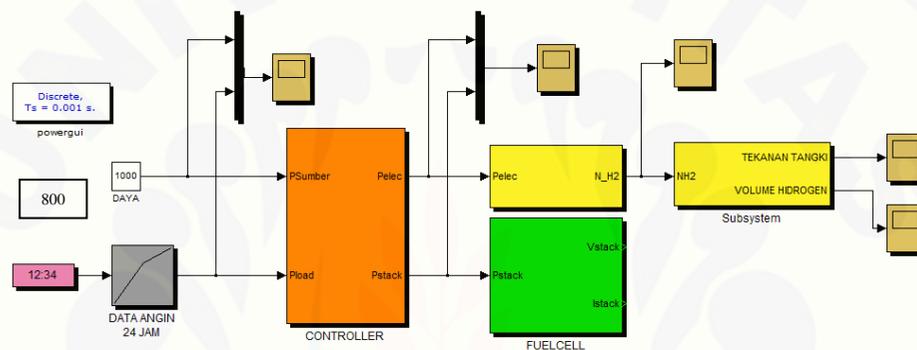
Data kecepatan angin pada Tabel 4.5 dapat dijadikan sebuah grafik agar memudahkan dalam pembacaannya. Gambar 4.8 merupakan grafik data angin pada Tabel 4.5



Gambar 4.8 Grafik Data Kecepatan Angin

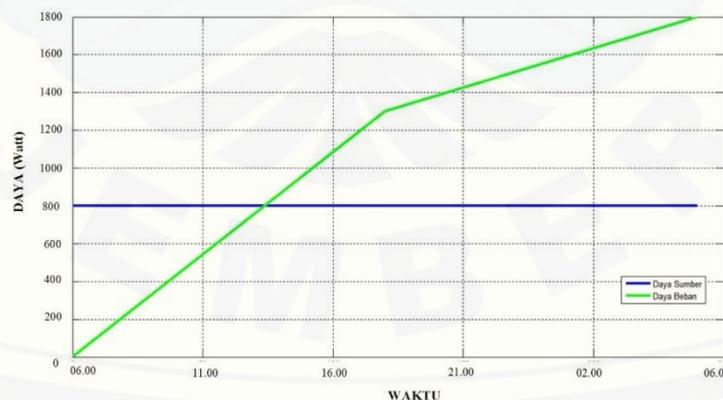
#### 4.6 Pengujian *Fuel cell*, Tabung Hidrogen dan *Elektrolyzer*

*Fuel cell* merupakan sebuah sumber energi yang sangat ramah lingkungan karena berbahan bakar gas hidrogen dan gas oksigen. *Fuel cell* mampu menjadi EBT yang patut untuk dikembangkan lagi. Sedangkan *electrolyzer* merupakan media yang dapat mengubah arus *electrolyzer* menjadi sebuah gas hidrogen yang disimpan dalam tabung hidrogen. Tabung hidrogen merupakan media penyimpanan gas hidrogen. Dalam penelitian ini tidak menggunakan *valve* (katup). Gambar pengujiannya ditunjukkan pada Gambar 4.9.



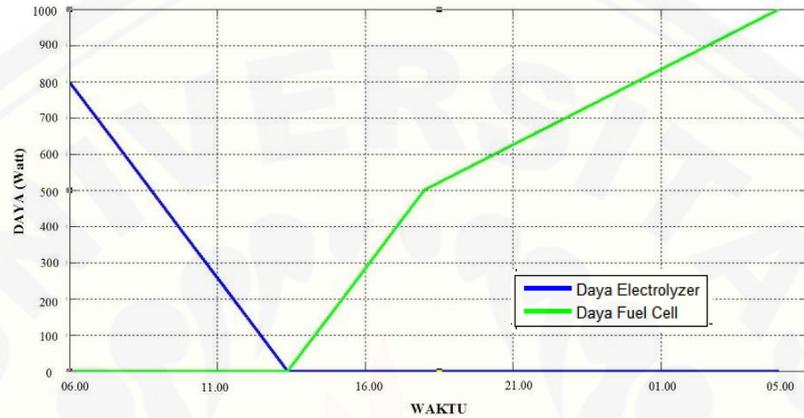
Gambar 4.9 Pengujian *Fuel cell*, Tabung Hidrogen dan *Elektrolyzer*

Pada Pengujian ini kita akan membuat sistem baru dengan daya sumber konstan 800 W dan daya beban yang berubah – ubah seperti yang digambarkan pada Gambar 4.10.



Gambar 4.10 Grafik Daya Sumber dan Daya Beban

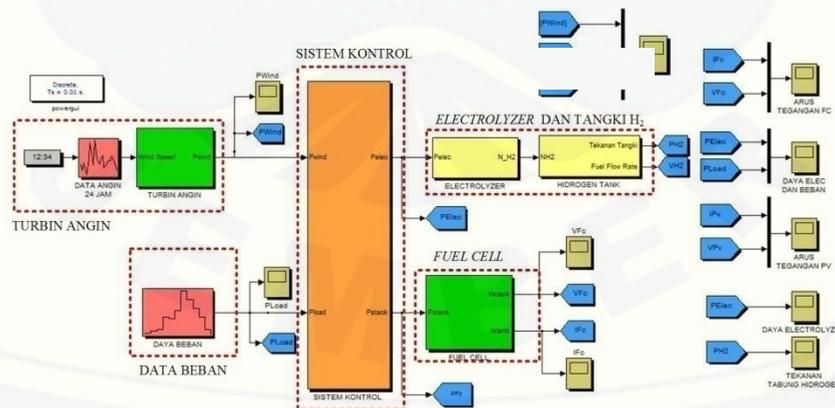
Pada pukul 06.00 - 13.30 daya sumber mampu mensuplai beban. Daya *electrolyzer* akan aktif (kelebihan daya) ketika pukul 13.30 - 05.00. Daya beban menjadi lebih besar daripada daya sumber yang masuk sehingga daya *fuel cell* akan aktif selama periode tersebut guna mensuplai kurang daya yang terjadi. Grafik daya *fuel cell* dan *electrolyzer* seperti yang dijelaskan pada Gambar 4.11.



Gambar 4.11 Grafik Daya *Electrolyzer* dan Daya *Fuel cell*

#### 4.7 Skenario I – Pengujian Sistem Hibrida Turbin Angin dan *Fuel Cell*

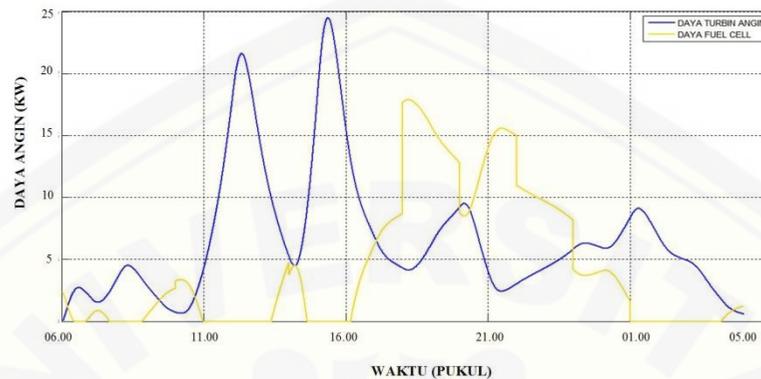
Pengujian pada sistem pertama adalah memparalel turbin angin dan *fuel cell*. Sesuai dengan skenario pertama turbin angin diparalel sebanyak 45 buah dengan nilai 500 W/buah. Blok sistemnya sistem hibrida turbin angin dan *fuel cell* ditunjukkan oleh Gambar 4.12.



Gambar 4.12 Blok Sistem Hibrida Turbin Angin dan *Fuel cell*

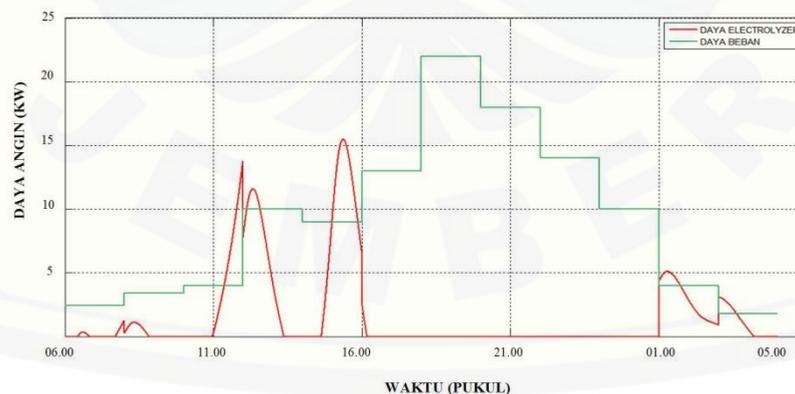
#### 4.7.1 Manajemen Daya Turbin Angin dan *Fuel Cell*

Manajemen daya yang terjadi pada Gambar 4.12 sebagaimana ditunjukkan oleh Gambar 4.13.



Gambar 4.13 Grafik Daya Turbin Angin dan *Fuel cell*

Gambar 4.13 menjelaskan manajemen daya yang terjadi pada sistem hibrida turbin angin 45 x 500 W dengan *fuel cell*. Pada kondisi pagi hari hingga siang hari turbin angin mampu mensuplai beban yang dibutuhkan secara sendiri, namun saat kondisi kecepatan angin rendah (pukul 07.00 dan 10.00 WIB) *fuel cell* aktif untuk membantu kurang daya yang terjadi pada sistem, misal pada pukul 10.00 WIB. Kondisi beban yang diminta adalah 4 KW, sedangkan turbin angin hanya mampu mensuplai sebesar 0.65 KW. Hal ini menyebabkan *fuel cell* aktif dan mensuplai daya sebesar 3.35 KW kepada sistem. Kelebihan daya pada sistem hibrid ini, dapat dilihat pada Gambar 4.14.

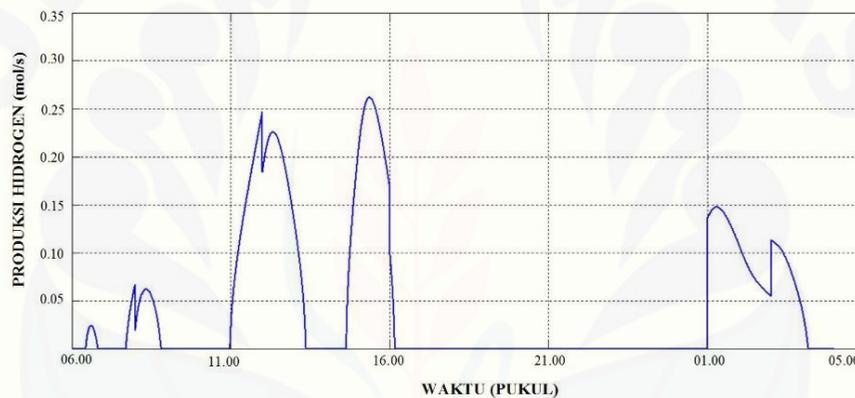


Gambar 4.14 Grafik Daya *Electrolyzer* dan Beban

Gambar 4.14 telah menerangkan bahwa terdapat daya beban dan daya sisa (*excess power*) yang masuk ke *electrolyzer*. Dalam hal ini terlihat bahwa kecepatan angin yang tinggi terjadi pada pukul 12.00 dan 15.00 WIB yaitu sebesar 9.8 dan 10.4 m/s. Hal ini menyebabkan lonjakan daya turbin angin yang besar pada waktu tersebut. Daya beban yang dibutuhkan sistem pada waktu pagi hingga sore hari cenderung dalam kategori sedang sehingga membuat adanya daya sisa. Daya sisa tersebut lalu dikonversi ke dalam bentuk gas H<sub>2</sub> melalui *electrolyzer*.

#### 4.7.2 Produksi Gas dan Tekanan Tangki Hidrogen

Setelah melewati *electrolyzer*, maka daya sisa diubah menjadi gas hidrogen, gas hidrogen yang diproduksi oleh sistem dapat ditunjukkan oleh Gambar 4.15.



Gambar 4.15 Produksi Gas Hidrogen

Produksi gas hidrogen yang terjadi selaras dengan daya *electrolyzer*. Daya sisa yang besar terjadi pada pukul 12.00 dan 15.00 WIB dan produksi gas hidrogen mampu hingga 0.25 dan 0.27 mol/s.

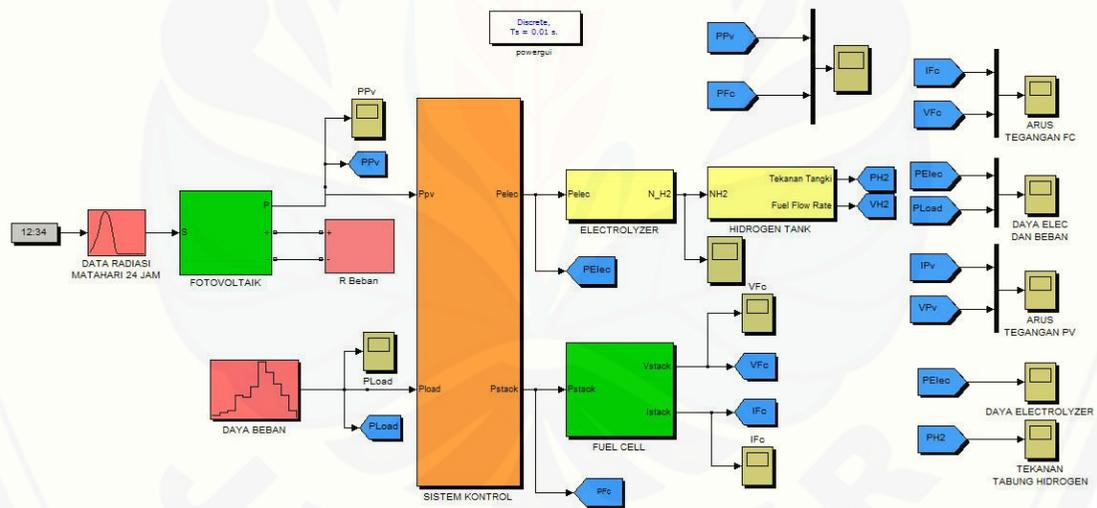
Tekanan yang terjadi pada tabung hidrogen disebabkan oleh adanya aliran gas hidrogen yang masuk ke dalam tabung, sehingga ketika *electrolyzer* terisi (kelebihan daya) maka otomatis nilai tekanan dalam tabung hidrogen tersebut akan terus naik. Hal ini ditunjukkan pada Gambar 4.16. Pada pukul 16.00 hingga 01.00 WIB cenderung konstan dikarenakan tidak adanya gas H<sub>2</sub> yang masuk ke dalam tangki dan nilai akhir tekanan tangki mencapai 650 pascal.



Gambar 4.16 Grafik Tekanan Dalam Tabung Hidrogen

#### 4.8 Skenario II – Pengujian Sistem Hibrida Fotovoltaik dan Fuel Cell

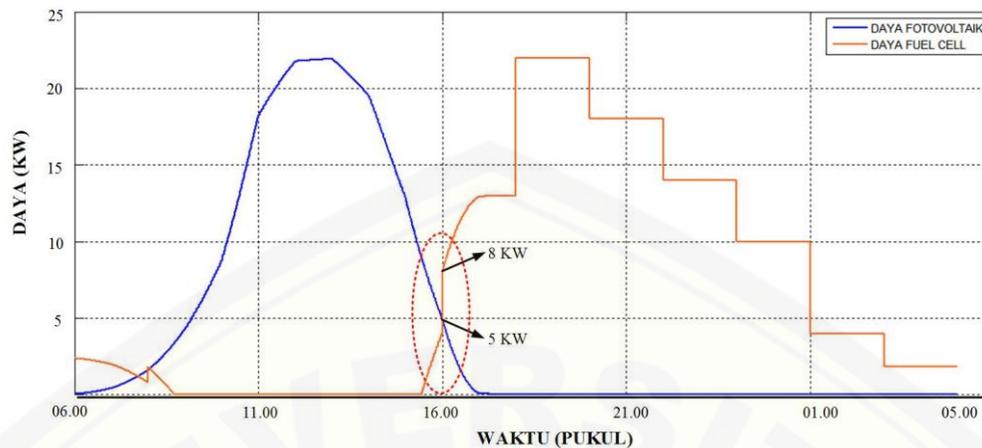
Pengujian pada sistem kedua adalah memparalel fotovoltaik dan *fuel cell*. Sesuai dengan skenario kedua, fotovoltaik diparalel sebanyak 45 buah dengan nilai 500 W/buah. Blok sistemnya sistem hibrida fotovoltaik dan *fuel cell* ditunjukkan oleh Gambar 4.17.



Gambar 4.17 Pemodelan Sistem Hibrida Fotovoltaik dan Fuel cell

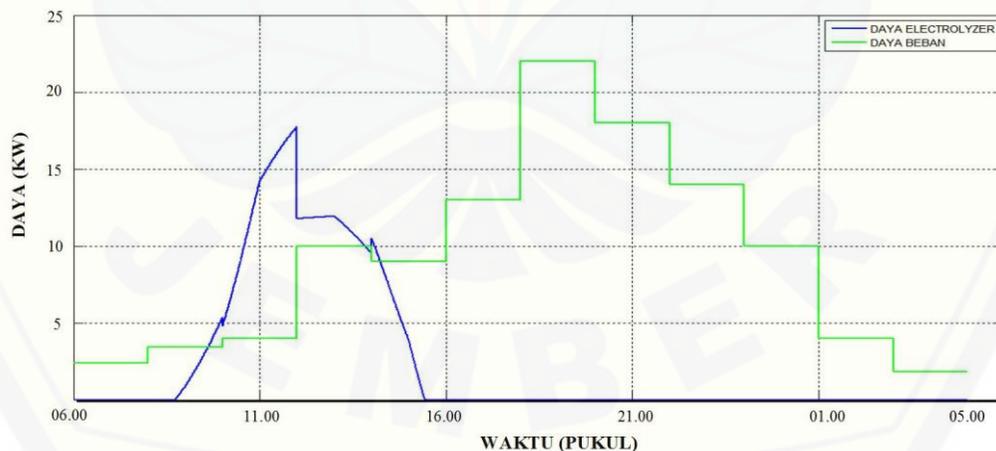
##### 4.8.1 Manajemen Daya Fotovoltaik dan Fuel Cell

Manajemen daya fotovoltaik dan *fuel cell* yang terjadi pada sistem hibrida fotovoltaik dan *fuel cell* ditunjukkan pada Gambar 4.18.



Gambar 4.18 Grafik Daya Fotovoltaik dan *Fuel cell*

Manajemen daya antara fotovoltaik dan *fuel cell* ditunjukkan dalam Gambar 4.18. Daya fotovoltaik cenderung mensuplai beban pada saat siang hari. Pada kondisi malam hari daya disuplai penuh oleh *fuel cell* dikarenakan tidak adanya radiasi sinar matahari. Pukul 06.00 hingga 08.00 WIB daya fotovoltaik masih tergolong kecil, sehingga masih *fuel cell* aktif untuk mensuplai kurang daya. Pada pukul 16.00 WIB ketika daya beban yang diminta sebesar 13 KW, daya fotovoltaik hanya mensuplai sebesar 5 KW sehingga kekurangan sebesar 8 KW harus disuplai oleh *fuel cell*. Adapun grafik hubungan daya *electrolyzer* dan beban ditunjukkan oleh Gambar 4.19.

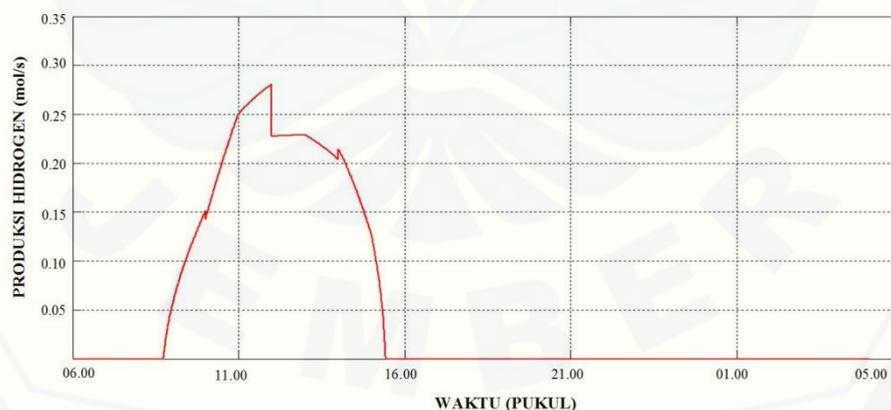


Gambar 4.19 Grafik Daya Beban dan Daya *Electrolyzer*

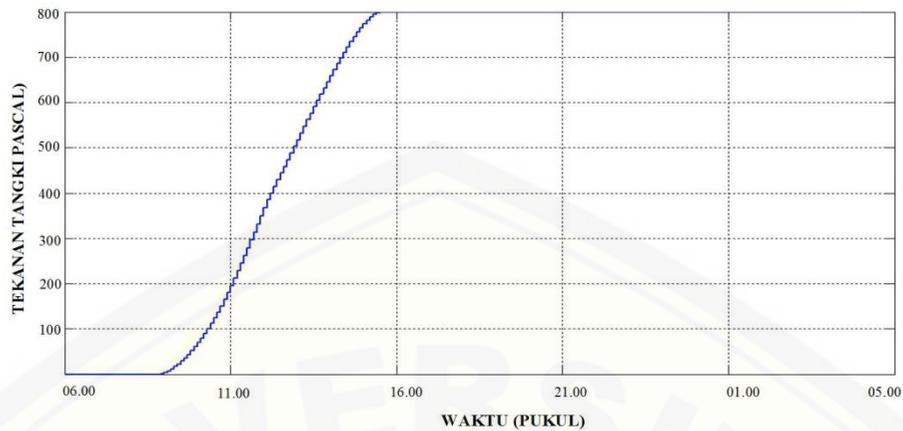
Fotovoltaik adalah sumber energi yang dapat menghasilkan daya listrik jika terdapat radiasi matahari, sehingga fotovoltaik menghasilkan daya pada saat ada sinar matahari saja (pagi hingga sore hari). Dilihat pada Gambar 4.19 ada sebuah daya sisa yang terjadi pada sistem hibrida fotovoltaik dan *fuel cell* ini terbilang besar. Contoh pada pukul 11.00 WIB saat radiasi matahari dalam kondisi terang, daya fotovoltaik menghasilkan 18 KW namun pada waktu ini beban hanya 4 KW sehingga 14 KW akan mengalir menuju *electrolyzer*. Hal ini tidak terjadi di malam hari dikarenakan tidak ada radiasi, malam hari beban disuplai penuh oleh *fuel cell*.

#### 4.8.2 Produksi Gas dan Tekanan Tangki Hidrogen

Produksi gas hidrogen ditunjukkan pada Gambar 4.20 yang terjadi selaras dengan daya *electrolyzer*. Daya sisa yang besar terjadi pada pukul 10.00 hingga 16.00 WIB. Produksi gas mencapai mencapai 0.27 mol/s saat puncak. Tekanan yang terjadi pada tabung hidrogen disebabkan oleh adanya aliran gas hidrogen yang masuk ke dalam tabung. Ketika *electrolyzer* terisi (kelebihan daya) maka otomatis nilai tekanan dalam tabung hidrogen tersebut akan terus naik. Dikarenakan *electrolyzer* aktif pada pukul 09.00 hingga 16.00 WIB, maka tekanan yang terjadi pada tangki juga terjadi dalam waktu tersebut. Tekanan akhir tangki mencapai 800 pascal seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.21.



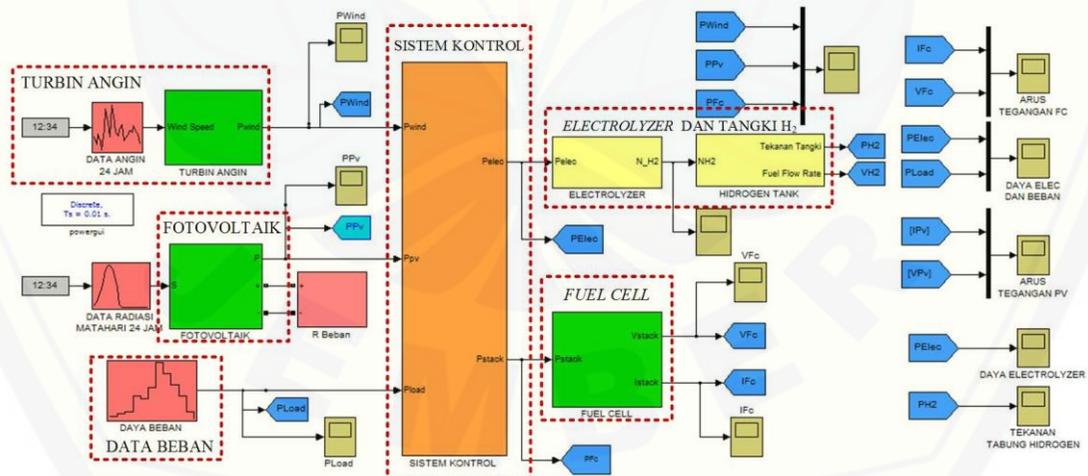
Gambar 4.20 Produksi Gas Hidrogen



Gambar 4.21 Tekanan Tangki Hidrogen

#### 4.9 Skenario III – Pengujian Sistem Hibrida Turbin Angin, Fotovoltaik, dan Fuel Cell (Beban Nyata)

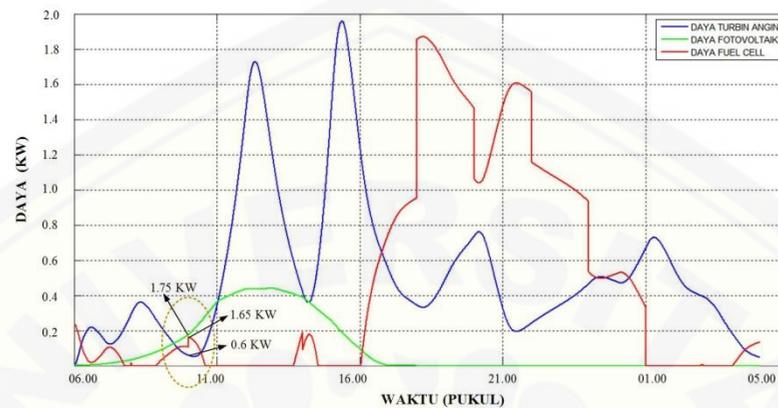
Pengujian ini dengan menggabungkan turbin angin, fotovoltaik dan *fuel cell*. Turbin angin mensuplai sebanyak 80% dari puncak yaitu sebesar 17 KW dengan memparalel turbin angin 500 W sebanyak 36 buah. Fotovoltaik mensuplai kekurangan 20% total beban menjadi 4.4 KW, sehingga dibutuhkan fotovoltaik 500 Wp sebanyak 9 buah. Blok sistem hibrida ini ditunjukkan pada Gambar 4.22.



Gambar 4.22 Sistem Hibrida Turbin Angin, Fotovoltaik, dan Fuel cell

#### 4.9.1 Manajemen Daya Turbin Angin, Fotovoltaik dan *Fuel Cell* (Beban Nyata)

Manajemen daya turbin angin, fotovoltaik dan *fuel cell* yang terjadi pada sistem hibrida ditunjukkan pada Gambar 4.23.

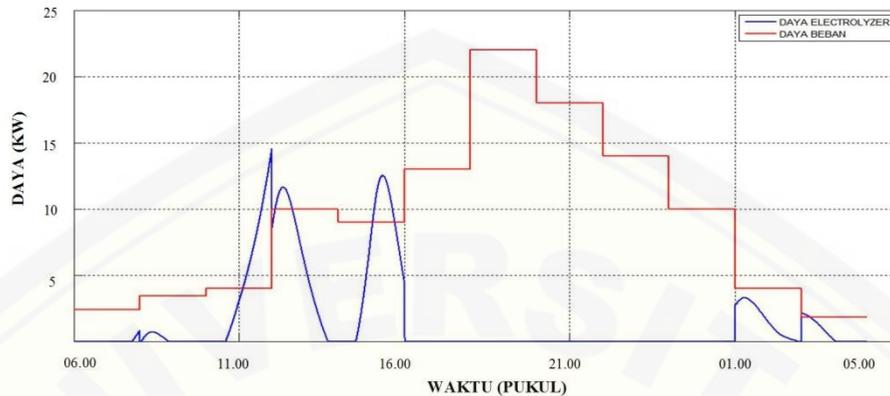


Gambar 4.23 Grafik Daya Turbin Angin, Fotovoltaik, dan *Fuel cell*

Gambar 4.23 merupakan daya dari tiga buah pembangkit yaitu turbin angin, fotovoltaik dan *fuel cell*. Daya turbin angin dan fotovoltaik cenderung mampu mensuplai beban pagi hingga sore hari. Saat kecepatan angin rendah dan daya fotovoltaik tidak mampu mensuplai beban, maka *fuel cell* aktif. Pada Gambar 4.23 di saat pukul 10.00 WIB ketika kecepatan angin berkisar 3.2 m/s dayanya hanya 0.6 KW dan fotovoltaik hanya mampu menghasilkan 1.75 KW sehingga *fuel cell* mensuplai kekurangan beban sebesar 1.65 KW dikarenakan beban yang dibutuhkan oleh sistem adalah sebesar 4 KW. Pukul 16.00 hingga 24.00 WIB turbin angin cenderung bekerja secara hibrida dengan *fuel cell* dikarenakan memang tidak adanya daya pembangkitan pada fotovoltaik sendiri. Grafik daya *electrolyzer* dan beban ditunjukkan oleh Gambar 4.24.

Pukul 11.00 hingga 14.00 WIB terjadi sebuah pelonjakan energi sisa sebesar 14 KW. Hal ini disebabkan karena pada saat ini nilai dari daya fotovoltaik dan turbin angin dalam keadaan sedang dan beban hanya 0.4 KW, oleh karena itu terjadi *excess power*. Begitu pula pada pukul 15.00 – 16.00 WIB, pada waktu ini nilai dari daya angin saat besar yaitu 1.8 KW dan beban hanya 0.9 KW sehingga daya sisa

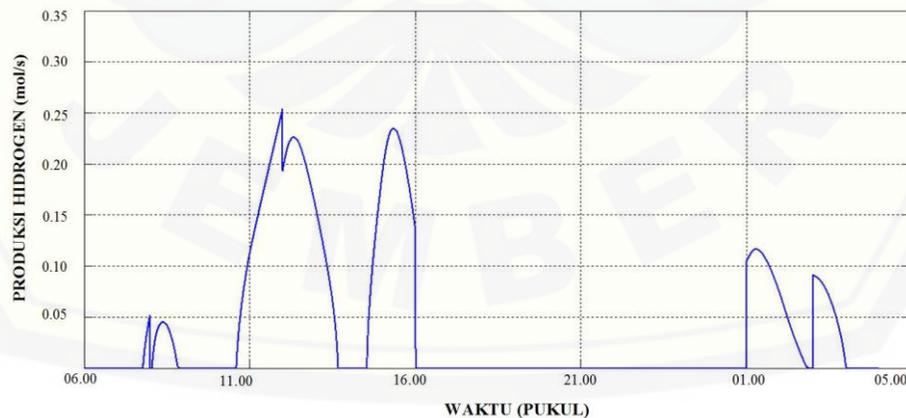
disalurkan ke *electrolyzer*. Pukul 16.00 – 01.00 WIB tidak ada *excess power* karena turbin angin dan *fuel cell* bekerja bersama.



Gambar 4.24 Grafik Daya *Electrolyzer* dan Beban

#### 4.9.2 Produksi Gas dan Tekanan Tangki Hidrogen

Produksi gas hidrogen pada Gambar 4.25 yang terjadi selaras dengan daya *electrolyzer*, dengan daya sisa yang besar pada pukul 11.00 - 14.00 WIB, dan 14.00 – 15.00 WIB. Produksi gas hidrogen yang terjadi dapat mencapai 0.25 mol/s saat puncak. Ketika *electrolyzer* aktif pada pukul 11.00 - 14.00 WIB, dan 14.00 – 15.00 WIB, maka tekanan yang terjadi pada tangki juga terjadi dalam waktu itu dengan akhir tekanan tangki mencapai 625 pascal seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.26. Tekana hidrogen disini tidak mengalami penurunan dikarenakan tidak adakanya valve (katup) pada tabung hidrogen.



Gambar 4.25 Produksi Gas Hidrogen



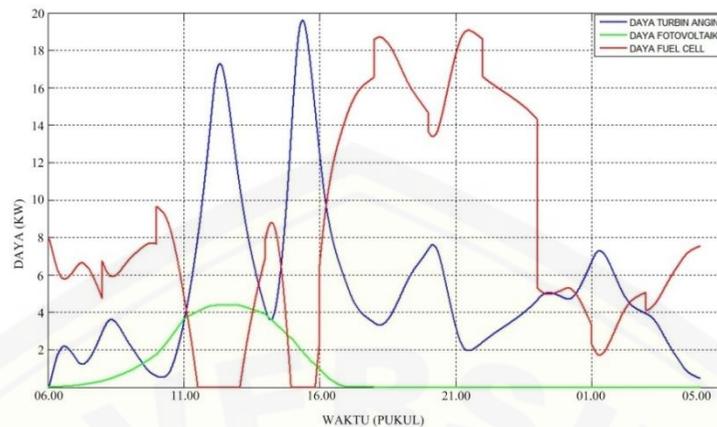
Gambar 4.26 Tekanan Tangki Hidrogen

#### 4.10 Skenario IV – Pengujian Sistem Hibrida Turbin Angin, Fotovoltaik, dan Fuel Cell (Beban Rancangan)

Pengujian ini dengan menggabungkan turbin angin, fotovoltaik dan *fuel cell*. Turbin angin mensuplai sebanyak 80% dari puncak yaitu sebesar 17 KW dengan memparalel turbin angin 500 W sebanyak 36 buah. Fotovoltaik mensuplai kekurangan 20% total beban menjadi 4.4 KW, sehingga dibutuhkan fotovoltaik 500 Wp sebanyak 9 buah. Blok sistem hibrida ini sama dengan blok pada Gambar 4.22. Namun dalam sistem blok beban, beban yang digunakan mengalami kenaikan. Besar beban yang digunakan ditunjukkan oleh Tabel 4.3.

##### 4.10.1 Manajemen Daya Turbin Angin, Fotovoltaik dan *Fuel Cell* (Beban Rancangan)

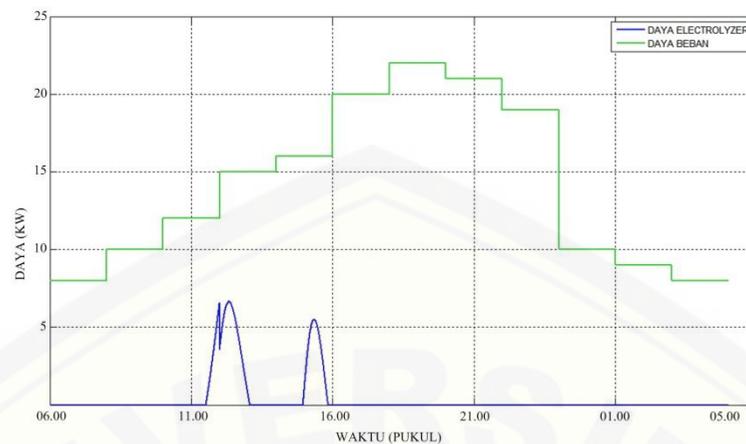
Manajemen daya turbin angin, fotovoltaik dan *fuel cell* yang terjadi pada sistem hibrida ditunjukkan pada Gambar 4.27. Pada skenario ini terdiri atas tiga buah pembangkit yaitu turbin angin, fotovoltaik, dan *fuel cell*. Seperti halnya pada skenario III, dalam skenario IV juga menggabungkan (hibrida) tiga sumber tersebut. Hal pembeda skenario III dan IV adalah beban yang digunakan. Pada skenario IV beban yang digunakan lebih tinggi nilainya dan cenderung diatas 8 KW setiap jamnya. Beban rancangan ini detailnya dalam dilihat pada Tabel 4.3.



Gambar 4.27 Grafik Daya Turbin Angin, Fotovoltaik, dan *Fuel Cell*

Manajemen pembangkitan yang terjadi dapat dilihat pada Gambar 4.27. Terlihat bahwa pada jam – jam awal (06.00 - 11.00), daya fotovoltaik dan turbin angin belum mampu untuk mensuplai beban. Dampaknya adalah diaktifkannya fuel cell sebagai daya cadangan sistem. Namun disini terlihat bahwa daya fuel cell yang diaktifkan sangat besar mencapai 9 KW. Disini berarti bahwa pada jam – jam awal jika terjadi kenaikan daya beban, maka fuel cell akan aktif untuk mensuplai kurang daya. Pada pukul 12.00 dengan keadaan angin yang berhembus kencang, turbin angin mampu mensuplai beban yang diminta. Pada kondisi malam hari beban yang diminta sangat besar sehingga memaksa fuel cell untuk aktif kembali. Terlihat pada Gambar 4.27 bahwa pada kondisi malam, daya pembangkitan didominasi oleh fuel cell. Hal ini terjadi karena kondisi angin yang tidak berhembus terlalu kencang. Kondisi daya electrolyzer yang dihasilkan ditunjukkan pada Gambar 4.28.

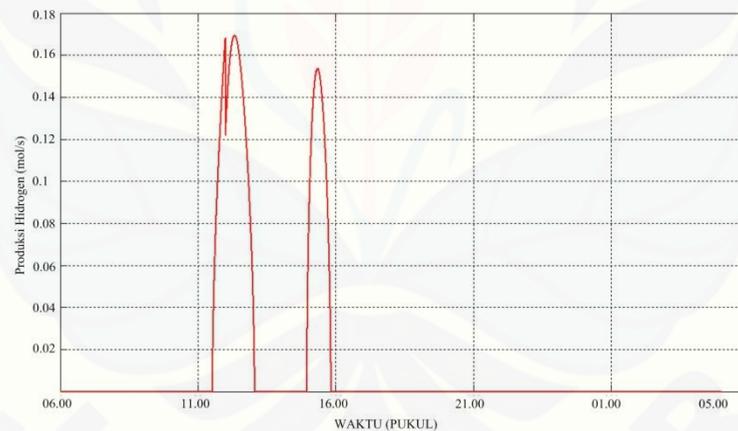
Gambar 4.28 telah menunjukkan daya sisa yang dihasilkan sistem. Terlihat pada pukul 12.00 disaat kondisi angin menghasilkan 17 KW, terdapat sisa daya sebesar 6 – 7 KW. Begitu pula pada pukul 15.00 ketika turbin angin menghasilkan 19 KW, terdapat sisa daya sebesar 5 KW. Hal ini terjadi dikarenakan pada pukul 12.00 dan 15.00 kondisi angin dalam keadaan berhembus kencang. Pada kondisi lainnya electrolyzer tidak menghasilkan daya dikarenakan sistem dalam keadaan kurang daya sehingga fuel cell aktif.



Gambar 4.28 Grafik Daya Electrolyzer dan Beban

#### 4.10.2 Produksi Gas dan Tekanang Tangki Hidrogen

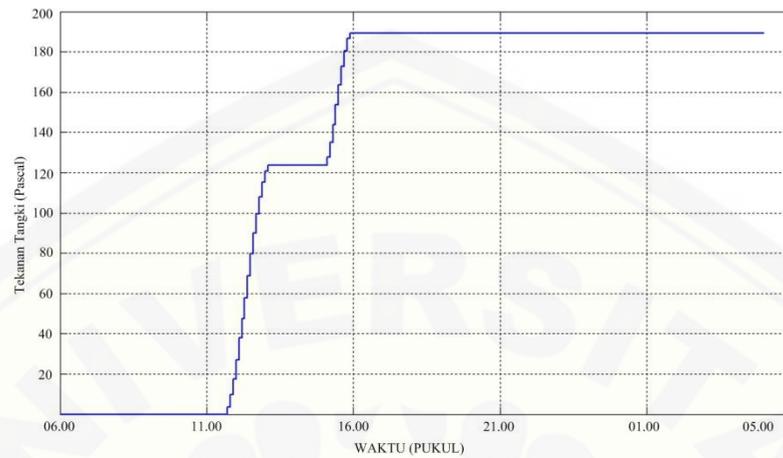
Produksi gas hidrogen yang terjadi pada sistem ditunjukkan pada Gambar 4.29. Waktu aktif produksi hidrogen selaras dengan aktifnya electrolyzer yaitu pada pukul 12.00 dan 15.00. Gas yang diproduksi pada pukul 12.00 sebesar 0.17 mol/s dan pada pukul 15.00 mencapai 0.15 mol/s.



Gambar 4.29 Grafik Produksi Gas Hidrogen

Untuk tekanan tangki hidrogen ditunjukkan pada Gambar 4.30. Pada gambar tersebut dapat dilihat bahwa pada kondisi electrolyzer memproduksi gas hidrogen, maka tekanan tangki naik seiring dengan produksi gas hidrogen.

Pada pukul 12.00 tekanan tangki yang semula 0 pascal naik menjadi 120 pascal dan pada pukul 15.00 naik 190 pascal.



Gambar 4.30 Grafik Tekanan Tangki Hidrogen

## BAB 5 PENUTUP

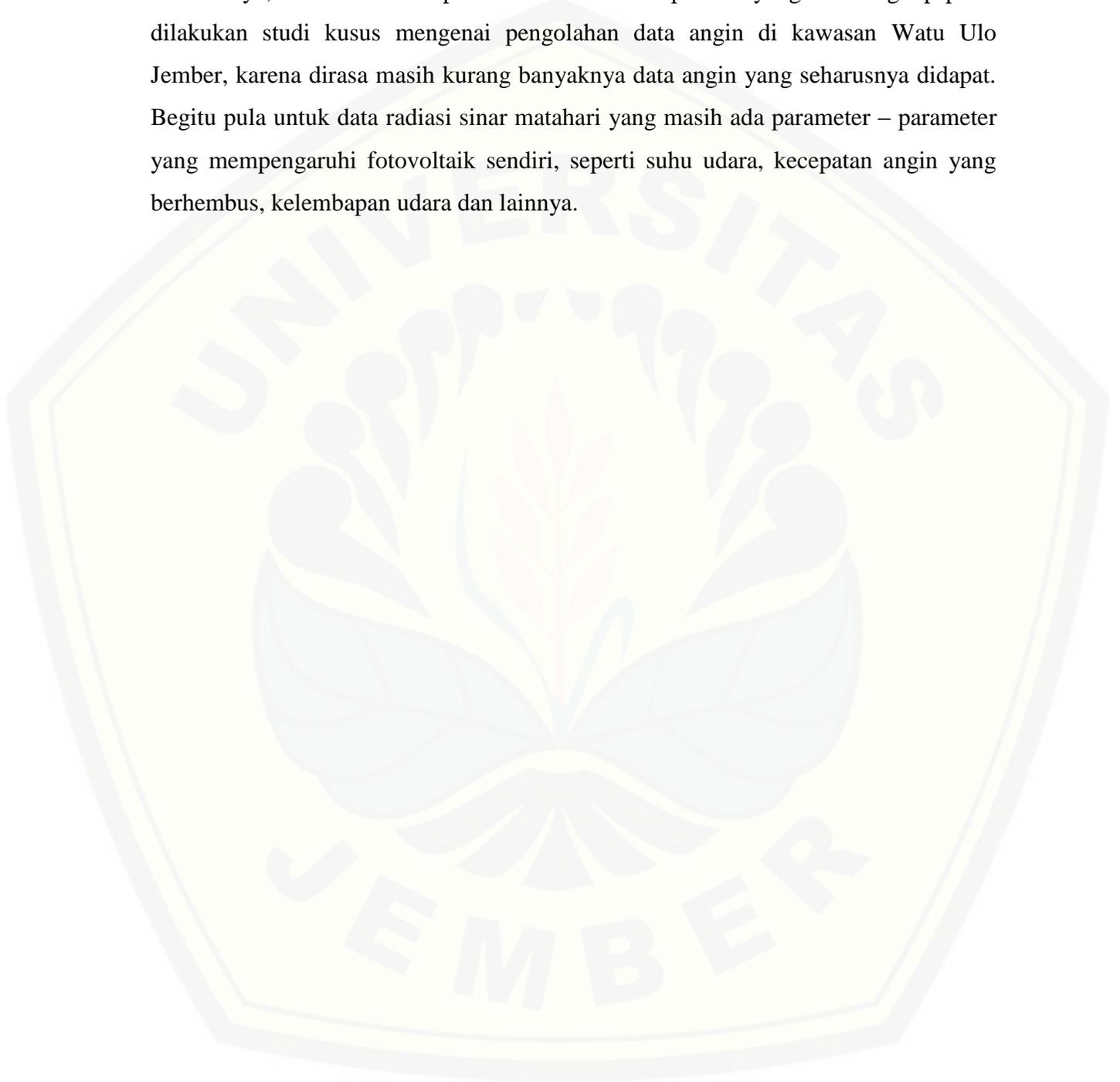
### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil dan pembahasan yang telah dilakukan maka dapat disimpulkan bahwa :

1. Pembangkit sistem hibrida turbin angin 500 W x 48 dengan *fuel cell* mampu mensuplai beban nyata di kawasan Watu Ulo Jember dengan rincian, *excess power* terjadi pukul 11.00 – 14.00 sebesar 14 KW, 15.00 – 16.00 sebesar 15 KW dan pukul 01.00 sebesar 5 KW dengan produksi gas hidrogen masing – masing 0.225, 0.25, dan 0.15 mol/s serta tekanan tangki mencapai 650 pascal.
2. Pembangkit sistem hibrida fotovoltaik 500 W x 48 dengan *fuel cell* mampu mensuplai beban nyata di kawasan Watu Ulo Jember dengan rincian, *excess power* terjadi pukul 09.00 – 16.00 sebesar 18 KW sebagai puncak, produksi gas hidrogen 0.275 mol/s (puncak) serta tekanan tangki mencapai 800 pascal.
3. Pembangkit sistem hibrida fotovoltaik 500 W x 48 dengan *fuel cell* bekerja secara hibrida pada pukul 16.00 WIB dengan daya fotovoltaik 5 KW dan *fuel cell* 8 KW.
4. Pembangkit sistem hibrida turbin angin 500W x 36, fotovoltaik 500 Wp x 10, dengan *fuel cell* mampu mensuplai beban nyata di kawasan Watu Ulo Jember dengan rincian, *excess power* terjadi pukul 11.00 – 14.00 mencapai 14 KW, 15.00 – 16.00 sebesar 13.5 KW dan pukul 01.00 sebesar 3 KW dengan produksi gas hidrogen masing – masing mencapai 0.25, 0.18, dan 0.12 mol/s serta tekanan tangki mencapai 625 pascal.
5. Berdasarkan pada karakteristik angin dan radiasi matahari maka daya fotovoltaik dan turbin angin cenderung mampu mensuplai beban pada siang hari, sedangkan pada malam hari , sumber pembangkitan akan disuplai oleh *fuel cell* dan turbin angin.

## 5.2 Saran

Dalam penelitian ini masih terdapat beberapa kendala – kendala dan perbaikan didalamnya, oleh karena itu perlu diberikan beberapa saran yang mencakup perlu dilakukan studi kusus mengenai pengolahan data angin di kawasan Watu Ulo Jember, karena dirasa masih kurang banyaknya data angin yang seharusnya didapat. Begitu pula untuk data radiasi sinar matahari yang masih ada parameter – parameter yang mempengaruhi fotovoltaik sendiri, seperti suhu udara, kecepatan angin yang berhembus, kelembapan udara dan lainnya.



## DAFTAR PUSTAKA

- Dirjen EBTKE, 2011. Statistik Energi Baru Terbarukan dan Konversi Energi. Jakarta: Kementerian ESDM.
- Hikmawan, Andik. 2012. “Simulasi *Hybrid Power System* antara *Photovoltaic* dengan *Fuel Cell* Menggunakan *Fuzzy Logic Controller*” Tidak Diterbitkan. Skripsi. Jember: Fakultas Teknik Universitas Jember.
- Khan, M. J. *et al.* 2013. *Dynamic Modeling Simulation Of A Small Wind–Fuel Cell Hybrid Energy System*. Elsevier. *Renewable Energy* 30 pp 421 – 439.
- Kumar, S. & Garg, V. 2013. *Hybrid system of pv solar / wind & Fuel cell*. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*. ISSN Vol 2 pp 3666 – 3679.
- Kusdiana, Dadan. 2013. Laporan Tahunan Kementerian ESDM. Jakarta: Kementerian ESDM.
- Lajnef, Tourkia *et al.* 2013. *Modeling, Control, and Simulation of a Solar Hydrogen/Fuel Cell Hybrid Energy System for Grid-Connected Applications*. *Hindawi Publishing Corporation*. Vol 2013. 9 pages.
- Mathew, Sathyajith. 2006. *Wind Energy Fundamentals, Resource Analysis and Economics*. *Netherlands* : Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Novitasari. 2014. “Optimalisasi Daya Output Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Angin Menggunakan *Permanent Magnet Synchronous Generator* Berbasis *Neural Network*” Tidak Diterbitkan. Skripsi. Jember: Fakultas Teknik Universitas Jember.
- PLN Jember Unit Ambulu, 2015. Data Pembebanan Bulanan pada Rayon Ambulu. Jember: PLN Jember.
- PT PLN (Persero). 2013. Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik PT PLN (Persero) 2013-2022. Jakarta: PT PLN (Persero).

Ural, Zehra. 2007. *Dynamic Simulation of a Pem Fuel Cell System. Proceedings 2nd International Hydrogen Energy Congress and Exhibition IHEC.*

