



**KINERJA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA  
HYBRID BAYU DAN SURYA DI PLTH PANTAI BARU  
PONCOSARI, SRANDAKAN, BANTUL**

Skripsi

Diajukan sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar Sarjana  
Pendidikan Program Studi Pendidikan Teknik Elektro

Oleh

Hadi Iman Santosa

NIM.5301410069

**JURUSAN TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG**

**2017**

## PENGESAHAN

Skripsi ini telah dipertahankan di hadapan sidang panitia ujian skripsi program studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Negeri Semarang pada

Hari : Kamis

Tanggal : 23 Februari 2017

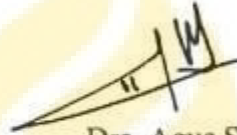
Panitia Ujian Skripsi:

Ketua,



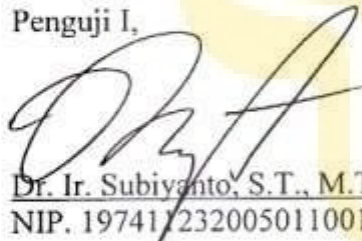
Dr.-Ing. Dhidik Prastiyanto, S.T., M.T  
NIP. 197805312005011002

Sekretaris,



Drs. Agus Suryanto, M.T  
NIP. 196708181992031004

Penguji I,



Dr. Ir. Subiyanto, S.T., M.T  
NIP. 197411232005011001

Penguji II,



Dr. H Eko Suprptono, M.Pd  
NIP. 196109021987021001

Penguji III/Pembimbing Utama



Drs. Said Sunardiyo, M.T  
NIP. 196505121991031003

Mengetahui,

Dekan Fakultas Teknik



Dr. Nur Oudus, M.T

NIP. 196911301994031001

## PERNYATAAN KEASLIAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa :

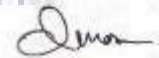
1. Skripsi ini, adalah asli dan belum pernah diajukan untuk mendapatkan gelar akademik (sarjana, magister, dan/atau doktor), baik di Universitas Negeri Semarang (UNNES) maupun di perguruan tinggi lain.
2. Karya tulis ini adalah murni gagasan, rumusan, dan penelitian saya sendiri, tanpa bantuan pihak lain, kecuali arahan Pembimbing dan masukkan Tim Penguji.
3. Dalam karya tulis ini tidak terdapat karya atau pendapat yang telah ditulis atau dipublikasikan orang lain, kecuali secara tertulis dengan jelas dicantumkan sebagai acuan dalam naskah dengan disebutkan nama pengarang dan dicantumkan dalam daftar pustaka.
4. Pernyataan ini saya buat dengan sesungguhnya dan apabila di kemudian hari terdapat penyimpangan dan ketidakbenaran dalam pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi akademik berupa pencabutan gelar yang telah diperoleh karena karya ini, serta sanksi lainnya sesuai dengan norma yang berlaku di perguruan tinggi ini.

**UNNES**

UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

Semarang,

Yang membuat pernyataan,



Hadi Iman Santosa

NIM.5301410069

## MOTTO DAN PERSEMBAHAN

### MOTTO

“Karena sesungguhnya sesudah kesulitan itu ada kemudahan. Sesungguhnya sesudah kesulitan itu ada kemudahan.” (Q.S. Al Insyirah 94: 5-6)

“Allah tidak membebani seseorang melainkan sesuai dengan kesanggupannya.” (Q.S. Al Baqarah 2: 286)

Orang yang tidak pernah melakukan kesalahan adalah orang yang tidak pernah mencoba melakukan hal baru (A. Einstein)

Hakikat hidup bukanlah apa yang kita ketahui, bukan buku-buku yang kita baca atau kalimat-kalimat yang kita pidatikan, melainkan apa yang kita kerjakan, apa yang paling mengakar di hati, jiwa dan inti kehidupan kita (Emha Ainun Najib)

### PERSEMBAHAN

1. Ucapan syukur kehadiran Allah SWT.
2. Ibu dan Bapak yang selalu mendoakan dan memotivasi.
3. Kakak dan adik tercinta yang telah memberi semangat.
4. Teman-teman yang telah memberikan dukungan dan memantapkan hatiku untuk melangkah.
5. Almamater tempat aku menuntut ilmu.

UNNES  
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

## ABSTRAK

Hadi Iman Santosa. 2016. *Kinerja Pembangkit Listrik Tenaga Hybrid Bayu dan Surya di PLTH Pantai Baru, Poncosari, Srandakan, Bantul*. Pend. Teknik Elektro, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Negeri Semarang.

Kata kunci: Kinerja, Efisiensi, PLTH

Kebutuhan energi di dunia pada umumnya dan di Indonesia khususnya terus meningkat karena penambahan penduduk, pertumbuhan ekonomi dan pola konsumsi energi itu sendiri yang senantiasa meningkat. Sedangkan energi fosil yang selama ini merupakan sumber energi utama ketersediannya sangat terbatas dan terus mengalami deplesi (kehabisan atau menipis). Proses alam memerlukan waktu yang sangat lama untuk dapat kembali menyediakan energi fosil ini.

Penelitian ini merupakan penelitian deskriptif dengan mengumpulkan dan menggambarkan data yang telah tersedia diobjek yang akan diteliti. Jenis penelitian deskriptif yang digunakan yaitu penelitian studi kasus. Menurut Suharsimi (2010: 3) Penelitian Deskriptif adalah penelitian yang dimaksudkan untuk menyelidiki keadaan, kondisi atau hal lain yang hasilnya dilaporkan dalam bentuk laporan penelitian. Pada studi ini para peneliti tidak melakukan manipulasi atau memberikan perlakuan-perlakuan tertentu terhadap objek penelitian, semua kegiatan atau peristiwa berjalan seperti apa adanya.

Hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat diambil kesimpulan yaitu, kinerja kincir angin dengan daya listrik keluaran rerata pada pengukuran sebesar 80,6 Watt. Efisiensi dari kincir angin berkapasitas 2,5 kW adalah 46%. Kinerja panel surya maksimal dihasilkan pada pukul 13:00, dengan daya listrik keluaran rerata pada pengukuran sebesar 143,8 Watt dan efisiensi energi rerata pada pengukuran sebesar 63,6%. Jadi Efisiensi Hybrid PLTH adalah 54,8%.

UNNES  
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

## KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Wr. Wb.

Segala puji bagi Allah SWT yang telah memberikan taufiq dan hidayah-Nya, serta kemampuan, kemudahan, dan kesempatan kepada penulis sehingga dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Kinerja Pembangkit Listrik Tenaga Hybrid Bayu dan Surya di PLTH Pantai Baru, Poncosari, Srandakan, Bantul”. Shalawat dan salam semoga tercurah kepada Nabi Muhammad SAW, sang manusia mulia, yang telah mengantarkan kita ke jalan yang diridhoi Allah SWT.

Skripsi ini disusun dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai derajat Sarjana Teknik, Fakultas Teknik, Universitas Negeri, Semarang. Dalam penyusunan skripsi ini, penulis menghadapi berbagai tantangan namun hal itu tidak menyurutkan niat penulis untuk menyelesaikan skripsi ini. Penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu dan memberikan motivasi kepada penulis dalam menyelesaikan skripsi ini. Penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Prof. Dr. Fathur Rohman, M.Hum, Rektor Universitas Negeri Semarang, Bapak Dr. Nur Qudus, M.T., Dekan Fakultas Teknik, Bapak Dr. -Ing Dhidik Prastiyanto, S.T., M.T., Ketua Jurusan dan Ketua Program Studi Teknik Elektro UNNES yang telah memberikan izin dalam penyusunan skripsi ini.
2. Bapak Drs. Said Sunardiyo, M.T., selaku Dosen Pembimbing yang telah berkenan meluangkan waktunya untuk memberi bantuan, saran, masukan, dan motivasi kepada penulis hingga terselesaikannya skripsi ini.
3. Bapak Dr. Ir. Subiyanto, S.T., M.T dan Bapak Dr. H Eko Suprpto, M.Pd., selaku dosen penguji skripsi yang telah memberikan saran dan masukan sehingga skripsi ini menjadi lebih baik lagi.
4. Bapak, Ibu dosen dan Staf di Jurusan Teknik Elektro UNNES yang telah memberikan ilmu pengetahuan.

5. Bapak Sutarto dan Bapak Chriswantoro, selaku pembimbing lapangan, yang tidak pernah jenuh berbagi ide dan membimbing penulis dalam pengambilan data.
6. Bapak Drs. Sugeng Purbawanto, M.T., selaku dosen wali yang selalu memberikan arahan dan bimbingan kepada penulis.
7. Bapak Murjito, Bapak Suparjiyo, Bapak Widjiyo, Mas Iwan Fahmi Harja, dan Mas Aar Faisal yang bersedia meluangkan waktunya untuk berdiskusi kepada penulis selama proses pengambilan data.
8. Ibu, bapak, kakak, dan sahabat yang selalu menyayangiku, atas segala dukungan, doa, dan kasih sayang kepada penulis.
9. Rekan-rekan mahasiswa Teknik Elektro angkatan 2010 yang telah memberikan dukungan dan bantuan.
10. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu-persatu yang telah membantu penulis baik secara langsung maupun tidak langsung.

Hanya ucapan terima kasih dan doa, semoga apa yang telah diberikan tercatat sebagai amal baik dan mendapatkan balasan dari Allah SWT. Penulis menyadari terdapat kekurangan dalam skripsi ini, oleh karena itu penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun dari semua pihak untuk pengembangan dan perbaikan skripsi ini. Penulis juga memohon maaf atas segala kekurangan dan keterbatasan yang ada dalam skripsi ini. Semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi perkembangan ilmu pengetahuan, khususnya di bidang energi terbarukan, agar Indonesia berdaulat penuh di bidang energi.

Semarang,

2017

Penulis

Hadi Iman Santosa

## DAFTAR ISI

JUDUL .....	i
LEMBAR PENGESAHAN .....	ii
LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN .....	iii
MOTTO DAN PERSEMBAHAN .....	iv
ABSTRAK .....	v
KATA PENGANTAR .....	vi
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR TABEL.....	x
DAFTAR GAMBAR .....	xi
DAFTAR LAMPIRAN.....	xii
BAB I PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Perumusan Masalah .....	3
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Tujuan Penelitian .....	4
1.5 Manfaat Penelitian .....	4
1.6 Sistematika Penulisan Skripsi .....	5
BAB II LANDASAN TEORI.....	6
2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Angin.....	6
2.1.1. Turbin Angin.....	6
2.1.2. Bagian-bagian Sistem Turbin Angin.....	7
2.1.3. Jenis- jenis Turbin Angin.....	13
2.1.4. Prinsip Kerja Turbin Angin .....	18
2.1.5. Efisiensi Turbin Angin.....	19
2.2 Pembangkit Listrik Tenaga Surya.....	21
2.2.1. Sel Surya .....	21
2.2.2. Struktur Sel Surya.....	27
2.2.3. Jenis-jenis Sel Surya .....	30
2.2.4. Prinsip Kerja Sel Surya.....	33



2.2.5. Karakteristik Sel Surya .....	35
2.2.6. Faktor-faktor yang Mempengaruhi Sel Surya .....	38
2.2.7. Efisiensi Sel Surya .....	41
<b>BAB III METODE PENELITIAN.....</b>	<b>44</b>
3.1 Metode Penelitian.....	44
3.2 Jenis Penelitian.....	44
3.3 Waktu dan Tempat .....	45
3.4 Alat dan Bahan Penelitian.....	46
3.5 Sumber Data dan Variabel .....	48
3.6 Metode Pengumpulan Data.....	48
3.7 Teknik Analisis Data.....	50
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>54</b>
4.1 Hasil Penelitian .....	54
4.2 Pembahasan.....	55
<b>BAB V PENUTUP.....</b>	<b>61</b>
5.1 Kesimpulan .....	61
5.2 Saran.....	61
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>62</b>
<b>LAMPIRAN.....</b>	<b>64</b>



## DAFTAR TABEL

Tabel 1.1 Kebutuhan Energi Indonesia Pada 2013 .....	1
Table 2.1 Tabel 2.1 Tabel ragam jenis turbin angin berdasarkan kapasitas .....	13
Tabel 2.2 Koefisien gesek berbagai jenis permukaan .....	40
Tabel 3.1 Daftar Alat-Alat Penelitian .....	43
Tabel 3.2 Data-data Penelitian .....	48



## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Bagian-Bagian Sistem Turbin Angin pada PLTH .....	7
Gambar 2.2 Baterai/Accu pada PLTH Pantai Baru Bantul.....	9
Gambar 2.3 Inverter pada PLTH Pantai Baru Bantul .....	10
Gambar 2.4 Display pada PLTH Pantai Baru Bantul .....	10
Gambar 2.5 Box Control pada PLTH Pantai Baru Bantul .....	11
Gambar 2.6 Data Logger pada PLTH Pantai Baru Bantul.....	12
Gambar 2.7 Turbin Angin Sumbu Horizontal.....	14
Gambar 2.8 Simbol Sel Surya.....	21
Gambar 2.9 Ikatan Kovalen Kristal Silikon.....	23
Gambar 2.10 Kekosongan pada ikatan kovalen.....	24
Gambar 2.11 Pemberian ketidakmurnian valensi lima .....	25
Gambar 2.12 Pemberian ketidakmurnian valensi tiga .....	26
<i>Gambar 2.15 Struktur dari sel surya komersial yang menggunakan material silikon sebagai semikonduktor.....</i>	<i>27</i>
Gambar 2.16 Sel Surya <i>Monocrystalline</i> .....	31
Gambar 2.17 Sel Surya <i>Polycrystalline</i> .....	32
Gambar 2.18 Sel Surya <i>Thin Film</i> .....	32
<i>Gambar 2.19 Junction antara semikonduktor tipe-p (kelebihan hole) dan tipe-n (kelebihan elektron) .....</i>	<i>34</i>
<i>Gambar 2.20 Ilustrasi cara kerja sel surya dengan prinsip p-n junction.....</i>	<i>35</i>
Gambar 2.21 Kurva I-V .....	36
Gambar 2.22 Modul I-V curve (12V DC nominal).....	37
Gambar 2.23 Karakteristik arus dan tegangan sel surya .....	39
Gambar 2.24 Pengaruh temperatur terhadap daya <i>solar cell</i> .....	40
Gambar 3.1 Sistematis metode penelitian .....	47
Gambar 3.2 Single Line Pengukuran atau Pengambilan Data .....	49
Gambar 4.1 Kincir Angin 2,5 kW No.1 Grup Timur.....	54
Gambar 4.2 PV Grup Timur.....	59

## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 SK Dosen Pembimbing .....	65
Lampiran 2 Surat Pengantar Observasi.....	66
Lampiran 3 Surat Rekomendasi Penelitian .....	67
Lampiran 4 Surat Pengantar KESBANGPOL .....	68
Lampiran 5 Surat Pengantar SEKRETARIAT DAERAH.....	69
Lampiran 6 Surat Pengantar Bappeda.....	70
Lampiran 7 Dokumentasi .....	71
Lampiran 8 Data Teknis Grup Pembangkit .....	72
Lampiran 9 Tabel Monitoring Panel Surya.....	73
Lampiran 10 Tabel Monitoring Kincir Angin.....	75



# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 LATAR BELAKANG

Kebutuhan energi di dunia pada umumnya dan di Indonesia khususnya terus meningkat karena penambahan penduduk, pertumbuhan ekonomi dan pola konsumsi energi itu sendiri yang senantiasa meningkat. Sedangkan energi fosil yang selama ini merupakan sumber energi utama ketersediannya sangat terbatas dan terus mengalami deplesi (kehabisan atau menipis). Proses alam memerlukan waktu yang sangat lama untuk dapat kembali menyediakan energi fosil ini. Proyeksi kebutuhan energi nasional dilakukan dengan menggunakan skenario Kebijakan Energi Nasional (KEN) dimana diasumsikan bahwa konsumsi energi final akan berkurang dengan menerapkan program konservasi dan efisiensi energi sesuai dengan target Pemerintah dalam Kebijakan Energi Nasional.

	Tahun		
	2013	2025	2050
<b>Minyak</b>	70.08	92.49	179.55
<b>Gas</b>	24.84	47.96	122.57
<b>Batubara</b>	18.26	36.69	115.99
<b>Listrik</b>	16.21	35.06	108.29
<b>Biofuel</b>	0.66	12.71	37.91
<b>EBT lainnya</b>	6.39	11.07	30.79

(Sumber: Ditjen Energi Baru Terbarukan dan Konversi Energi, 2014: 18)  
Tabel 1.1 Kebutuhan Energi Indonesia Pada 2013 Dan Proyeksinya Hingga 2050

Pertimbangan konservasi energi dan lingkungan hidup memang menuntut kita untuk segera dapat memanfaatkan energi baru terbarukan yang tersedia dengan mudah dan lebih ramah lingkungan dibandingkan energi fosil seperti batu bara, minyak, dan gas. Tetapi seperti kita ketahui, khususnya di Indonesia, pemanfaatan potensi energi terbarukan seperti hidro, panas bumi, biomassa, surya, laut, uranium dan angin sampai saat ini belum optimal.

Energi angin adalah energi yang relatif bersih dan ramah lingkungan karena tidak menghasilkan karbondioksida ( $\text{CO}_2$ ) atau gas-gas lain yang berperan dalam pemanasan global. Penggunaan energi angin tidak menghasilkan sulfur dioksida dan nitrogen dioksida yang menimbulkan hujan asam. Energi ini pun tidak menghasilkan limbah yang berbahaya bagi lingkungan atau manusia. Meski demikian, harus tetap diingat bahwa semua bentuk energi selalu memiliki akibat bagi lingkungan. Hanya saja, efek kincir angin sangat rendah, bersifat lokal dan mudah untuk dikelola. Di samping itu, kincir angin juga memiliki pesona tersendiri dan dapat menjadi atraksi wisata yang menarik.

Pemerintah melalui Kementerian Riset, Teknologi, dan Pendidikan Tinggi (Kemenristekdikti) saat ini sedang mengembangkan teknologi Pembangkit Listrik Tenaga Hybrid di Pantai Baru, Dusun Ngentak, Desa Poncosari, Kecamatan Srandakan, Kabupaten Bantul, Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta. Kementerian Riset, Teknologi, dan Pendidikan Tinggi (Kemenristekdikti) menggandeng beberapa Lembaga dalam Proyek Energi Hybrid, diantaranya Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN), Kementerian Perikanan dan Kelautan (KKP), Pemerintah Kabupaten Bantul dan Universitas Gajah Mada.

Energi Hybrid merupakan perpaduan dua atau lebih sumber energi yang berbeda. Instalasi energi hybrid yang terletak di Pantai Baru. ini menggunakan angin dan sinar matahari sebagai sumber energinya. Teknologi hybrid ini merupakan percontohan untuk dikembangkan daerah lain, terutama daerah terpencil guna untuk memenuhi kebutuhan listrik pada daerah terpencil. Hal ini bertujuan agar kesejahteraan masyarakat di Indonesia dapat merata. Sehingga Kementerian Riset, Teknologi, dan Pendidikan Tinggi (Kemristekdikti) optimis bahwa teknologi hybrid dari Bantul ini bisa menyinari Indonesia. Instalasi PLTH di Pantai Baru ini terdiri dari 2 grup pembangkit yang menghasilkan tenaga listrik yang berbeda-beda, yaitu grup barat dan grup timur. Grup barat terdiri dari 21 unit kincir angin kapasitas 1 kW. Grup timur terdiri dari 1 unit kapasitas 10 kW, 6 unit kapasitas perunit 2,5 kW, 4 unit kapasitas perunit 1 kW, sedangkan panel surya dipasang di grup timur dengan kapasitas 20 kW. (Sumber: PLTH Pantai Baru Bantul)

## **1.2 Perumusan Masalah**

Berdasarkan latar belakang tersebut, permasalahan yang menjadi fokus dalam kajian ini adalah untuk mengetahui perhitungan besaran efisiensi pembangkit listrik hybrid tenaga bayu dan surya yang terletak di PLTH Pantai Baru, Bantul.

## **1.3 Batasan Masalah**

Penelitian ini memiliki batasan masalah berupa untuk menghitung efisiensi pada kincir angin, penelitian ini dibatasi cukup dengan mengambil sampel pada

kincir angin 2,5 kW No.1, dan No.2 di blok timur beserta panel surya grup timur, sedangkan di blok barat dimatikan karena dalam proses perbaikan.

#### **1.4 Tujuan Penelitian**

Penelitian ini bertujuan untuk :

1. Mengetahui kinerja pembangkit listrik hybrid tenaga bayu dan surya yang terletak di PLTH Pantai Baru, Bantul.
2. Mengetahui perhitungan besaran efisiensi pembangkit listrik hybrid tenaga bayu dan surya yang terletak di PLTH Pantai Baru, Bantul.

#### **1.5 Manfaat Penelitian**

Manfaat yang diharapkan dalam penelitian ini adalah :

1. Sebagai bahan masukan bagi pengelola PLTH Pantai Baru, Bantul tentang kinerja turbin angin yang pengevaluasian dan pengoptimalan dari turbin angin dalam menghasilkan daya keluaran.
2. Hasil yang diperoleh dapat dijadikan sebagai acuan dalam penelitian selanjutnya guna mengoptimalkan daya keluaran dari turbin angin yang berada di kawasan PLTH Pantai Baru, Bantul.
3. Pengalaman melakukan penelitian dan sekaligus dijadikan salah satu syarat untuk mendapatkan gelar Sarjana Pendidikan Teknik Elektro.
4. Memberikan informasi lengkap mengenai kinerja dan efisiensi pembangkit listrik tenaga bayu, surya dan hybrid di PLTH Pantai Baru, Bantul kepada Kementerian Riset, Teknologi, dan Pendidikan Tinggi



(Kemenristekdikti) sebagai instansi yang sedang mengembangkan pembangkit energi listrik dari sumber energi terbarukan di Indonesia.

## 1.6 Sistematika Penulisan Skripsi

Sistematika penulisan skripsi disusun untuk memudahkan pemahaman tentang struktur dan isi skripsi. Penulisan skripsi ini dibagi menjadi tiga bagian, yaitu: bagian pendahuluan, bagian isi, dan bagian penutup.

**Bagian pendahuluan**, berisi : halaman judul, persetujuan pembimbing, halaman pengesahan, halaman pernyataan, motto dan persembahan, kata pengantar, daftar isi, daftar gambar, daftar tabel, dan daftar lampiran.

**Bagian Isi**, terdiri dari lima bab yang meliputi:

- Bab 1   Pendahuluan, bab ini meliputi latar belakang, perumusan masalah, batasan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, sistematika penulisan skripsi.
- Bab 2   Landasan Teori, bab ini berisi kajian mengenai landasan teori yang mendasari penelitian.
- Bab 3   Metode Penelitian berisi uraian tentang metode, waktu, tempat, alat dan bahan yang digunakan dalam melakukan penelitian.
- Bab 4   Hasil Penelitian dan Pembahasan, bab ini berisi tentang hasil-hasil penelitian dan pembahasan.
- Bab 5   Penutup, bab ini meliputi kesimpulan dan saran-saran dari hasil penelitian yang telah dilakukan.

**Bagian Penutup**, Bagian ini berisi daftar pustaka dan lampiran-lampiran.

## **BAB II**

### **LANDASAN TEORI**

#### **2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Angin**

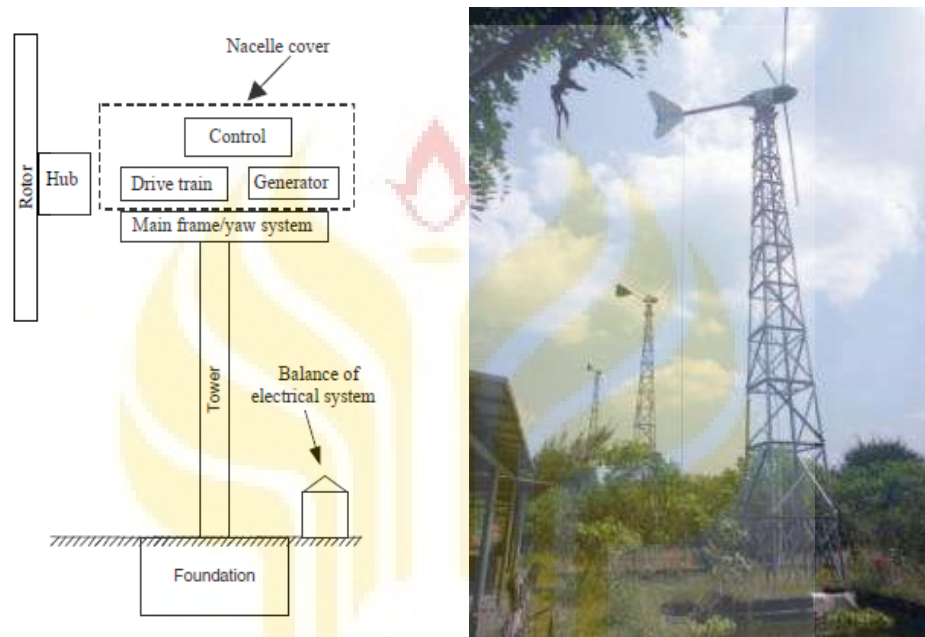
##### **2.1.1. Turbin Angin**

Turbin angin adalah kincir angin yang digunakan untuk membangkitkan tenaga listrik. Turbin angin ini pada awalnya dibuat untuk mengakomodasi kebutuhan para petani dalam melakukan penggilingan padi, keperluan irigasi, dll. Turbin angin terdahulu banyak dibangun di Denmark, Belanda, dan negara-negara Eropa lainnya dan lebih dikenal dengan Windmill.

Kini turbin angin lebih banyak digunakan untuk mengakomodasi kebutuhan listrik masyarakat, dengan menggunakan prinsip konversi energi dan menggunakan sumber daya alam yang dapat diperbaharui yaitu angin. Walaupun sampai saat ini pembangunan turbin angin masih belum dapat menyaingi pembangkit listrik konvensional (Contoh: PLTD, PLTU, dll), turbin angin masih lebih dikembangkan oleh para ilmuwan karena dalam waktu dekat manusia akan dihadapkan dengan masalah kekurangan sumber daya alam tak terbarui (Contoh : batubara, minyak bumi) sebagai bahan dasar untuk membangkitkan listrik.

### 2.1.2. Bagian-bagian Sistem Turbin Angin

Penelitian yang berlokasi di PLTH Pantai Baru Bantul menggunakan turbin angin sumbu horisontal atau yang disebut juga dengan TASH. Secara umum turbin angin sumbu horisontal memiliki bagian-bagian sebagai berikut:



Gambar 2.1 Bagian-Bagian Sistem Turbin Angin pada PLTH Pantai Baru, Bantul

- a. Rotor, bagiannya terdiri dari hub dan blade (sudu) dari turbin angin. Sudu turbin angin berfungsi untuk mengkonversikan energi kinetik angin. Hub berfungsi sebagai penyangga dan pengunci seluruh sudu turbin angin TASH.
- b. Komponen putar, terdiri dari komponen-komponen yang sifatnya berotasi pada suatu turbin angin. Komponen tersebut terdiri dari low-speed shaft (pada bagian rotor), gearbox, dan high-speed shaft (pada bagian generator).

- c. Generator adalah salah satu komponen terpenting dalam pembuatan sistem turbin angin. Generator ini dapat mengubah energi gerak menjadi energi listrik. Prinsip kerjanya dapat dipelajari dengan menggunakan teori medan elektromagnetik. Singkatnya, (mengacu pada salah satu cara kerja generator) poros pada generator dipasang dengan material ferromagnetik permanen. Setelah itu disekeliling poros terdapat stator yang bentuk fisisnya adalah kumparan-kumparan kawat yang membentuk loop. Ketika poros generator mulai berputar maka akan terjadi perubahan fluks pada stator yang akhirnya karena terjadi perubahan fluks ini akan dihasilkan tegangan dan arus listrik tertentu. Tegangan dan arus listrik yang dihasilkan ini disalurkan melalui kabel jaringan listrik untuk akhirnya digunakan oleh masyarakat. Tegangan dan arus listrik yang dihasilkan oleh generator ini berupa AC yang memiliki bentuk gelombang kurang lebih sinusoidal.
- d. Nacelle Cover dan Yaw System. Nacelle Cover berfungsi sebagai pelindung dari komponen-komponen mekanik turbin angin. Yaw System diperlukan untuk menjaga rotor shaft sejalan dengan angin datang.
- e. Tower dan pondasi. Tower merupakan tiang dari menara turbin angin, sedangkan pondasi adalah penopang menara atau tower agar tetap kokoh berdiri.
- f. Sistem kontrol, digunakan untuk mengendalikan operasional mesin dan produksi daya listrik yang dilengkapi dengan dummy load.

- g. Sistem elektrik, atau yang disebut juga tempat monitoring and control pada turbin angin. Di dalam sistem elektrik terdapat berbagai alat seperti baterai (accu), inverter, dan display.
- h. Baterai (accu) merupakan alat penyimpan tenaga listrik arus searah (DC). Daya energi angin yang dihasilkan dalam bentuk AC kemudian disearahkan dengan komponen dioda yang berada di control box turbin angin menjadi arus searah (DC), kemudian baru dialirkan ke baterai untuk menyimpan arus searah (DC).



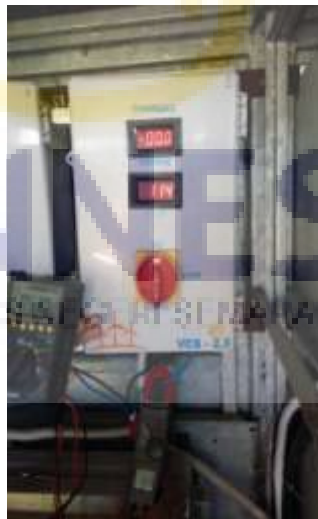
Gambar 2.2 Baterai/Accu pada PLTH Pantai Baru Bantul

- i. Inverter merupakan perangkat elektrik yang digunakan untuk mengubah arus listrik searah (DC) menjadi arus listrik bolak-balik (AC). Inverter mengkonversi arus DC dari perangkat baterai yang menjadi tempat penyimpanan daya yang dihasilkan turbin angin. Pada inverter yang berada di PLTH Pantai Baru Bantul (lihat Gambar ) adalah penggabungan dari baterai, panel surya dan turbin angin.



Gambar 2.3 Inverter pada PLTH Pantai Baru Bantul

- j. Display adalah tampilan angka yang berfungsi menunjukkan kecepatan angin dan arah dari mata angin. Adapun display pada PLTH Pantai Baru Bantul merupakan gabungan display dari turbin angin dan PV, yang menunjukkan daya keluaran PV berupa arus dan tegangan.



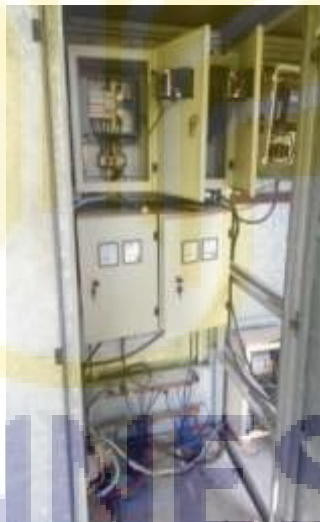
Gambar 2.4 Display pada PLTH Pantai Baru Bantul

- k. Kabel komponen yang digunakan untuk bisa menyalurkan arus listrik dan tegangan adalah kabel. Kable memiliki berbagai macam dan bentuk

dengan hambatan (*ohm*) yang berbeda pula. Pada umumnya kabel yang banyak digunakan adalah kabel yang terbuat dari tembaga yang dilapisi dengan pelindung.

#### l. Box Control Turbin Angin

Masing-masing turbin angin mempunyai box control. Adapun kegunaan dari box control yakni sebagai pengatur kecepatan putaran pada kincir dan supply tegangan dari turbin angin ke panel beban atau rumah induk. Untuk sistem pengereman pada turbin 240 V ini menggunakan electronic brake system, sistem kontrol PWM atau modulasi lebar pulsa.



Gambar 2.5 Box Control pada PLTH Pantai Baru Bantul

#### m. Dummy Load

Dummy Load merupakan tempat untuk pembuangan tegangan berlebih yang dihasilkan oleh pembangkit. Apabila tegangan yang dihasilkan pembangkit mencapai sekitar 260 V, maka tegangan akan dialihkan ke Dummy Load. Pada PLTH Pantai Baru grup barat jumlah dummy load



sebanyak 21 karena jumlah Turbin Angin 21 unit, setiap Turbin Angin memiliki dummy Load masing-masing.

n. Data Logger

Merupakan suatu device atau piranti yang dapat membaca berbagai macam jenis signal input yang selanjutnya merekamnya untuk disimpan dalam memori internal atau dihubungkan langsung dengan komputer. Kelebihan data logger dibandingkan dengan piranti akuisisi data umumnya adalah karena dapat dioperasikan secara terpisah dengan komputer. Data logger ini sangat cocok untuk lembaga penelitian seperti PLTH Pantai Baru Bantul dengan budget terbatas namun menginginkan spek akuisisi data yang baik. Selain itu, data logger ini dapat digunakan untuk memantau lingkungan yang mensyaratkan perekaman data secara real-time dan terus menerus 24 jam sehari. Penggunaan data logger paling sering adalah untuk memonitoring kecepatan angin, arah mata angin dan juga data menyimpan file 24 jam pada mmc card.



Gambar 2.6 Data Logger pada PLTH Pantai Baru Bantul



### 2.1.3. Jenis-Jenis Turbin Angin

Secara umum penggolongan turbin angin dapat dibagi menjadi 2 jenis, yakni menurut kapasitas terpasangnya dan menurut posisi sumbu rotor.

1. Menurut kapasitas terpasangnya turbin angin dibagi menjadi tiga yaitu : golongan kecil, menengah dan besar (lihat tabel 2.1)

Tabel 2.1 Tabel ragam jenis turbin angin berdasarkan kapasitas

Dasar Kriteria	Penggolongan			
	Kecil		Menengah	Besar
Kapasitas Terpasang	Mikro	Mini		
	Maksimal 100 W	100 W – 10 kW	10 kW – 250 Kw	250 kW – 2 MW

2. Menurut posisi sumbu rotor terbagi dua yaitu :

- a. Turbin angin sumbu horizontal (TASH)

Turbin angin sumbu horizontal (TASH) memiliki poros rotor utama dan generator listrik di puncak menara. Turbin berukuran kecil diarahkan oleh sebuah baling-baling angin (baling-baling cuaca) yang sederhana, sedangkan turbin berukuran besar pada umumnya menggunakan sebuah sensor angin yang digandengkan ke sebuah servo motor. Sebagian besar memiliki sebuah gearbox yang mengubah perputaran kincir yang pelan menjadi lebih cepat berputar. Karena sebuah menara menghasilkan turbulensi di belakangnya, turbin biasanya diarahkan melawan arah anginnya menara. Bilah-bilah turbin dibuat kaku agar mereka tidak terdorong menuju menara oleh angin berkecepatan tinggi. Sebagai tambahan, bilah-bilah itu diletakkan di depan menara pada jarak tertentu dan sedikit dimiringkan. Karena turbulensi menyebabkan kerusakan struktur menara, dan realibilitas begitu penting, sebagian besar

TASH merupakan mesin upwind (melawan arah angin). Meski memiliki permasalahan turbulensi, mesin downwind (menurut jurusan angin) dibuat karena tidak memerlukan mekanisme tambahan agar mereka tetap sejalan dengan angin, dan karena di saat angin berhembus sangat kencang, bilah-bilahnya bisa ditebuk sehingga mengurangi wilayah tiupan mereka dan dengan demikian juga mengurangi resistensi angin dari bilah-bilah itu.



Gambar 2.7 Turbin Angin Sumbu Horizontal

Kelebihan Turbin Angin Sumbu Horizontal (TASH) :

1. Dasar menara yang tinggi membolehkan akses ke angin yang lebih kuat di tempat-tempat yang memiliki geseran angin (perbedaan antara laju dan arah angin) antara dua titik yang jaraknya relatif dekat di dalam atmosfer bumi. Di sejumlah lokasi geseran angin, setiap sepuluh meter ke atas, kecepatan angin meningkat sebesar 20%.

#### Kelemahan Turbin Angin Sumbu Horizontal (TASH) :

1. Menara yang tinggi serta bilah yang panjang sulit diangkut dan juga memerlukan biaya besar untuk pemasangannya, bisa mencapai 20% dari seluruh biaya peralatan turbin angin.
2. TASH yang tinggi sulit dipasang, membutuhkan derek yang sangat tinggi dan mahal serta para operator yangampil.
3. Konstruksi menara yang besar dibutuhkan untuk menyangga bilah-bilah yang berat, gearbox, dan generator.
4. TASH yang tinggi bisa memengaruhi radar airport.
5. Ukurannya yang tinggi merintangijangkauan pandangan dan mengganggu penampilan landskape.
6. Berbagai varian downwind menderita kerusakan struktur yang disebabkan oleh turbulensi.

#### b. Turbin Angin Sumbu Vertikal

Turbin angin sumbu vertikal/tegak (atau TASV) memiliki poros/sumbu rotor utama yang disusun tegak lurus. Kelebihan utama susunan ini adalah turbin tidak harus diarahkan ke angin agar menjadi efektif. Kelebihan ini sangat berguna di tempat-tempat yang arah anginnya sangat bervariasi. TASV mampu mendayagunakan angin dari berbagai arah. Dengan sumbu yang vertikal, generator serta gearbox bisa ditempatkan di dekat tanah, jadi menara tidak perlu menyokongnya dan lebih mudah diakses untuk keperluan perawatan. Tapi ini menyebabkan sejumlah desain menghasilkan tenaga putaran yang berdenyut. Drag (gaya yang menahan pergerakan sebuah benda

padat melalui fluida (zat cair atau gas) bisa saja tercipta saat kincir berputar. Karena sulit dipasang di atas menara, turbin sumbu tegak sering dipasang lebih dekat ke dasar tempat ia diletakkan, seperti tanah atau puncak atap sebuah bangunan. Kecepatan angin lebih pelan pada ketinggian yang rendah, sehingga yang tersedia adalah energi angin yang sedikit. Aliran udara di dekat tanah dan obyek yang lain mampu menciptakan aliran yang bergolak, yang bisa menyebabkan berbagai permasalahan yang berkaitan dengan getaran, diantaranya kebisingan dan bearing wear yang akan meningkatkan biaya pemeliharaan atau mempersingkat umur turbin angin. Jika tinggi puncak atap yang dipasangi menara turbin kira-kira 50% dari tinggi bangunan, ini merupakan titik optimal bagi energi angin yang maksimal dan turbulensi angin yang minimal. Kelebihan Turbin Angin Sumbu Vertikal (TASV) :

1. Tidak membutuhkan struktur menara yang besar.
2. Sebuah TASV bisa diletakkan lebih dekat ke tanah, membuat pemeliharaan bagian-bagiannya yang bergerak jadi lebih mudah.
3. TASV memiliki sudut airfoil (bentuk bilah sebuah baling-baling yang terlihat secara melintang) yang lebih tinggi, memberikan keaerodinamisan yang tinggi sembari mengurangi drag pada tekanan yang rendah dan tinggi.
4. Desain TASV berbilah lurus dengan potongan melintang berbentuk kotak atau empat persegi panjang memiliki wilayah tiupan yang lebih besar untuk diameter tertentu daripada wilayah tiupan berbentuk lingkarannya TASH.

5. TASV memiliki kecepatan awal angin yang lebih rendah daripada TASH. Biasanya TASV mulai menghasilkan listrik pada 10 km/jam (6 m.p.h.)
6. TASV biasanya memiliki tip speed ratio (perbandingan antara kecepatan putaran dari ujung sebuah bilah dengan laju sebenarnya angin) yang lebih rendah sehingga lebih kecil kemungkinannya rusak di saat angin berhembus sangat kencang.
7. TASV bisa didirikan pada lokasi-lokasi dimana struktur yang lebih tinggi dilarang dibangun.
8. TASV yang ditempatkan di dekat tanah bisa mengambil keuntungan dari berbagai lokasi yang menyalurkan angin serta meningkatkan laju angin (seperti gunung atau bukit yang puncaknya datar dan puncak bukit).
9. TASV tidak harus diubah posisinya jika arah angin berubah.
10. Kincir pada TASV mudah dilihat dan dihindari burung.

#### Kekurangan Turbin Angin Sumbu Vertikal (TASV):

1. Kebanyakan TASV memproduksi energi hanya 50% dari efisiensi TASH karena drag tambahan yang dimilikinya saat kincir berputar.
2. TASV tidak mengambil keuntungan dari angin yang melaju lebih kencang di elevasi yang lebih tinggi.
3. Kebanyakan TASV mempunyai torsi awal yang rendah, dan membutuhkan energi untuk mulai berputar.

4. Sebuah TASV yang menggunakan kabel untuk menyanggahnya memberi tekanan pada bantalan dasar karena semua berat rotor dibebankan pada bantalan. Kabel yang dikaitkan ke puncak bantalan meningkatkan daya dorong ke bawah saat angin bertiup.

#### 2.1.4. Prinsip Kerja Turbin Angin

Pembangkit Listrik Tenaga Angin mengkonversikan energi angin menjadi energi listrik dengan menggunakan turbin angin atau kincir angin. Cara kerja dari turbin angin cukup sederhana, energi angin memutar turbin angin, diteruskan dengan memutar rotor pada generator dibagian belakang turbin angin, sehingga akan menghasilkan energi listrik. Energi listrik ini biasanya akan disimpan kedalam baterai sebelum dapat dimanfaatkan.

Pada prinsipnya, energi angin menggunakan persamaan (2.1)

$$E = \frac{1}{2} m v^2$$

(2.1)

Keterangan

$E$  : energi (Joule)

$m$  : massa udara ( $\text{kg/m}^3$ )

$v$  : kecepatan angin (m/s)

Bergeraknya blok udara yang mempunyai penampang seluas  $A$  ( $\text{m}^2$ ) dengan kecepatan  $v$  (m/s), akan didapatkan jumlah massa yang melewati sesuatu tempat pada setiap waktunya dengan persamaan (2.2)

$$M = A \times v \times \rho \quad (2.2)$$

**Keterangan**

$A$  : luas penampang blok udara ( $m^2$ )

$v$  : kecepatan angin (m/s)

$\rho$  : massa jenis udara ( $kg/m^3$ )

Penggabungan kedua persamaan 2.1 dan 2.2 mendapatkan nilai daya yang dihasilkan energi angin seperti persamaan berikut :

$$P = \frac{1}{2} A \rho v^3 \text{ persatuan waktu} \quad (2.3)$$

**Keterangan**

$P$  : daya (Watt)

$\rho$  : massa jenis udara ( $kg/m^3$ )

$A$  : luas penampang ( $m^2$ )

$v$  : kecepatan angin (m/s)

### 2.1.5. Efisiensi Turbin Angin

Turbin angin merupakan suatu cara untuk memperoleh energi listrik dengan cara mengkonversi energi mekanik angin menjadi listrik. Secara teori daya maksimal yang dapat dipanen dari angin adalah :

$$P_a = V \times I \quad (2.4)$$

$$P_{th} = \frac{1}{2} \rho A (V)^3 \quad (2.5)$$

Keterangan :

- $P_a$  = Daya Aktual (watt)
- $P_{th}$  = Daya teoritis yang dihasilkan (watt)
- $\rho$  = Massa jenis udara (1,16 kg/m<sup>3</sup>)
- $A$  = Diameter sapuan motor (m<sup>2</sup>)
- $V$  = Kecepatan angin (m/s)

Besarnya energi yang didapat ( $P_e$ ) adalah sebagai berikut :

$$P_e = 0,593 \times P_{th} \quad (2.6)$$

Oleh karena itu suatu sistem konversi turbin angin tidak pernah mampu memanen lebih dari 60% daya teoritisnya. Biasanya kurang dari 0,593 yang dikarenakan oleh banyak faktor kehilangan lain yang tidak diperhitungkan, seperti faktor gesekan, faktor aerodinami sudu dan rotasi (ushiyama, 1985). Dengan demikian dapat dihitung efisiensi dengan rumus sebagai berikut :

$$\eta = \frac{P_a}{P_e} \times 100\% \quad (2.7)$$

Keterangan :

- $P_a$  = Daya Aktual (watt)
- $P_e$  = Energi yang didapat (watt)



## 2.2 Pembangkit Listrik Tenaga Surya

### 2.2.1. Sel Surya

Sel surya adalah suatu elemen aktif yang mengubah cahaya matahari menjadi energi listrik. Sel surya pada umumnya memiliki ketebalan minimum 0,33 mm, yang terbuat dari irisan bahan semikonduktor dengan kutub positif dan kutub negatif. Prinsip dasar pembuatan sel surya adalah memanfaatkan efek *fotovoltaik*, yaitu suatu efek yang dapat mengubah langsung cahaya matahari menjadi listrik. Prinsip ini ditemukan oleh *Bacquere*, seorang ahli fisika berkebangsaan perancis tahun 1839. Apabila sebuah logam dikenai cahaya dalam bentuk foton dengan frekuensi tertentu, maka energi kinetic dari foton akan menembak ke atom-atom logam tersebut, atom logam yang diradiasi akan melepaskan elektron-elektronnya. Elektron-elektron bebas inilah yang mengalirkan arus dengan jumlah tertentu.



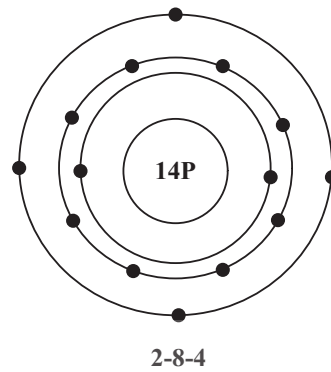
Gambar 2.8 Simbol Sel Surya

Sel surya adalah semikonduktor dimana radiasi surya langsung diubah menjadi energi listrik. Material yang sering digunakan untuk membuat sel surya adalah silikon kristal. Pada saat ini silikon merupakan bahan yang banyak

digunakan untuk pembuatan sel surya. Agar dapat digunakan sebagai bahan sel surya, silikon dimurnikan hingga satu tingkat yang sangat tinggi.

Atom merupakan partikel pembentuk suatu unsur. Atom terdiri dari inti dengan muatan positif yang disebut proton dan neutron yang bermuatan netral. Inti atom dikelilingi sejumlah elektron yang bermuatan negatif. Sebuah atom silikon terdiri dari sebuah inti yang berisi 14 proton dan dikelilingi 14 elektron yang beredar dalam lintasan tertentu. Jumlah maksimum elektron dalam masing-masing lintasan mengikuti pola  $2n^2$ , dengan  $n$  adalah nomor lintasan dari atom (Malvino, 1985:19).

Apabila atom-atom silikon bergabung membentuk zat padat, maka atom-atom itu akan membentuk sebuah pola teratur yang disebut kristal. Setiap atom silikon mempunyai 4 buah elektron valensi dan mempunyai 4 atom tetangga. Setiap atom tetangga memberikan sebuah elektron untuk dipakai bersama-sama dengan atom yang berada ditengah. Atom yang ditengah mendapat elektron tetangga dari tetangga sehingga jumlah elektron menjadi 8 buah, karena inti atom yang berdekatan memiliki muatan positif mereka akan menarik elektron-elektron yang dipakai bersama dan menciptakan gaya yang sama besar tapi berlawanan arah. Penarikan dalam arah berlawanan ini menyebabkan atom-atom terikat dalam ikatan kovalen (Malvino, 1985:21).



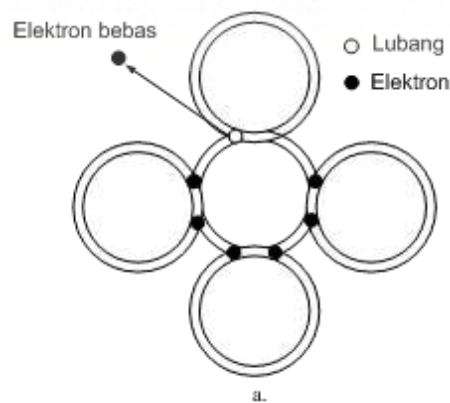
Gambar 2.9 Ikatan Kovalen Kristal Silikon

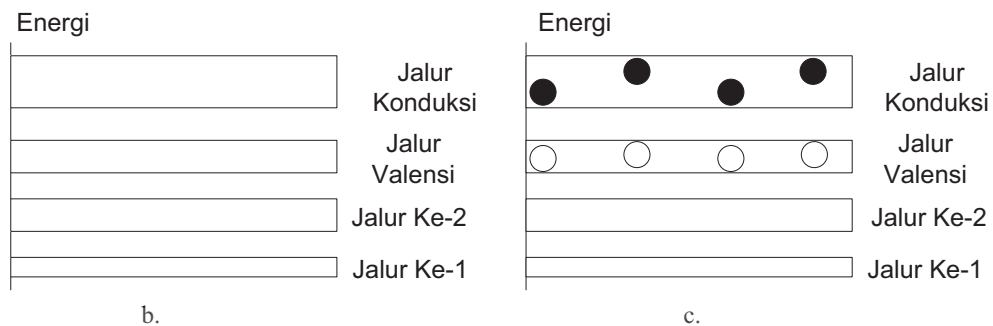
(Malvino, 1985:20)

Keterangan :

- a. Silikon
- b. Ikatan kovalen

Pada suhu nol absolut ( $0^{\circ}\text{K}$ ) semua ikatan kovalen berada dalam keadaan utuh dan lengkap. Apabila suhu naik, beberapa ikatan kovalen akan putus karena adanya energi panas yang diberikan oleh kristal. Hal ini akan mengakibatkan adanya elektron–elektron valensi yang terlepas dari pita valensi memasuki pita konduksi sebagai elektron bebas dan meninggalkan kekosongan tempat (*hole*). Keadaan kekosongan (*hole*) ditunjukkan pada gambar 2.10





Gambar 2.10 Kekosongan pada ikatan kovalen

(Malvino, 1985:23)

Keterangan :

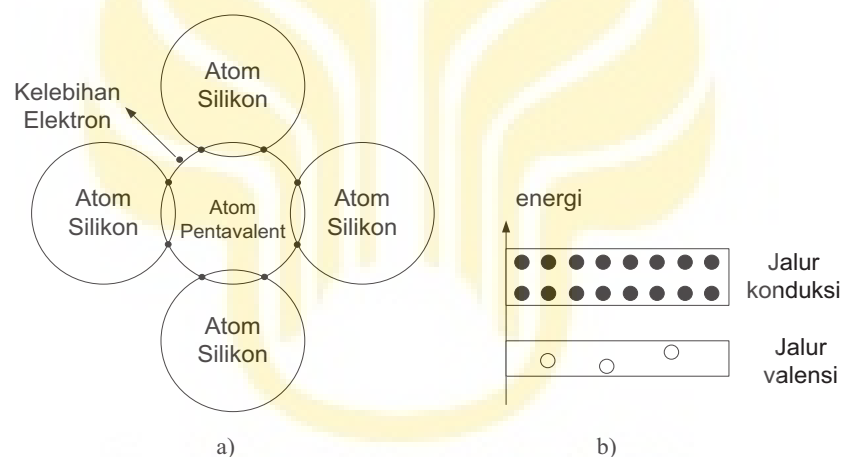
- a. Sebuah lubang dan elektron bebas karena panas
- b. Jalur energi kristal silikon pada suhu  $0^{\circ}$  K
- c. Jalur energi kristal silikon di atas  $0^{\circ}$  K

Dalam keadaan murni (*intrinsic*) dimana setiap atomnya adalah silikon atau germanium saja, semikonduktor tidak dapat dimanfaatkan. Untuk dapat dimanfaatkan dalam piranti elektronika maka daya hantar listriknya dinaikkan dengan menambahkan ketidakmurnian (*dopping*). Semikonduktor yang sudah diberi ketidakmurnian disebut *ekstrinsik* (Malvino, 1985:25)

- a. Jenis semikonduktor negatif (N)

Penambahan ketidakmurnian dengan atom bervalensi lima, misal Arsen, Antimon dan Fosfor pada semikonduktor intrinsik akan menjadi semikonduktor jenis n. Atom bervalensi lima diantara empat atom tetangga seperti pada gambar 2.11 setelah membentuk ikatan kovalen masih memiliki sebuah elektron yang akan beredar dalam jalur konduksi.

Elektron yang berlebihan beredar dalam jalur konduksi ini disebut atom donor. Semikonduktor jenis n banyak terdapat elektron bebas pada jalur konduksi yang disebabkan adanya atom-atom yang bervalensi lima. Diantara atom-atom bervalensi empat dan elektron-elektron bebas yang disebabkan energi termal. Sedangkan pada jalur valensi hanya ada sedikit lubang yang jumlahnya sama dengan elektron bebas yang dihasilkan energi termal. Karena jumlah elektron bebas jauh lebih banyak dari pada lubang, maka elektron bebas menjadi pembawa mayoritas dan lubang pembawa minoritas.



Gambar 2.11 Pemberian ketidakmurnian valensi lima (Malvino, 1985:26)

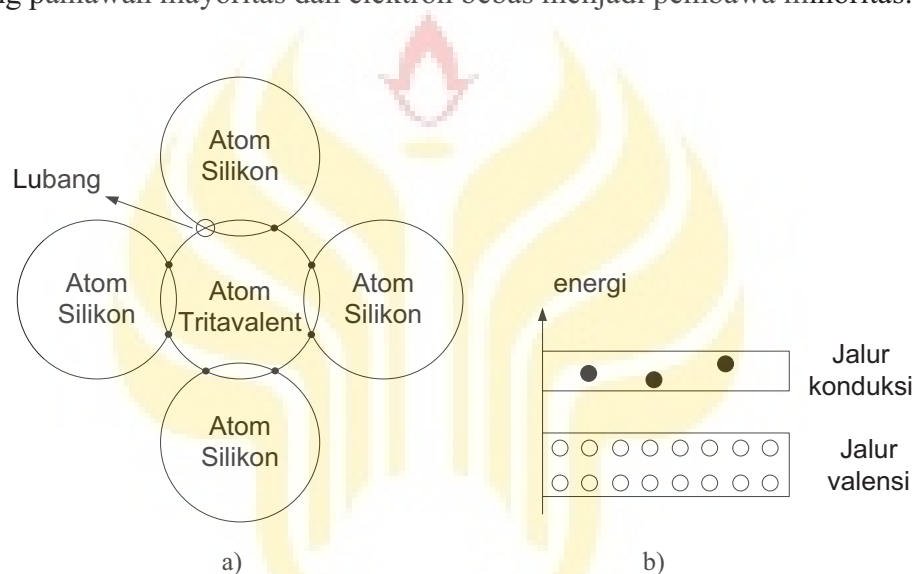
Keterangan :

- a) Pemberian ketidakmurnian bervalensi lima
- b) Elektron–elektron bebas pada jalur konduksi

#### b. Semikonduktor jenis positif (P)

Penambahan ketidakmurnian dengan atom–atom bervalensi tiga, misalnya Galium, Boron dan Aluminium akan menghasilkan semikonduktor jenis p.

Setiap atom trivalen dikelilingi oleh empat atom tetangga seperti pada gambar 2.10 kekosongan satu elektron ini menyebabkan terjadinya lubang yang dapat menerima sebuah elektron sehingga semi konduktor positif disebut sebagai penerima (*akseptor*) seperti pada gambar 2.11 pada jalur valensi jumlah lubang jauh lebih banyak dari pada elektron bebas pada jalur konduksi. Dengan demikian lubang pahlawan mayoritas dan elektron bebas menjadi pembawa minoritas.



Gambar 2.12 Pemberian ketidakmurnian valensi tiga

(Malvino, 1985:26)

Keterangan :

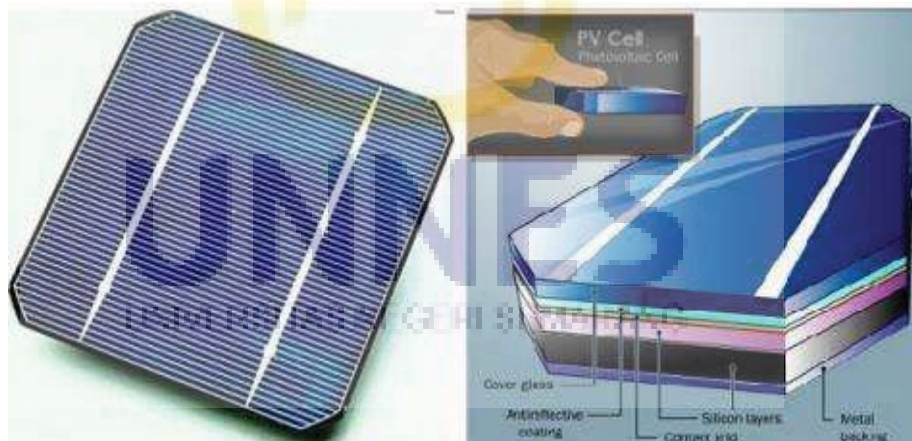
- a) Pembawa ketidakmurnian bervalensi tiga
- b) Lubang–lubang pada jalur valensi

Foton yang mengenai sel surya akan membebaskan “pembawa minoritas” dalam wilayah sambungan p, yang dipaksa melintasi sambungan oleh medan listrik statis. Apabila suatu tahanan beban dihubungkan melintang pada sel surya

tersebut, maka akan mengalir arus listrik dalam sirkuit yang disebut *arus fotovoltanik*.

### 2.2.2. Struktur Sel Surya

Sesuai dengan perkembangan sains&teknologi, jenis-jenis teknologi sel surya pun berkembang dengan berbagai inovasi. Ada yang disebut sel surya generasi satu, dua, tiga dan empat, dengan struktur atau bagian-bagian penyusun sel yang berbeda pula (Jenis-jenis teknologi surya akan dibahas di tulisan “Sel Surya : Jenis-jenis teknologi”). Dalam tulisan ini akan dibahas struktur dan cara kerja dari sel surya yang umum berada dipasaran saat ini yaitu sel surya berbasis material silikon yang juga secara umum mencakup struktur dan cara kerja sel surya generasi pertama (sel surya silikon) dan kedua (thin film/lapisan tipis).



Gambar 2.15 Struktur dari sel surya komersial yang menggunakan material silikon sebagai semikonduktor. (Gambar:HowStuffWorks)

Gambar diatas menunjukkan ilustrasi sel surya dan juga bagian-bagiannya.

Secara umum terdiri dari :

#### 1. Substrat/Metal backing

Substrat adalah material yang menopang seluruh komponen sel surya. Material substrat juga harus mempunyai konduktifitas listrik yang baik karena juga berfungsi sebagai kontak terminal positif sel surya, sehingga umumnya digunakan material metal atau logam seperti aluminium atau molybdenum. Untuk sel surya dye-sensitized (DSSC) dan sel surya organik, substrat juga berfungsi sebagai tempat masuknya cahaya sehingga material yang digunakan yaitu material yang konduktif tapi juga transparan seperti indium tin oxide (ITO) dan flourine doped tin oxide (FTO).

#### 2. Material semikonduktor

Material semikonduktor merupakan bagian inti dari sel surya yang biasanya mempunyai tebal sampai beberapa ratus mikrometer untuk sel surya generasi pertama (silikon), dan 1-3 mikrometer untuk sel surya lapisan tipis. Material semikonduktor inilah yang berfungsi menyerap cahaya dari sinar matahari. Untuk kasus gambar diatas, semikonduktor yang digunakan adalah material silikon, yang umum diaplikasikan di industri elektronik. Sedangkan untuk sel surya lapisan tipis, material semikonduktor yang umum digunakan dan telah masuk pasaran yaitu contohnya material  $\text{Cu(In,Ga)(S,Se)}_2$  (CIGS), CdTe (kadmium telluride), dan amorphous silikon, disamping material-material



semikonduktor potensial lain yang sedang dalam penelitian intensif seperti  $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S},\text{Se})_4$  (CZTS) dan  $\text{Cu}_2\text{O}$  (copper oxide).

Bagian semikonduktor tersebut terdiri dari junction atau gabungan dari dua material semikonduktor yaitu semikonduktor tipe-p (material-material yang disebutkan diatas) dan tipe-n (silikon tipe-n, CdS,dll) yang membentuk p-n junction. P-n junction ini menjadi kunci dari prinsip kerja sel surya. Pengertian semikonduktor tipe-p, tipe-n, dan juga prinsip p-n *junction* dan sel surya akan dibahas dibagian “cara kerja sel surya”.

### 3. Kontak metal / *contact grid*

Selain substrat sebagai kontak positif, diatas sebagian material semikonduktor biasanya dilapiskan material metal atau material konduktif transparan sebagai kontak negatif.

### 4. Lapisan antireflektif

Refleksi cahaya harus diminimalisir agar mengoptimalkan cahaya yang terserap oleh semikonduktor. Oleh karena itu biasanya sel surya dilapisi oleh lapisan anti-refleksi. Material anti-refleksi ini adalah lapisan tipis material dengan besar indeks refraktif optik antara semikonduktor dan udara yang menyebabkan cahaya dibelokkan ke arah semikonduktor sehingga meminimumkan cahaya yang dipantulkan kembali.

## 5. Enkapsulasi / *cover glass*

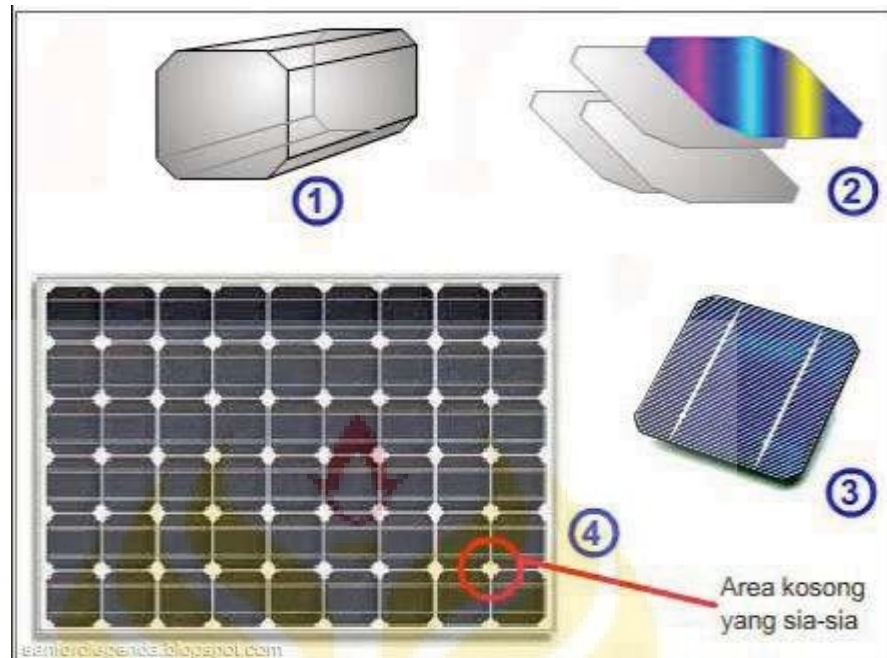
Bagian ini berfungsi sebagai enkapsulasi untuk melindungi modul surya dari hujan atau kotoran.

### 2.2.3. Jenis-jenis sel surya

Jenis-jenis sel surya digolongkan berdasarkan teknologi pembuatannya. Secara garis besar sel surya dibagi dalam tiga jenis, yaitu:

#### 1. *Monocrystalline*

Jenis ini terbuat dari batangan kristal silikon murni yang diiris tipis-tipis. Dengan teknologi seperti ini, akan dihasilkan kepingan sel surya yang identik satu sama lain dan berkinerja tinggi. Sehingga menjadi sel surya yang paling efisien dibandingkan jenis sel surya lainnya, sekitar 15% - 20%. Mahalnya harga kristal silikon murni dan teknologi yang digunakan, menyebabkan mahalnya harga jenis sel surya ini dibandingkan jenis sel surya yang lain di pasaran. Kelemahannya, sel surya jenis ini jika disusun membentuk *solar* modul (panel surya) akan menyisakan banyak ruangan yang kosong karena sel surya seperti ini umumnya berbentuk segi enam atau bulat, tergantung dari bentuk batangan kristal silikonnya, seperti terlihat pada gambar berikut.



Gambar 2.16 Sel Surya *Monocrystalline*

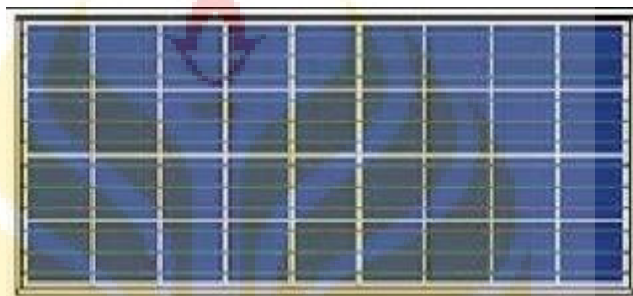
Keterangan gambar:

1. Batangan kristal silikon murni
2. Irisan kristal silikon yang sangat tipis
3. Sebuah sel surya *monocrystalline* yang sudah jadi
4. Sebuah panel surya *monocrystalline* yang berisi susunan sel surya *monocrystalline*. Nampak area kosong yang tidak tertutup karena bentuk sel surya jenis ini.

## 2. *Polycrystalline*

Jenis ini terbuat dari beberapa batang kristal silikon yang dilebur / dicairkan kemudian dituangkan dalam cetakan yang berbentuk persegi. Kemurnian kristal silikonnya tidak semurni pada sel surya *monocrystalline*, karenanya sel surya yang dihasilkan tidak identik satu sama lain dan efisiensinya lebih rendah, sekitar 13% - 16% .

Tampilannya nampak seperti ada motif pecahan kaca di dalamnya. Bentuknya yang persegi, jika disusun membentuk panel surya, akan rapat dan tidak akan ada ruangan kosong yang sia-sia seperti susunan pada panel surya *monocrystalline* di atas. Proses pembuatannya lebih mudah dibanding *monocrystalline*, karenanya harganya lebih murah. Jenis ini paling banyak dipakai saat ini.



Gambar 2.17 Sel Surya *Polycrystalline*

### 3. *Thin Film Solar Cell (TFSC)*

Jenis sel surya ini diproduksi dengan cara menambahkan satu atau beberapa lapisan material sel surya yang tipis ke dalam lapisan dasar. Sel surya jenis ini sangat tipis karenanya sangat ringan dan fleksibel. Jenis ini dikenal juga dengan nama TFPV (*Thin Film Photovoltaic*).



Gambar 2.18 Sel Surya *Thin Film*

Berdasarkan materialnya, sel surya thin film ini digolongkan menjadi:

**1. *Amorphous Silicon (a-Si) Solar Cells.***

Sel surya dengan bahan *Amorphous Silicon* ini, awalnya banyak diterapkan pada kalkulator dan jam tangan. Namun seiring dengan perkembangan teknologi pembuatannya penerapannya menjadi semakin luas. Dengan teknik produksi yang disebut "*stacking*" (susun lapis), dimana beberapa lapis *Amorphous Silicon* ditumpuk membentuk sel surya, akan memberikan efisiensi yang lebih baik antara 6% - 8%.

**2. *Cadmium Telluride (CdTe) Solar Cells.***

Sel surya jenis ini mengandung bahan *Cadmium Telluride* yang memiliki efisiensi lebih tinggi dari sel surya *Amorphous Silicon*, yaitu sekitar: 9% - 11%.

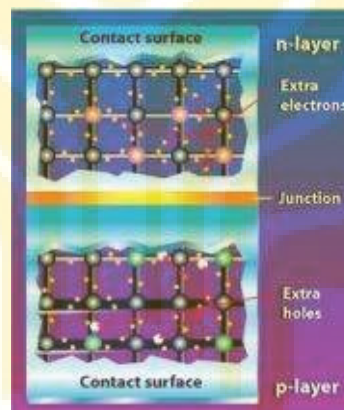
**3. *Copper Indium Gallium Selenide (CIGS) Solar Cells.***

Dibandingkan kedua jenis sel surya thin film di atas, CIGS sel surya memiliki efisiensi paling tinggi yaitu sekitar 10% - 12%. Selalin itu jenis ini tidak mengandung bahan berbahaya *Cadmium* seperti pada sel surya CdTe.

#### **2.2.4. Prinsip Kerja Sel Surya**

Sel surya konvensional bekerja menggunakan prinsip p-n junction, yaitu junction antara semikonduktor tipe-p dan tipe-n. Semikonduktor ini terdiri dari ikatan-ikatan atom yang dimana terdapat elektron sebagai penyusun dasar.

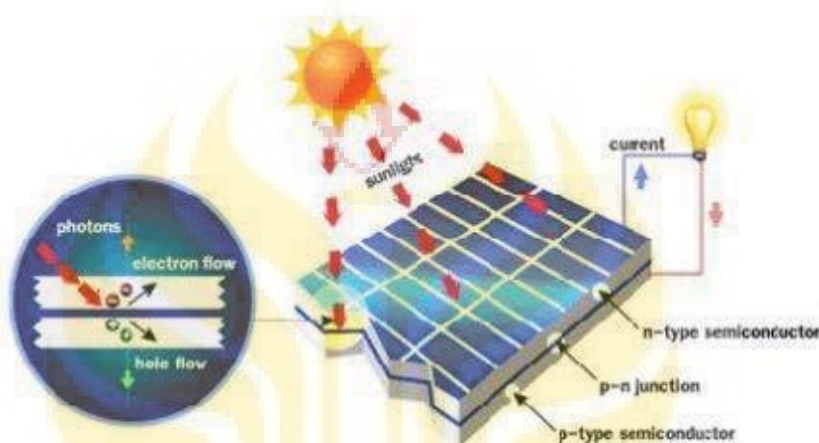
Semikonduktor tipe-n mempunyai kelebihan elektron (muatan negatif) sedangkan semikonduktor tipe-p mempunyai kelebihan hole (muatan positif) dalam struktur atomnya. Kondisi kelebihan elektron dan hole tersebut bisa terjadi dengan mendoping material dengan atom dopant. Sebagai contoh untuk mendapatkan material silikon tipe-p, silikon didoping oleh atom boron, sedangkan untuk mendapatkan material silikon tipe-n, silikon didoping oleh atom fosfor. Ilustrasi dibawah menggambarkan junction semikonduktor tipe-p dan tipe-n.



*Gambar 2.19 Junction antara semikonduktor tipe-p (kelebihan hole) dan tipe-n (kelebihan elektron). (Gambar : eere.energy.gov)*

Peran dari p-n junction ini adalah untuk membentuk medan listrik sehingga elektron (dan hole) bisa diekstrak oleh material kontak untuk menghasilkan listrik. Ketika semikonduktor tipe-p dan tipe-n terkontak, maka kelebihan elektron akan bergerak dari semikonduktor tipe-n ke tipe-p sehingga membentuk kutub positif pada semikonduktor tipe-n, dan sebaliknya kutub negatif pada semikonduktor tipe-p. Akibat dari aliran elektron dan hole ini maka terbentuk medan listrik yang mana ketika cahaya matahari mengenai susuna p-n

junction ini maka akan mendorong elektron bergerak dari semikonduktor menuju kontak negatif, yang selanjutnya dimanfaatkan sebagai listrik, dan sebaliknya hole bergerak menuju kontak positif menunggu elektron datang, seperti diilustrasikan pada gambar dibawah.



Gambar 2.20 Ilustrasi cara kerja sel surya dengan prinsip p-n junction.

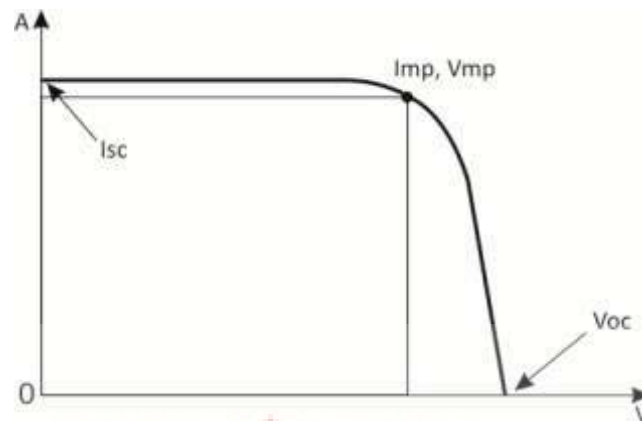
(Gambar : sun-nrg.org)

### 2.2.5. Karakteristik Sel Surya

Total pengeluaran listrik (*wattage*) dari *solar cell* panel adalah sebanding dengan voltase/ tegangan operasi dikalikan dengan arus operasi saat ini. *Solar cell* panel dapat menghasilkan arus dari voltase yang berbeda-beda. Hal ini berbeda dengan baterai, yang menghasilkan arus dari voltase yang relatif konstan.

Karakteristik output dari *solar cell* panel dapat dilihat dari kurva performansi, disebut I-V curve. I-V curve menunjukkan hubungan antara arus dan voltase.





Gambar 2.21 Kurva I-V

Gambar diatas menunjukkan tipikal kurva I-V. Voltase (V) adalah sumbu horizontal. Arus (I) adalah sumbu vertikal. Kebanyakan kurva I-V diberikan dalam Standar Test Conditions (STC) 1000 watt per meter persegi radiasi (atau disebut satu matahari puncak/ one peak sun hour) dan 25 derajat Celcius/ 77 derajat Fahrenheit suhu *solar cell* panel. Sebagai informasi STC mewakili kondisi optimal dalam lingkungan laboratorium.

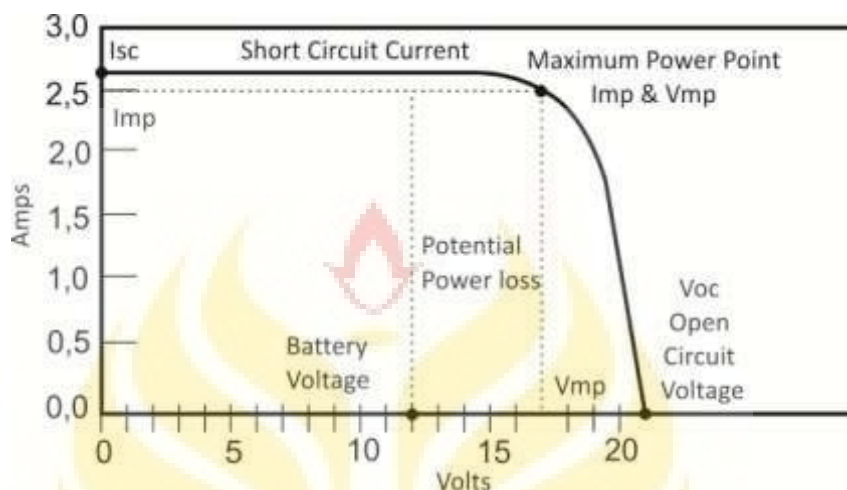
Kurva I-v terdiri dari 3 hal yang penting:

### 1. *Maximum Power Point (Vmp&Imp)*

Pada kurva I-V, *Maximum Power Point*  $V_{mp}$  dan  $I_{mp}$ , adalah titik operasi, dimana maksimum pengeluaran/ *output* yang dihasilkan oleh *solar cell* panel saat kondisi operasional. Dengan kata lain,  $V_{mp}$  dan  $I_{mp}$  dapat diukur pada saat solar cell panel diberi beban pada 25 derajat Celcius dan radiasi 1000 watt per meter persegi. Pada kurva di atas voltase 17 volts adalah  $V_{mp}$ , dan  $I_{mp}$  adalah 2,5 ampere. Jumlah watt pada batas maksimum ditentukan dengan mengalikan  $V_{mp}$  dan  $I_{mp}$ , maksimum jumlah watt pada STC adalah 43 watt.



Output berkurang sebagaimana voltase menurun. Arus dan daya output dari kebanyakan modul *solar cell* panel menurun sebagaimana tegangan/ voltase meningkat melebihi *maximum power point*.



Gambar 2.22 Modul I-V curve (12V DC nominal)

## 2. *Open Circuit Voltage* (Voc)

*Open Circuit Voltage* Voc, adalah kapasitas tegangan maksimum yang dapat dicapai pada saat tidak adanya arus (*current*). Pada kurva I-V, Voc adalah 21 volt. Daya pada saat Voc adalah 0 watt.

Voc *solar cell* panel dapat diukur dilapangan dalam berbagai macam keadaan. Saat membeli modul, sangat direkomendasikan untuk menguji voltase untuk mengetahui apakah cocok dengan spesifikasi pabrik. Saat menguji voltase dengan multimeter digital dari terminal positif ke terminal negatif. *Open Circuit Voltage* (Voc) dapat diukur pada pagi hari dan sore hari.

### 3. *Short Circuit Current (Isc)*

*Short Circuit Current Isc*, adalah maksimum *output* arus dari *solar cell* panel yang dapat dikeluarkan (*output*) di bawah kondisi dengan tidak ada resistansi atau *short circuit*. Pada kurva I-V diatas menunjukkan perkiraan arus 2,65 Ampere. Daya pada Isc adalah 0 watt. *Short circuit current* dapat diukur hanya pada saat membuat koneksi langsung terminal positif dan negatif dari modul *solar cell* panel.

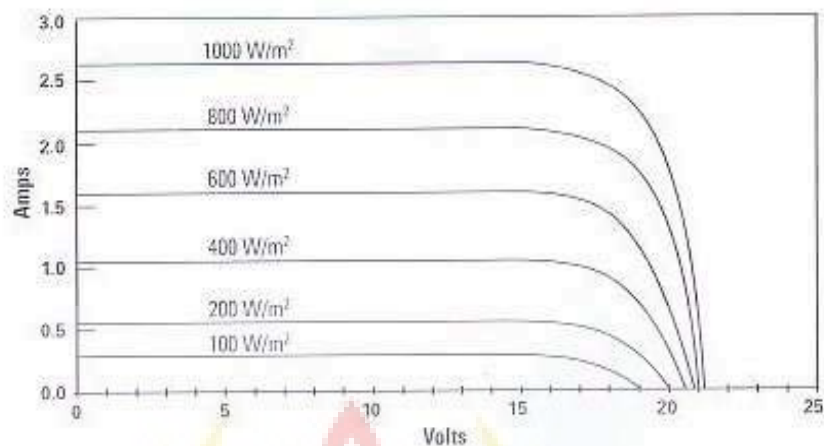
#### 2.2.6. Faktor-faktor yang Mempengaruhi Sel Surya

Empat hal utama yang mempengaruhi unjuk kerja/ performansi dari modul *solar cells* panel:

##### 1. Resistansi Beban

Tegangan baterai adalah tegangan operasi dari *solar cell* panel module, apabila baterai dihubungkan langsung dengan *solar cell* panel modul. Sebagai contoh, umumnya baterai 12 Volt, voltase/ tegangan baterai biasanya antara 11.5 sampai 15 Volts. Untuk dapat mencharge baterai, *solar cell* panel harus beroperasi pada voltase yang lebih tinggi daripada voltase baterai bank.

Effisiensi paling tinggi adalah saat *solar panel cell* beroperasi dekat pada *maximum power point*. Pada contoh di atas, tegangan baterai harus mendekati tegangan  $V_{mp}$ . Apabila tegangan baterai menurun di bawah  $V_{mp}$ , ataupun meningkat di atas  $V_{mp}$ , maka effisiensi nya berkurang.



Gambar 2.23 Karakteristik arus dan tegangan sel surya

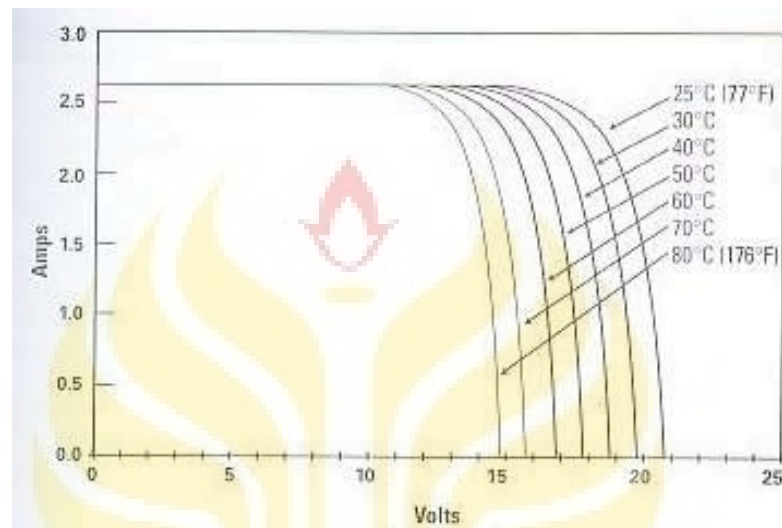
## 2. Intensitas Cahaya Matahari

Semakin besar intensitas cahaya matahari secara proporsional akan menghasilkan arus yang besar. Seperti gambar berikut, tingkatan cahaya matahari menurun, bentuk dari kurva I-V menunjukkan hal yang sama, tetapi bergerak ke bawah yang mengindikasikan menurunnya arus dan daya. Voltase adalah tidak berubah oleh bermacam-macam intensitas cahaya matahari.

## 3. Suhu Solar Cell Panel

Sebagaimana suhu solar cell panel meningkat di atas standar suhu normal 25 derajat Celcius, efisiensi solar cell panel modul efisiensi dan tegangan akan berkurang. Gambar di bawah ini mengilustrasikan bahwa, sebagaimana, suhu sel meningkat di atas 25 derajat Celcius (suhu solar cell panel module, bukan suhu udara), bentuk kurva I-V tetap sama, tetapi bergeser ke kiri sesuai dengan kenaikan suhu solar cell panel, menghasilkan tegangan dan daya yang lebih kecil. Panas dalam kasus ini, adalah hambatan listrik untuk aliran elektron.

Untuk itu aliran udara di sekeliling solar cell panel module sangat penting untuk menghilangkan panas yang menyebabkan suhu *solar cell* panel yang tinggi.



Gambar 2.24 Pengaruh temperatur terhadap daya *solar cell*

#### 4. Shading/ Teduh/ Bayangan

*Solar cell* panel, terdiri dari beberapa silikon yang diserikan untuk menghasilkan daya yang diinginkan. Satu silikon menghasilkan 0.46 Volt, untuk membentuk *solar cell* panel 12 Volt, 36 silikon diserikan, hasilnya adalah  $0.46 \text{ Volt} \times 36 = 16.56$ .

Shading adalah dimana salah satu atau lebih sel silikon dari solar cell panel tertutup dari sinar matahari. Shading akan mengurangi pengeluaran daya dari solar cell panel. Beberapa jenis solar cell panel module sangat terpengaruh oleh shading dibandingkan yang lain. Tabel di bawah ini menunjukkan efek yang sangat ekstrim pengaruh *shading* pada satu sel dari modul panel surya single *crystalline* yang tidak memiliki internal

*bypass diodes*. Untuk mengatasi hal tersebut *solar cell* panel dipasang *bypass diode*, *bypass diode* untuk arus mengalir ke satu arah, mencegah arus ke silikon yang kena bayangan.

### 2.2.7. Efisiensi Sel Surya

Efisiensi sel surya adalah rasio output listrik dari sel surya untuk energi insiden dalam bentuk sinar matahari. Efisiensi konversi energi (simbol efisiensi) dari sel surya adalah persentase energi surya untuk yang sel terkena tidak diubah informasi menjadi energi listrik. Ini dihitung adalah dengan membagi output daya sel (dalam watt) pada maksimum powerpoint ( $P_m$ ) oleh cahaya masukan ( $E$ , dalam  $W/m^2$ ) dan luas permukaan sel surya ( $A_c$  di  $m^2$ ). maka analisis data untuk daya masukan dari radiasi matahari ( $P_{in}$ ) dinyatakan sebagai.

$$P_{in} = I \times A_c \quad (2.8)$$

Analisis data untuk daya listrik keluaran panel surya ( $P_{out}$ ) dinyatakan sebagai,

$$P_{out} = V_{out} \times i_{out} \quad (2.9)$$

dengan ketidakpastian  $V_{out}$  dan  $i_{out}$  diperoleh dari hasil penaksiran (Taylor, 1982).

Dan untuk analisis data efisiensi konversi energi ( $\eta$ ) dinyatakan dalam persamaan.

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (2.10)$$

PLTH Pantai Baru Bantul memiliki anemometer sebagai sensor untuk mendeteksi berapa kisaran kecepatan angin yang terjadi untuk menggerakkan turbin angin yang berada di PLTH Pantai Baru Bantul. Anemometer yang berada

di PLTH Pantai Baru Bantul sendiri berada setinggi 12 meter yang terletak di atas rumah kontrol PLTH Pantai Baru Bantul, sedangkan tinggi semua turbin angin yang terpasang adalah 15 meter sehingga terjadi perbedaan ketinggian antara sensor anemometer dengan tinggi turbin.

Pada dasarnya untuk keperluan perancangan pembangunan turbin angin di suatu lokasi tertentu data dari tampilan display anemometer terdekat seperti ada pada PLTH Pantai Baru Bantul dapat digunakan sebagai dasar estimasi awal potensi energi angin yang tersedia. Untuk keperluan perancangan rinci yang baik, maka sebaiknya tetap dilakukan pengukuran pada calon-calon lokasi yang direncanakan. Selain itu perlunya mengetahui kondisi angin pada suatu lokasi tertentu. Hal ini dikarenakan kondisi angin pada suatu lokasi tertentu sangat dipengaruhi oleh suhu setempat, bentuk topografi, tetumbuhan dan pepohonan, serta berbagai jenis bangunan yang ada disekitarnya. Semakin banyak dan tinggi pepohonan dan bangunan di permukaan, maka semakin besar gaya gesek yang dialami oleh angin terutama pada angin dengan ketinggian 1-3 km. Akibat dari gaya gesek yang terjadi maka akan mengurangi kecepatan angin yang terjadi.

PLTH Pantai Baru Bantul memiliki turbin dengan ketinggian 15 meter, namun hasil dari data yang diperoleh hanya setinggi 12 meter, maka untuk mengatasinya dapat dipakai data hasil pengukuran kecepatan angin pada ketinggian 12 meter tersebut untuk mencari kecepatan angin pada ketinggian 15 meter dengan menggunakan persamaan berikut:

$$\frac{v_2}{v_1} = \left(\frac{z_2}{z_1}\right)^a$$

(2.11)

## Keterangan

$V_1$  : kecepatan angin pada ketinggian pertama (m/s)

$V_2$  : kecepatan angin pada ketinggian kedua (m/s)

$Z_1$  : referensi ketinggian pertama (m)

$Z_2$  : referensi ketinggian kedua (m)

A : koefisien gesek permukaan tanah

Koefisien gesek permukaan tanah atau kekasaran ditetapkan secara empirik, dimana semakin kasar suatu permukaan, maka semakin tinggi nilai koefisien geseknya begitu sebaliknya, seperti yang ditampilkan pada tabel berikut:

Tabel 2.3 Koefisien gesek berbagai jenis permukaan (Patel, 1999)

Jenis permukaan	Koefisien gesek
Danau, lautan, daratan keras dan rata	0,10
Lahan dengan ilalang tinggi	0,15
Tanaman pertanian tinggi dan pepohonan rendah	0,20
Desa atau pemukiman dengan banyak pepohonan	0,25
Kota kecil dengan sejumlah pepohonan	0,30
Daerah kota dengan bangunan-bangunan tinggi	0,40

## **BAB V**

### **PENUTUP**

#### **5.1 Kesimpulan**

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Kinerja Kincir Angin dengan daya listrik keluaran rerata pada pengukuran sebesar 80,6 Watt dan efisiensi energi rerata pada pengukuran sebesar 46%.
2. Efisiensi dari kincir angin berkapasitas 2,5 kW adalah 46%.
3. Kinerja Panel Surya dengan daya listrik keluaran rerata pada pengukuran sebesar 143,8 Watt dan efisiensi energi rerata pada pengukuran sebesar 63,6%.
4. Efisiensi dari Panel Surya berkapasitas 4 kW adalah 63,6%
5. Jadi Efisiensi Hybrid PLTH adalah 54,8%

#### **5.2 Saran**

Hal-hal yang perlu disarankan untuk penelitian selanjutnya antara lain:

1. Perlu dilakukan penelitian minimal selama 6 bulan, atau lebih baik lagi selama 1 tahun, agar dapat memperoleh hasil kinerja PLTH yang optimal.
2. Perlu adanya pemeliharaan berkala yang dilakukan pada masing-masing komponen pada PLTH Pantai Pandansimo untuk menjaga lifetime dari system tersebut.
3. Sebaiknya pengambilan data kincir angin dan panel surya dilakukan dengan cepat, tepat, dan akurat karena labilnya cuaca sangat mempengaruhi hasil pengamatan.
4. Perlu merekrut SDM yang mampu memperbaiki komponen-komponen rusak pada PLTH sehingga tidak mengganggu dalam kinerja PLTH itu sendiri.



## DAFTAR PUSTAKA

- Ditjen Energi Baru Terbarukan dan Konversi Energi., 2014., “*Statistik Energi Baru Terbarukan dan Konversi Energi*”, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, Jakarta.
- Gunawan, Arief. 2013. *Studi Pengaruh Sudut Kemiringan Dari Bidang Horizontal Dan Orientasi Utara Selatan Panel Surya Terhadap Kinerjanya Di Pembangkit Listrik Tenaga Hybrid Pantai Baru Pandansimo, Bantul, Yogyakarta*. Skripsi. Jurusan Fisika, FMIPA, UGM, Yogyakarta.
- Malvino. 1985. *Prinsip-Prinsip Elektronika*. Jakarta: Erlangga.
- Munandar, Z. dan Gunawan, A., 2012., “*Studi Kinerja Turbin Angin dan Sel Surya pada Instalasi Pembangkit Listrik Tenaga Hybrid di Pantai Pandansimo, Bantul, DIY*”, Laporan Kerja Praktek., FMIPA UGM., Yogyakarta.
- Nurchahyo, P., Tri. 2011. *Mengenal Listrik*. PT Pustaka Insan Madeni. Yogyakarta.
- Nurhayati, Laila. 2014. *Trainer Kelistrikan AC Mobil sebagai Alat Peraga untuk Mendukung Mata Pelajaran Produktif TPTU di SMK Negeri 2 Kendal Tahun 2014*. Skripsi. Jurusan Teknik Eektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Semarang. Semarang.
- Said Sunardiyo. 2014. *Kinerja Tenaga Laboratorium Rekayasa di Fakultas Teknik Universitas Negeri Semarang dan Faktor-Faktor Dominan Yang Mempengaruhinya*.
- Setiawan. M., Eko. 2014. *Pengembangan Trainer Pembangkit Listrik Tenaga Surya sebagai Media Pembelajaran dalam Praktek Mata Pelajaran Pembangkit Listrik Tenaga Surya di SMK Negeri 1 Magelang*. Skripsi. Jurusan Teknik Eektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Semarang. Semarang.
- Sudana. I. Made, dkk, 2014. *Pedoman Penulisan Tugas Akhir atau Skripsi dan Artikel Ilmiah*. Fakultas Teknik Universitas Negeri Semarang.
- Sugiyono. 2012. *Metode Penelitian Kuantitatif Kualitatif dan R&D*. Bandung : Alfabeta.

Wijaya, Taufik Chemistryadha. 2014. "*Studi Energi Sistem 48 Volt di Pembangkit Listrik Hybrid Pandansimo, Bantul D.I.Yogyakarta*". Makalah Seminar Kerja Praktek. Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro.

