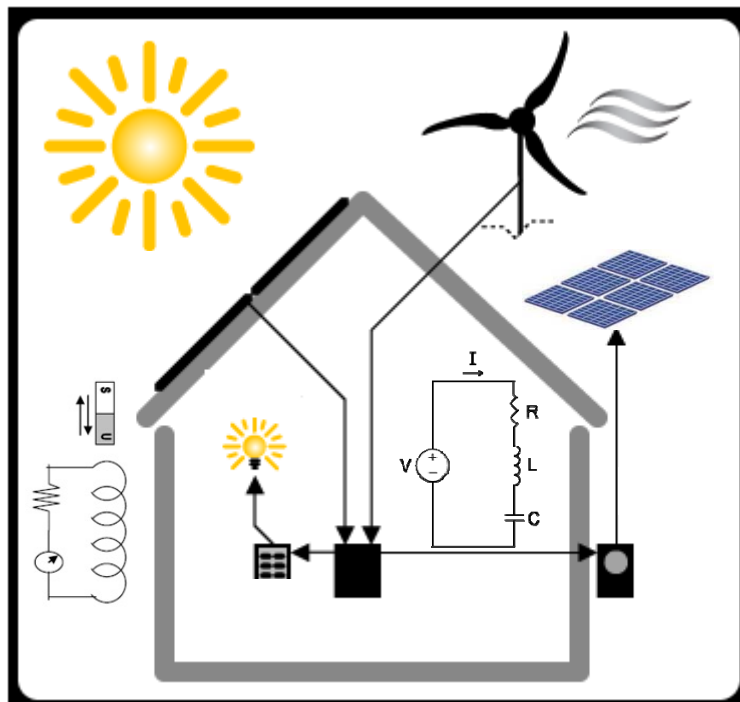


Diktat

# ENERGI TERBARUKAN



*Elieser Tarigan*

UNIVERSITAS SURABAYA

## **PENGANTAR**

Buku ini merupakan salah satu dari rangkaian buku ajar h yang diterbitkan oleh Fakultas Teknik Universitas Surabaya. Buku ini terutama diperuntukkan bagi mahasiswa Fakultas Teknik Universitas Surabaya yang mengikuti kuliah Energi Terbarukan dengan beban 2 SKS

Buku ini terdiri dari 8 bab yang disesuaikan dengan silabus perkuliahan dengan konten membahas teori dan aplikasi energi dan berbagai sumber energi terbarukan termasuk energi surya, angin, air, biomass, panas bumi, dan energi laut.

Penulis berterimakasih kepada semua pihak yang telah mendukung diterbitkannya diktat ini. Disadari bahwa buku ini masih jauh dari sempurna, sehingga segala kritik yang membangun dari pembaca dan pengguna diktat ini sangat diharapkan. Semoga diktat ini dapat bermanfaat.

Surabaya, Oktober 2020  
Penyusun

# DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR

BAB 1. ENERGI DAN SUMBER-SUMBER ENERGI

BAB 2. ENERGI SURYA –TERMAL

BAB 3. ENERGI SURYA – LISTRIK

BAB 4. ENERGI GRAVITASI AIR

BAB 5. ENERGI ANGIN

BAB 6. ENERGI BIOMASSA

BAB 7. ENERGI PANAS BUMI

BAB 8. ENERGI LAUT

# **BAB** **1**

# **ENERGI DAN SUMBER** **ENERGI**

## **1.1 ENERGI DALAM PERADAPAN MANUSIA**

Perkembangan peradaban manusia tidak pernah lepas dari proses pemanfaatan energi. Energi dari matahari secara langsung dan pemanfaatan kayu bakar telah menjadi sumber energi penting dan utama sejak awal sejarah manusia. Sejak sekitar 5000 tahun yang lalu manusia mulai menggunakan angin sebagai penggerak perahu untuk alat transportasi. Kemudian sekitar 2.500 tahun yang lalu, manusia mulai menggunakan kincir angin dan air untuk mengolah hasil panen pertanian. Pada perkembangannya kincir-kincir tersebut juga digunakan untuk mengangkat air ke permukaan yang lebih tinggi, demikian juga untuk alat bantu dalam proses pengrajinan kayu.



**Gambar 1.1.**Orang Mesir Kuno telah memanfaatkan energi angin untuk transportasi air sejak 3000 tahun yang lalu.

Sekitar 3000 tahun yang lalu orang Mesir telah menggunakan minyak tanah untuk penerangan melalui pembakaran. Minyak tanah tersebut dikumpulkan dari permukaan air di tempat tertentu dimana minyak mengambang (terapung) dipermukaan. Orang Amerika Asli telah mengenal batubara untuk dibakar dan menggunakannya pada proses pembentukan bejana atau pot dari tanah liat. Orang Cina kuno memanfaatkan energi dari pembakaran gas alam untuk menguapkan air laut untuk memperoleh garam. Gas alam diperoleh dari dan

dialirkan dari sumur-sumur dangkal. Pada saat yang sama, orang mulai menggunakan energi panas bumi (geothermal) untuk kebutuhan energi panas. Mereka mengalirkan air panas dari mata air panas ke dalam rumah mereka untuk keperluan pemanasan. Secara bertahap manusia belajar memanfaatkan berbagai sumber energi yang berbeda. Meski demikian hingga 150 tahun yang lalu, cahaya matahari dan kayu bakar masih merupakan sumber energi utama bagi umat manusia. Bahkan, hingga kini di beberapa tempat belahan bumi, situasi tersebut masih berlangsung.

Nyata bahwa sepanjang sejarah peradaban manusia berkaitan dengan perkembangan pemanfaatan energi. Bahkan kemajuan suatu negara diindikasikan dengan tingkat konsumsi energi. Pada jaman ini, ketergantungan manusia pada energi menyangkut pada hampir seluruh aspek kehidupan. Sulit dibayangkan jika saat ini kita harus hidup tanpa listrik, tanpa alat transportasi atau kendaraan, dan berbagai aktivitas lainnya.

## **1.2 SUMBER ENERGI TAK TERBARUKAN**

Sumber energi tak terbarukan adalah sumber energi yang ketersediaannya terbatas dan tidak terjadi proses pembentukan kembali di alam, ataupun proses pembentukannya memerlukan waktu yang sangat lama, sehingga jika dipakai terus menerus kemungkinan bisa habis. Contoh sumber energi tak terbarukan adalah energi fosil seperti minyak bumi, batu bara, dan gas alam.

### **Minyak Bumi**

Minyak bumi diperoleh dari dalam perut bumi dengan mengebor kulit bumi pada sumur minyak bumi. Minyak bumi yang diperoleh selanjutnya dibawa ke kilang pengolahan untuk diproses secara bertingkat menghasilkan berbagai jenis bahan bakar. Produk olahan minyak bumi, sering disebut bahan bakar minyak (BBM), terdiri dari beberapa jenis termasuk gas, bensin, minyak tanah dan solar. Minyak tanah umumnya digunakan untuk memasak, sedangkan bensin dan solar digunakan untuk bahan bakar kendaraan bermotor. Disamping itu, BBM khususnya solar juga digunakan sebagai bahan bakar pembangkit listrik.

Minyak bumi mempunyai kelebihan yaitu mudah digunakan dan disimpan serta harga relatif murah dibanding bahan bakar non fosil. Namun minyak bumi memiliki cadangan yang terbatas. Disamping itu sisa-sisa pembakaran minyak bumi menghasilkan gas-gas pencemar yang berbahaya bagi kesehatan serta mempunyai peran besar terhadap pemanasan global.

### **Gas Alam.**

Gas alam diproduksi dari sumur gas. Dari sumur produksi, gas alam umumnya dialirkan melalui pipa menuju lokasi pemanfaatannya. Gas alam dapat juga dicairkan dan kemudian ditempatkan pada tangki gas alam cair untuk kemudian diangkut dengan alat transportasi baik darat, laut maupun udara. Gas alam yang dicairkan sering disebut dengan LPG (*Liquid Petroleum Gas*). Gas alam dapat dimanfaatkan bakar turbin gas untuk pembangkit listrik. Untuk keperluan rumah tangga, gas alam dipakai untuk memasak. Gas alam juga sering digunakan sebagai bahan baku industri.

Jika dibandingkan dengan bahan bakar fosil lainnya, gas alam merupakan bahan bakar paling bersih karena batu bara menghasilkan lebih sedikit emisi karbon dioksida dan sulfur.

Kekurangan gas alam adalah

- Gas alam merupakan sumber energi tidak terbarukan sehingga akan habis
- Produksinya memerlukan investasi yang cukup besar

### **Batubara**

Batu bara termasuk kedalam jenis bahan bakar fosil. Batu bara dari dalam bumi melalui penambangan bawah tanah atau open-pit. Batu bara berbentuk padat, sehingga dari penambangan dapat diangkut dengan truk atau tongkang. Pada umumnya batu bara digunakan sebagai bahan bakar pusat pembangkit listrik. Panas yang dihasilkan dari pembakaran batubara digunakan untuk menghasilkan uap yang bertekanan tinggi yang menggerakkan turbin pembangkit listrik. Batu bara juga sering dimanfaatkan sebagai bahan bakar pada industri.

Kelebihan batubara adalah harganya lebih murah dan ketersediannya lebih banyak jika dibandingkan dengan bahan bakar lainnya seperti minyak bumi dan gas alam. Sementara beberapa kekurangannya adalah:

- ketersediannya terbatas sehingga jika dipakai terus akan habis
- pada pembakarannya menghasilkan zat-zat yang berbahaya bagi kesehatan
- pada pembakarannya juga menghasilkan zat-zat yang dapat menimbulkan hujan asam,
- batu bara menghasilkan karbondioksida lebih besar dibanding bahan bakar fosil lainnya.

### 1.2.1 Dampak Pemanfaatan Energi Fosil

Ditengarai bahwa kegiatan eksploitasi dan pemakaian sumber energi dari alam untuk memenuhi kebutuhan manusia menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan misalnya udara dan iklim, air dan tanah. Pada proses pembakaran sumber energi fosil untuk menghasilkan energi, terbentuk juga gas-gas yang menyebabkan pencemaran udara seperti karbon dioksida (CO<sub>2</sub>), nitrogen oksida (NO<sub>x</sub>), dan sulfur dioksida (SO<sub>2</sub>). Gas-gas tersebut berkontribusi pada terjadinya hujan asam, smog dan pemanasan global.

### 1.2.2 Energi Terbarukan

Sumber energi terbarukan adalah sumber energi yang proses pembentukannya terjadi secara berkelanjutan sehingga ketersediannya melimpah dan tidak pernah habis. Contoh-contoh sumber energi terbarukan adalah energi matahari, energi dari biomassa, energi angin, gravitasi air, energi panas bumi, energi gelombang dan lain – lain. Jenis – Jenis sumber energi terbarukan dan teknologinya dibahas lebih detail pada bab-bab selanjutnya dalam buku ini.

## 1.3 FISIKA ENERGI

### 1.3.1. Kerja dan Energi

Energi mempunyai pengertian yang sangat luas. Dalam fisika, energi merupakan besaran yang secara langsung tidak kelihatan. Dalam pengertian sederhana energi adalah kemampuan untuk melakukan kerja. Dalam hal ini kerja berkaitan dengan aksi dari suatu gaya terhadap benda pada suatu lintasan tertentu. Kerja merupakan kemampuan untuk menarik atau mendorong suatu benda sedemikian hingga benda tersebut dapat berpindah. Kerja merupakan perubahan energi yang berhubungan dengan gaya, dimana gaya tersebut sebagai penyebab perpindahan. Jika suatu gaya bekerja pada benda sedemikian sehingga benda tersebut berpindah, maka dikatakan bahwa gaya tersebut melakukan kerja pada benda. Jika sebuah gaya yang besarnya konstan bekerja pada sebuah benda, dan mengakibatkan benda itu berpindah searah dengan arah kerja gaya maka gaya tersebut telah melakukan kerja (perhatikan ilustrasi pada Gambar 5.2 a.). Secara matematis kerja yang dilakukan oleh gaya ditulis:

$$W = F.S.....(5.1)$$

Dimana:

W: Besar Usaha (kg . m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>, joule atau Newton . meter)

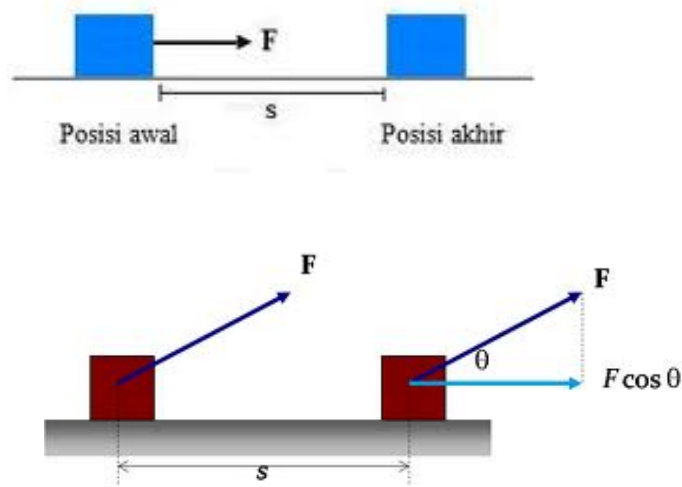
F: Besar komponen gaya pada arah perpindahan (Newton)

S: Besar perpindahan (m)

Jika gaya membentuk sudut tertentu, misalnya  $\theta$ , dengan arah perpindahan benda, maka besarnya kerja yang dilakukan oleh gaya tersebut perkalian antara komponen gaya searah lintasan dengan perpindahan benda (perhatikan ilustrasi pada Gambar 5.2 b). Secara matematis ditulis

$$W = F \cdot S \cos \theta \dots \dots \dots (5.2)$$

Kerja merupakan hasil perkalian titik (*dot product*) antara dua besaran vektor: gaya dan perpindahan, sehingga kerja merupakan besaran skalar. Pada kondisi dimana gaya tidak konstan maka besarnya kerja oleh gaya dapat ditentukan dengan perhitungan dengan integral (dalam buku ini tidak dibahas).



**Gambar 1.2.** Kerja oleh gaya konstan: gaya searah lintasan (atas) ;  
Gaya membentuk sudut dengan lintasan (bawah)

### 1.3.2. Jenis-Jenis Energi

Secara garis besar energi dibagi menjadi 2 jenis, yaitu **energi potensial** dan **energi kinetik**. Energi potensial merupakan energi yang dimiliki oleh sebuah benda akibat posisinya. Sementara energi kinetik merupakan energi yang dimiliki oleh benda karena gerakannya.

#### Energi Potensial

Beberapa jenis energi potensial antara lain:

- **Energi potensial gravitasi:** energi yang dimiliki oleh sebuah benda akibat posisinya relatif terhadap bumi. Dalam pemahaman sehari-hari energi potensial gravitasi adalah energi yang dimiliki benda yang mempunyai ketinggian. Secara matematis energi potensial gravitasi dirumuskan.

$$E_p = m \cdot g \cdot h \dots \dots \dots (5.3)$$

Dimana:

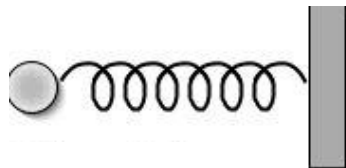
$E_p$  = energi potensial (Joule)

$m$  = massa benda (kg)

$g$  = percepatan gravitasi ( $m/s^2$ )

$h$  = ketinggian dari muka bumi (m)

- **Energi potensial elastik:** energi yang dimiliki oleh benda yang bersifat elastis pada saat benda tersebut ditekan atau ditarik, misalnya pada pegas yang diregangkan (lihat Gambar 5.3)



**Gambar 1.3** Energi potensial elastik yang dimiliki oleh sebuah pegas yang diregangkan.

Secara matematis besarnya energi potensial elastis dirumuskan:

$$E_{el} = \frac{1}{2} k x^2 \dots\dots\dots(5.4)$$

Dimana

$E_{el}$  = energi potensial elastis (Joule)

$k$  = konstanta pegas (N/m)

$x$  = perubahan panjang pegas (m)

- **Energi (potensial) Nuklir:** Energi yang dimiliki oleh inti atom yang tersusun oleh ikatan partikel partikel penyusun inti. Secara umum, energi nuklir dapat dihasilkan melalui dua macam mekanisme, yaitu pembelahan inti atau reaksi fisi dan penggabungan beberapa inti melalui reaksi fusi.
- **Energi Kimia:** Energi kimia tersimpan dalam ikatan-ikatan atom yang membentuk molekul suatu zat. Berbagai sumber energi yang dipakai manusia ada dalam bentuk energi kimia misalnya bahan bakar. Pada umumnya pemanfaatan perolehan energi kimia melalui proses pembakaran. Makanan yang dikonsumsi oleh makhluk hidup juga merupakan energi kimia. Pembakaran terjadi didalam tubuh dan energi yang didapatkan dipakai dalam beraktivitas.

## Energi Kinetik

Bentuk bentuk energi kinetik:

- **Energi kinetik gerak:** Benda yang mempunyai massa dan sedang bergerak dengan suatu kecepatan memiliki energi kinetik gerak yang dirumuskan:

$$E_k = \frac{1}{2} m v^2 \dots\dots\dots(5.6)$$

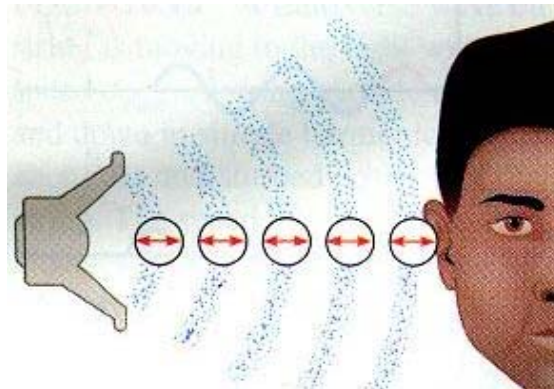
Dimana :

$m$  = massa benda (kg)

$v$  = laju benda (m/s)

$E_k$  = energi kinetik (joule)

- **Energi listrik:** Energi listrik termasuk kedalam jenis energi kinetik karena energi listrik terdapat atau terjadi oleh karena gerakan atau aliran muatan listrik. Energi listrik adalah energi yang dibawa oleh elektron yang mengalir dalam suatu penghantar yang disebut dengan arus listrik.
- **Energi bunyi:** Energi bunyi merupakan rambatan energi melalui media perantara dalam bentuk gelombang longitudinal.



Gambar 1.4. Energi Bunyi

- **Energi Panas:** Energi panas merupakan energi internal sebuah benda yang terjadi sebagai akibat dari bergetarnya (bergerak secara bolak-balik) atom-atom penyusun.

#### 1.3.4 Satuan Energi

Satuan energi dalam standard internasional adalah Joule (J) dan dalam sistem British adalah Btu (*British thermal unit*). Dalam prakteknya banyak satuan energi yang dipakai dalam kehidupan sehari-hari, baik satuan turunan dari standard internasional maupun satuan yang bukan turunan. Tabel 5.1 menyajikan berbagai satuan energi yang sering dijumpai, serta faktor konversinya terhadap Joule.

Tabel 5.1 Satuan energi dan faktor konversinya terhadap satuan SI

Satuan Non-SI untuk Energi	Simbol	Faktor Konversi ke satuan SI
Erg	Erg	$10^{-7}$ J
foot pound gaya	ft.lbf	1.356 J
Kalori	kal	4.187 J
kilogramgaya meter	kgf.m	9.8 J
British thermal unit	Btu	$1.055 \times 10^3$ J
horsepower hour (metric)	Hp.jam	$2.646 \times 10^6$ J
horsepower hour (GB)	Hp.jam	$2.686 \times 10^6$ J
kilowatt jam	kWh	$3.60 \times 10^6$ J
setara barrel minyak (sbm)	b.o.e.	$6.119 \times 10^9$ J
setara ton kayu	-	$9.83 \times 10^9$ J
setara ton batubara (stb)	Tce	$29.31 \times 10^9$ J
setara ton minyak (stm)	Toe	$41.87 \times 10^9$ J
quad (PBtu)	-	$1.055 \times 10^{18}$ J
tera watt year	TWY	$31.5 \times 10^{18}$ J

### Ekivalensi Bentuk-bentuk Energi

Untuk bahan bakar kuantitas energi sering juga dinyatakan dalam jumlah kandungan energi suatu bahan, yakni kandungan energi dalam sejumlah kuantitas massa atau volum suatu bahan. Sehingga pada dasarnya dapat dikonversi menjadi satuan energi per kuantitas massa, misalnya MJ/kg (atau Kal/kg). Beberapa acuan yang sering dipakai adalah;

- STB (setara-ton-batubara) atau TCE (*ton-of-coal-equivalent*).
- SBM (setara-barrel-minyak) atau BOE (*barrels-of-oil-equivalent*)
- STM (setara-ton-minyak) atau TOE (*ton-of-oil-equivalent*).

Tabel 5.3 menyajikan nilai-nilai ekivalen beberapa bahan bakar.

Tabel 5.3 Nilai-nilai energi setara dari beberapa bahan bakar

Bahan Bakar	Satuan	TSB	TSM	SBM	GJ
Batubara	Ton	1.00	0.70	5.05	29.3
Kayubakar (dried)	Ton	0.46	0.32	2.34	13.6
Kerosine (jet fuel)	Ton	1.47	1.03	7.43	43.1
Natural gas	1000 m <sup>3</sup>	1.19	0.83	6.00	34.8
Gasoline	barrel	0.18	0.12	0.90	5.2
Gasoil/diesel	barrel	0.20	0.14	1.00	5.7

### 1.3.5 Daya

Daya merupakan laju energi atau kerja yang dilakukan per satuan waktu. Pada umumnya daya dilambangkan dengan P. Berdasarkan definisinya daya dapat dituliskan dengan persamaan:

$$P = \frac{E}{t} \text{ atau } P = \frac{W}{t} \dots\dots\dots(5.7)$$

Dimana:

P = daya (Watt)

E = Energi (J)

W = Kerja (J)

T = waktu (t)

Dalam SI satuan daya adalah Watt (W) yang sama dengan Joule/detik (J/s). Dalam praktek keseharian sering ditemui berbagai satuan lain dari daya. Tabel 5.2 menampilkan beberapa satuan daya non SI beserta faktor konversinya terhadap satuan Watt.

**Tabel 5.2** Satuan daya dan faktor konversinya terhadap satuan SI

Satuan Non-SI untuk Daya	Simbol	Faktor Konversi ke satuan SI
foot pound per jam	ft.lbf/ja	$0.377 \times 10^{-3} \text{ W}$
calorie per minute	cal/mi	$69.8 \times 10^{-3} \text{ W}$
British thermal unit per jam	Btu/ja	0.293 W
British thermal unit per sekon	Btu/s	$1.06 \times 10^3 \text{ W}$
kilokalori per jam	kcal/ja	1.163 W
foot poundgaya per sekon	ft.lbf/s	1.356 W
calorie per sekon	cal/s	4.19 W
kilogramgaya meter per sekon	kgf.m/	9.8 W
horsepower (metric)	hp	735.49 W
horsepower (Internasional)	hp	746 W

### 1.3.6. Efisiensi Energi

Konversi energi selalu melibatkan kehilangan energi dalam bentuk lain. Hal ini mengharuskan kita membahas konsep efisiensi. Biasanya energi yang masuk hanya sebagian menjadi keluaran dalam bentuk yang dikehendaki sehingga efisiensi konverter selalu kurang dari 100%.

Efisiensi konverter energi didefinisikan sebagai kuantitas energi dalam bentuk yang diinginkan (energi output,  $E_{out}$ ) dibagi dengan kuantitas energi yang dikonversi (energi input,  $E_{in}$ ). Efisiensi biasanya disajikan dalam huruf Romawi  $\eta$ , secara matematis dituliskan.

$$\eta = \frac{E_{out}}{E_{in}} \dots\dots\dots(5.8)$$

# BAB 2

# ENERGI SURYA TERMAL

## 2.1. ENERGI DARI MATAHARI.

Matahari dianggap sebagai benda yang memancarkan radiasi secara sempurna (*black body*) pada temperatur sekitar 5800 K. Rata-rata jumlah energi radiasi matahari yang sampai di permukaan atmosfer bumi pada permukaan datar tiap detik dikenal sebagai konstanta surya (*solar constant*),  $G_{sc}$ , yang besarnya sama dengan  $1367 \text{ W/m}^2$ . Secara umum total daya yang diterima dari sumber radiasi per satuan luas dinamakan irradiansi (*irradiance*). Ketika melintasi lapisan atmosfer bumi jumlah ini berkurang sebagai akibat dari efek penyerapan dan hamburan oleh molekul-molekul udara, awan dan partikel-partikel lain di udara. Sebagian lagi mencapai permukaan bumi secara langsung yang disebut radiasi langsung (*beam radiation*), dan radiasi yang mengalami hamburan yang masih mencapai permukaan bumi disebut radiasi hamburan (*diffuse radiation*). Sebagian dari total radiasi yang mencapai permukaan bumi akan dipantulkan lagi oleh permukaan tersebut. Koefisien perbandingan antara radiasi yang mencapai permukaan dengan radiasi yang dipantulkan disebut *albedo*. Jumlah keseluruhan dari radiasi langsung, radiasi hamburan, dan *albedo* dinamakan radiasi global (*global radiation*). Dalam mendirikan suatu sistem pembangkit tenaga ketiga komponen radiasi diatas harus diperhitungkan, karena berbeda dari satu tempat dengan tempat lainnya dan juga dari waktu ke waktu.

*Albedo* bergantung pada jenis benda-benda yang terdapat dipermukaan bumi (lokasi). Koefisien *albedo* untuk berbagai jenis permukaan ditunjukkan dalam Tabel 6.1

**Tabel 6.1.** Koefisien *albedo* untuk berbagai jenis permukaan

Jenis Permukaan	Nilai <i>Albedo</i>
Pemukiman perkotaan	0.14 – 0.22
Rerumputan	0.15 – 0.25
Salju murni	0.82
Salju lembab	0.55 – 0.75
Aspal	0.09 – 0.15
Beton	0.25 – 0.35
Ubin merah	0.33
Aluminium	0.85

Radiasi langsung dan radiasi hamburan bergantung pada cuaca dan komposisi partikel dalam lapisan udara. Sebagai contoh, sekalipun tidak ada awan yang menghalangi radiasi, radiasi langsung akan sangat kecil pada daerah yang polusi udaranya tinggi, dan radiasi hamburan mendominasi pada daerah tersebut. Pada keadaan cuaca cerah (tanpa polusi udara) efek atmosfer terhadap radiasi matahari yang mencapai bumi dinyatakan dengan massa udara (*air mass*), AM. Jika sudut zenit radiasi datang (sudut yang dibentuk oleh garis vertikal dengan garis berkas sinar datang) dinamakan  $\theta_z$  maka massa udara (*air mass*) sama dengan  $1/\cos\theta_z$ . Dengan demikian massa udara 0, disingkat AM0, menggambarkan radiasi datang tegak lurus pada permukaan datar. Biasanya spektrum radiasi matahari pada AM1.5 dan irradiansi  $1000\text{W/m}^2$  digunakan dalam kalibrasi panel sel surya .

Integrasi terhadap nilai irradiansi matahari selama periode waktu tertentu menghasilkan energi, disebut *insolasi*, biasanya dinyatakan dalam satuan  $\text{Joule/m}^2$  atau  $\text{kWh/m}^2$ . Simbol  $I$  dan  $H$  masing masing dipakai untuk menyatakan isolasi satu jam dan satu hari. Dan simbol  $\bar{I}$  dan  $\bar{H}$  menyatakan nilai rata-rata dalam masing-masing periode.

Energi yang dihasilkan oleh panel surya berasal dari radiasi global (jumlah ketiga komponen radiasi: langsung, hamburan dan *albedo*) yang diserapnya. Sehingga pengaturan panel dalam mendirikan sistem pembangkit bisa disesuaikan dengan lokasi pendirian. Sebagai contoh untuk daerah yang bersalju untuk memaksimalkan radiasi yang datang ke permukaan panel bisa dimanfaatkan *albedo*, karena albedo permukaan bersalju sangat besar (lihat Tabel 6.1).

### Geometri Radiasi Matahari

Untuk mengetahui energi radiasi yang jatuh pada permukaan bumi dibutuhkan beberapa parameter letak kedudukan dan posisi matahari, hal ini perlu untuk mengkonversikan harga fluks berkas yang diterima dari arah matahari menjadi hubungan harga ekivalen ke arah normal permukaan.

Berikut ini adalah beberapa definisi yang digunakan, antara lain :

- Sudut datang  $\theta$  adalah sudut antara sinar datang dengan normal pada permukaan pada sebuah bidang.
- Sudut latitude  $\phi$  pada suatu tempat adalah sudut yang dibentuk oleh garis radial ke pusat bumi pada suatu lokasi dengan proyeksi garis pada bidang equator.

- Sudut deklinasi berubah harga maksimum +23,450 pada tanggal 21 Juni ke harga minimum 3,450 pada tanggal 21 Desember. Deklinasi 00 terjadi pada tanggal 21 Maret dan 22 Desember.
- Sudut Zenit  $\theta_z$  adalah sudut yang dibuat oleh garis vertikal ke arah zenit dengan garis ke arah titik pusat matahari.
- Sudut Azimuth  $\delta_z$  adalah sudut yang dibuat oleh garis bidang horizontal antara garis selatan dengan proyeksi garis normal pada bidang horizontal. Sudut azimuth positif jika normal adalah sebelah timur dari selatan dan negatif pada sebelah barat dan selatan.
- Sudut latitude  $\alpha$  adalah sudut yang di buat oleh garis ke titik pusat matahari dengan garis proyeksinya pada bidang horizontal.
- Sudut kemiringan (*slope*)  $\beta$  adalah sudut kemiringan yang di buat oleh permukaan bidang dengan horizontal.

Faktor penting lain yang menyebabkan radiasi langsung dari matahari berbeda di setiap tempat dan waktu adalah akibat dari bentuk geometri bumi, rotasi bumi pada porosnya, dan gerakan bumi mengelilingi matahari. Besarnya radiasi langsung yang datang ke permukaan datar dinyatakan dengan sudut insident (*incident angle*),  $\theta$ , yaitu sudut yang dibentuk oleh garis sinar datang dan garis normal permukaan yang dikenai sinar. Dengan demikian  $\theta = 0$  untuk radiasi yang tegak lurus permukaan. Besarnya  $\theta$  dinyatakan dengan persamaan dasar

$$\begin{aligned} \cos \theta = & (\sin \delta \sin \phi \cos \beta - \sin \delta \cos \phi \sin \beta \cos \gamma) \\ & + (\cos \delta \cos \phi \cos \beta + \cos \delta \sin \phi \sin \beta \cos \gamma) \cos \omega \\ & + (\cos \delta \sin \beta \sin \gamma) \sin \omega \dots \dots \dots (6.1) \end{aligned}$$

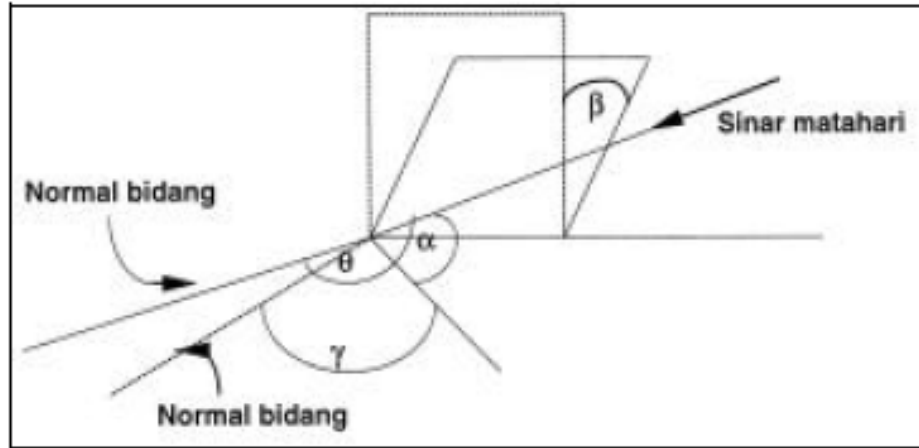
dimana,

$$\delta = 23.45 \sin \left( 360 \frac{284 + n}{365} \right) \dots \dots \dots (6.2)$$

dengan :

- $\delta$  = sudut deklinasi
- $\phi$  = posisi lintang lokasi
- $\beta$  = sudut kemiringan panel
- $\gamma$  = garis busur untuk waktu standar
- $\gamma$  = sudut hadap panel
- $n$  = nomor urutan hari (  $n = 1$  untuk tanggal 1 januari dan seterusnya)
- $\omega$  =

Rumus tersebut diatas dapat dikembangkan sesuai dengan posisi lokasi dan waktu. Hubungan antara sudut-sudut diatas secara geometri dapat digambarkan seperti Gambar 6.1



**Gambar 2.1.** Hubungan antara sudut-sudut geometri matahari.

Total radiasi/insolasi pada permukaan miring,  $I_T$ , yang merupakan jumlah dari radiasi langsung  $I_b$ , radiasi hamburan  $I_d$ , dan *albedo* pada permukaan panel dengan kemiringan  $\beta$  dapat dihitung dengan persamaan

$$I_T = I_b R_b + I_d \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + I \rho_g \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \dots \dots \dots (6.3)$$

Notasi  $R_b$  menyatakan faktor geometri yakni koefisien perbandingan antara cosinus sudut insiden dengan cosinus sudut zenith radiasi. Suku terakhir dari persamaan diatas menyatakan besarnya radiasi dari *albedo*. Untuk lokasi yang mempunyai permukaan dengan koefisien albedo yang tidak terlalu besar maka yang perlu diperhatikan adalah pengaturan sudut insident  $\theta$ , sehingga radiasi yang jatuh ke permukaan panel menjadi maksimum.

## 2.2 ENERGI PANAS SURYA

### Aplikasi Energi Panas Matahari

Energi matahari dapat dengan mudah terkonversi menjadi panas, dan energi panas ini selanjutnya dapat dimanfaatkan untuk berbagai keperluan. Pengembangan dan pemanfaatan energi panas matahari mempunyai potensi yang baik, terutama bagi area sekitar garis khatulistiwa, termasuk Indonesia, dimana matahari bersinar sepanjang tahun. Berikut berbagai bentuk pemanfaatan energi matahari sebagai sumber panas secara langsung, termasuk:

- Pemanas air

- Kompor matahari
- Pengeringan
- Distilasi air kotor
- Pembangkit listrik

### 2.2.1 Pemanas Air Tenaga Surya

Air panas banyak dibutuhkan oleh masyarakat baik rumah tangga maupun industri. Dalam rumah tangga air panas biasanya dibutuhkan seperti mandi, mencuci, dan lain-lain. Untuk negara empat musim air panas menjadi kebutuhan mutlak, dan pada musim dingin air panas juga sering dipakai sebagai pemanas ruangan dengan memanfaatkan radiator. Untuk industri, air panas sering dimanfaatkan sebagai bagian dari proses misalnya..... dan..... Sementara diberbagai layanan masyarakat seperti rumah-rumah sakit, air panas juga pada umumnya dibutuhkan. Untuk perhotelan ketersediaan air panas merupakan salah satu indikator tingkat fasilitas layanan.

Pada umumnya air panas diperoleh dengan cara memanaskan air, baik dengan kompor minyak, gas, kayu bakar, maupun dengan listrik. Perlu diketahui bahwa kebanyakan listrik pun juga dibangkitkan melalui pembakaran bahan bakar, terutama bahan bakar fosil seperti batubara dan gas alam. Dari sisi lingkungan penggunaan bahan bakar fosil akan menimbulkan polusi udara akibat bentuknya gas-gas emisi dari hasil pembakaran. Ditengarai bahwa secara global pemanasan air di rumah bertanggung jawab terhadap 30% emisi CO<sub>2</sub>. Jika pemanfaatan tenaga surya dapat ditingkatkan hingga memenuhi kebutuhan air panas antara 60% - 95% dari kebutuhan sehari-hari maka akan berdampak pada pengurangan emisi CO<sub>2</sub> hingga 25%. Dan dengan menggunakan sistem ini penggunaan dari bahan bakar fosil pun dapat dikurangi yang dengan sendirinya juga berdampak positif pada pengurangan emisi CO<sub>2</sub>. Selain itu bahan bakar fosil merupakan sumber energi yang tak dapat diperbarui sehingga suatu saat akan habis.

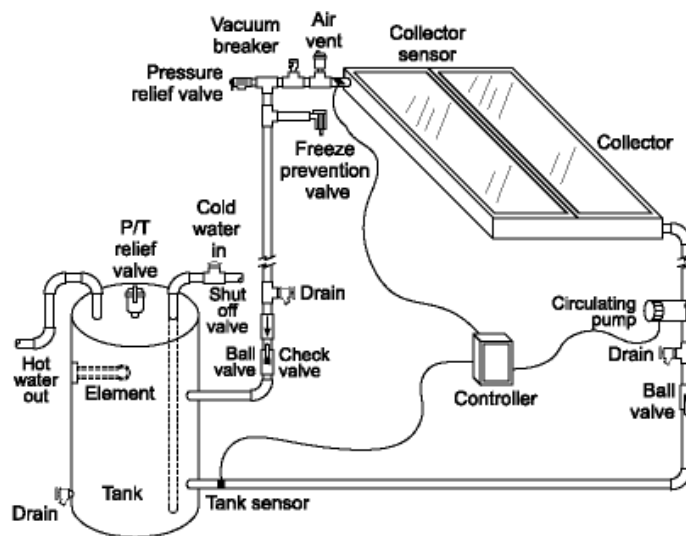
Sebuah sistem pemanas air tenaga surya (*solar hot water heater*) pada umumnya terdiri dari dua komponen utama yakni kolektor surya (*solar collector*) dan tangki penyimpanan (*storage tank*), serta beberapa komponen pendukung seperti sistem perpipaan, keran, penukar panas (*heat exchanger*), pengontrol, sistem *back-up* dan komponen lainnya. Gambar 6.10 menunjukkan diagram sebuah pemanas air tenaga surya.

Kolektor surya berfungsi untuk mengumpulkan panas dari sinar matahari. Panas yang dikumpulkan kemudian diserap oleh media penyerap berupa cairan, baik air maupun

campuran air dan glycol, ataupun zat cair lainnya. Untuk daerah empat musim biasanya cairan yang dipakai adalah campuran air dengan glycol. Hal ini untuk menghindari pembekuan dalam kolektor surya pada musim dingin. Untuk daerah tropis seperti Indonesia cairan yang digunakan dalam solar kolektor adalah air. Cairan yang bertemperatur dingin masuk kedalam kolektor surya lewat inlet, sementara setelah melawati kolektor ( menyerap panas) dan temperaturnya naik cairan tersebut keluar lewat outlet. Sirkulasi sedemikian berlangsung secara terus-menerus sepanjang panas dari matahari dapat meningkatkan suhu air yang lewat kolektor. Pada malam hari sirkulasi dihentikan untuk menghindari panas yang hilang (heat loss) lewat kolektor surya.

Tangki penyimpanan panas berisi air murni dan storage tank / tangki penyimpanan panas berfungsi sebagai penyimpan panas yang telah terkumpul oleh kolektor surya. Tangki menyerap panas dari cairan yang tersirkulasi dari kolektor. Penyerapan panas pada umumnya menggunakan suatu alat penukar panas (*heat exchanger*) yang terbuat dari bahan yang mempunyai konduktivitas panas yang baik.

Pada hari dimana cuaca mendung ataupun tidak cukup cahaya matahari untuk menghasilkan kebutuhan air panas melalui kolektor, maka dibutuhkan sebuah sistem pemanas *back-up*. Sistem *back-up* dapat berupa pemanas listrik, atau pemanas dengan bahan bakar gas. Jika menggunakan pemanas listrik maka biasanya alat pemanasnya terpasang pada tangki penyimpanan panas (*heat storage*). Jika menggunakan bahan bakar gas maka panas disalurkan dari tungku pemanas ketangki penyimpanan dengan mekanisme sebagaimana terjadi pada pengumpul surya.



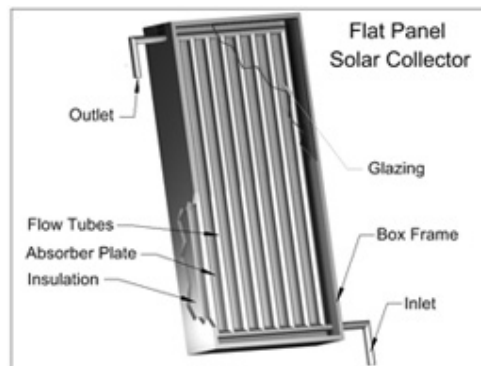
**Gambar 2.2** Diagram sebuah pemanas air tenaga surya (sumber: <http://www.dnr.mo.gov/energy/renewables/solar6.htm>)

### 2.2.2 Kolektor Surya Pemanas Air

Secara umum kolektor surya dibagi menjadi dua jenis: terkonsentrasi (*concentrating*) dan tak terkonsentrasi (*non-concentrating*). Pengumpul surya dengan sistem terkonsentrasi umumnya digunakan untuk keperluan suhu tinggi, misalnya untuk pembangkit listrik. Untuk keperluan pemanas air kebutuhan rumah tangga biasanya digunakan kolektor surya jenis tak terkonsentrasi. Pengumpul surya jenis tak terkonsentrasi terdiri dari dua tipe masing-masing kolektor surya plat datar (*flat plate solar collector*), tabung vakum (*evacuated tube*).

#### Kolektor Plat Datar

Sebuah kolektor pelat datar terdiri komponen komponen penyerap (*absorber*), pipa alir, penutup transparan, insulasi, dan bingkai (perhatikan Gambar 6.11)



**Gambar 2.3.** Kolektor surya tipe plat datar

Komponen penyerap pada kolektor surya tipe plat datar umumnya terbuat dari logam dengan konduktivitas yang baik serta diberi warna gelap untuk mengoptimalkan penyerapan panas. Panas selanjutnya diserap oleh pipa alir yang melekat pada penyerap dan kemudian diteruskan ke cairan yang lewat dalam pipa alir.

Penutup transparan pada permukaan atas kolektor surya biasanya terbuat dari kaca atau plastik bening, berfungsi untuk meneruskan sinar matahari ke penyerap dan sekaligus mencegah hilangnya panas (*heat loss*) melalui konveksi lewat permukaan atas. Untuk menghasilkan temperatur yang lebih tinggi penutup transparan umumnya dibuat lebih dari satu lapis. Dilain pihak untuk keperluan air dengan temperatur relatif lebih rendah, misalnya untuk kolam renang, maka kolektor surya dapat secara terbuka tanpa penutup transparan.

Pada sisi bawah dan sisi samping sistem kolektor plat datar diberi insulasi penahan panas yang cukup baik untuk mencegah hilangnya panas (*heat loss*) yang telah terkumpul melalui proses konduksi maupun konveksi.

Semua komponen-komponen ini kemudian disusun dalam satu bingkai yang kokoh sehingga dapat dibawa dan kemudian dipasang pada tempat yang dikehendaki. Gambar 6.12 menunjukkan contoh kolektor surya plat datar yang terpasang pada atap sebuah rumah.

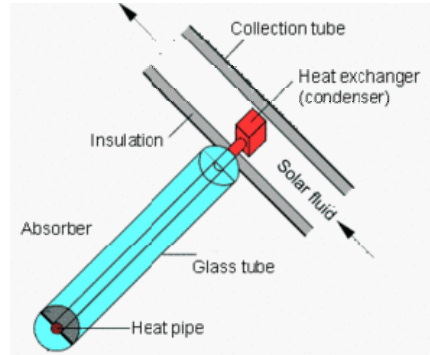


**Gambar 2.4.** Kolektor plat datar terpasang pada atap rumah

### **Kolektor Tabung Vakum**

Tipe lain dari kolektor surya tak terkonsentrasi adalah tipe tabung vakum (*vacuum tube*) sering juga dinamakan *evacuated tube solar collector*. Kolektor surya tipe ini menggunakan konduktor kecil bersirip yang diletakkan dalam tabung vakum transparan. Konduktor bersirip tersebut biasanya terbuat dari logam dengan konduktivitas yang baik, dan berfungsi sebagai penyerap panas cahaya matahari (*absorber*). Tabung vakum transparan bertujuan untuk memaksimalkan radiasi matahari yang diterima oleh penyerap, dan sekaligus meminimalkan panas yang hilang lewat proses konveksi dan konduksi. Gambar 6.13 menunjukkan diagram sebuah tabung kolektor tipe tabung vakum.

Ada beberapa tipe kolektor surya tabung vakum, perbedaan antara tipe khususnya pada sistem aliran cairan yang menyerap panas dari konduktor penyerap cahaya matahari. Pada tipe tertentu cairan penyerap panas tersirkulasi atau mengalir pada konduktor kecil berbentuk U didalam tabung vakum, sementara pada tipe yang lain cairan hanya lewat pada ujung atas konduktor kecil dan menyerap pada ujung tersebut. Ada juga tipe lainnya dimana cairan masuk kedalam pipa kecil lalu menyerap panas dan kemudian keluar melalui rongga tabung diluar pipa.



**Gambar 2.5.** Diagram sebuah tabung kolektor tipe tabung vakum.

Beberapa tabung biasanya dihubungkan dan membentuk satu panel kolektor surya. Gambar 6.14 menunjukkan salah satu contoh kolektor surya tipe tabung vakum.



**Gambar 2.6.** Kolektor surya tipe tabung vakum.

### 2.2.3 Pengering Surya

Proses pengeringan merupakan salah satu proses pasca panen untuk berbagai produk hasil pertanian. Penjemuran langsung dibawah sinar matahari secara terbuka merupakan metode pengeringan yang paling sederhana dan banyak dilakukan oleh petani di Indonesia, termasuk di Jawa Timur. Banyak kendala yang dialami dengan metode ini seperti tidak menentunya cuaca, kontaminasi produk, masalah higineis, dan berbagai hal yang pada akhirnya berpengaruh pada kualitas dan kuantitas produk pertanian. Dilain pihak pemakaian mesin pengering modern menambah biaya produksi dan tidak terjangkau oleh petani, disamping dampak negatif yang terjadi sebagai akibat dari pembakaran sumber energi fosil dalam mesin. Solusi yang diusulkan dalam tulisan ini adalah pemanfaatan pengering tenaga surya dengan sistem bekap. Tenaga surya merupakan sumber energi yang bersih, ketersediaanya melimpah terutama di daerah sekitar khatulistiwa termasuk Jawa Timur, serta dapat diperoleh

dengan bebas. Untuk mengantisipasi cuaca yang tidak menentu, sistem pengering tenaga surya dibekap dengan panas yang diperoleh dari pembakaran biomassa.

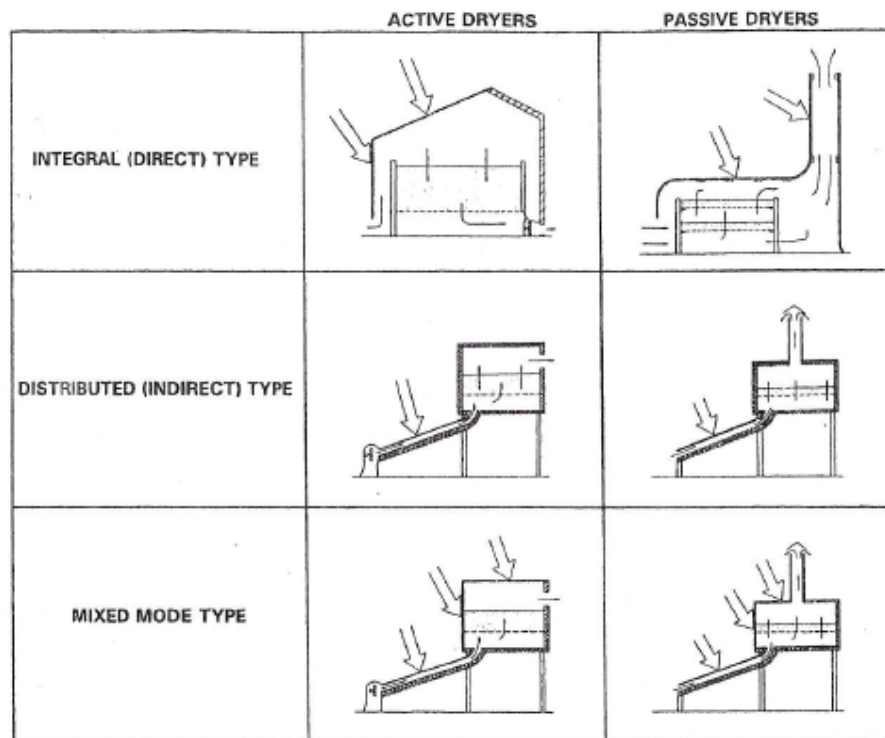
Pengering tenaga surya (solar dryer) merujuk pada suatu alat pengering yang dirancang dengan memanfaatkan energi surya sebagai sumber energi. (Pengertian solar dryer berbeda dengan sun dryer, dimana sun dryer merupakan penjemuran langsung dibawah sinar matahari di ruang terbuka). Terdapat berbagai jenis dan tipe pengering tenaga surya yang digolongkan masing masing menurut cara pemanfaatan radiasi surya, alat bantu, dan jenis produk yang dikeringkan. Berdasarkan bagaimana bahan yang dikeringkan mendapatkan panas dari radiasi surya, pengering tenaga surya dibedakan menjadi (1) pengering tipe langsung; (2) pengering tipe tidak langsung; dan (3) pengering tipe gabungan (hybrid dryer). Pada pengering tipe langsung, radiasi matahari langsung mengenai bahan yang dikeringkan. Sementara pada pengering tipe tidak langsung, radiasi surya dimanfaatkan untuk memanaskan udara, dan selanjutnya udara yang panas dilewatkan pada bahan yang dikeringkan. Pada pengering tipe gabungan, radiasi surya dimanfaatkan baik langsung pada bahan yang dikeringkan maupun untuk memanaskan udara untuk mengeringkan.

Berdasarkan pemanfaatan alat bantu, pengering tenaga surya dibedakan menjadi: (1) pengering tipe aktif, dan (2) pengering tipe pasif. Pengering tipe aktif memanfaatkan alat bantu atau alat mekanik lain seperti kipas atau blower, sementara pengering tipe pasif tidak memanfaatkan alat bantu lain sehingga untuk sirkulasi udara menggunakan sirkulasi konveksi bebas alami.

Menurut jenis produk yang dikeringkan pengering tenaga surya dibedakan menjadi: (1) pengering tipe produk tunggal (single products dryer) dan (2) pengering multi produk (multi product dryer). Berbagai bentuk dan tipe pengering surya ditunjukkan pada Gambar 6.15.

Para petani seringkali menghadapi persoalan terkait dengan pengeringan produk mereka, dan dari hasil percobaan didapati bahwa pengering tenaga surya dapat dan menjadi solusi. Permasalahan bahwa tenaga surya seringkali sangat bergantung pada cuaca, dapat diatasi dengan melengkapi pengering tersebut dengan sistem bekap biomassa. Dalam percobaan ini biomassa yang dipakai adalah kayu bakar, namun pada prakteknya dapat juga dari berbagai bentuk bahan biomassa sampingan yang tidak terpakai misalnya, sekam, tempurung kelapa, dan lain-lain. Bentuk dan desain pengering surya sangat bervariasi dan dapat disesuaikan dengan kebutuhan menurut lokasi. Desain dan bahan konstruksi sebuah pengering tenaga surya pada umumnya sangat sederhana, sehingga dapat dibangun sendiri oleh para petani.

Persoalan yang mungkin muncul adalah bagaimana mengenalkan sistem ini kepada para petani dan juga mengubah kebiasaan tradisional dengan penjemuran menjadi memakai alat pengering surya. Disamping itu mungkin juga jadi hambatan untuk investasi awal pembuatan pengering. Dalam hal ini perlu dukungan dan perhatian dari berbagai pihak terutama pemerintah dan pengusaha untuk melakukan stimulasi. Pemanfaatan pengering tenaga surya (dengan bekap tenaga biomass) dapat menjadi salah satu sarana dalam upaya peningkatan produktifitas petani sekaligus pemanfaatn energi terbarukan yang ramah lingkungan.



Gambar 2.7 Berbagai tipe pengering tenaga surya

#### 2.2.4 Pengering Surya Dengan Kolektor Surya PVT.

Konversi energi surya menjadi listrik dan panas menggunakan suatu alat yang disebut sebagai photovoltaic thermal hibrid (PVT) kolektor. Hal tersebut merupakan suatu kemajuan yang pesat untuk memenuhi kebutuhan energi di masa yang akan datang. Energi surya bersifat ramah lingkungan, melimpah, dan dapat disuplai tanpa menimbulkan polusi lingkungan.

Sistem hybrid untuk penggunaan energi surya terbarukan telah menarik perhatian para peneliti dan insinyur selama satu decade terakhir karena efisiensi yang lebih tinggi dan kestabilan kinerja dibandingkan dengan alat surya secara individual (Tyagi et. al. (2012)). Kolektor surya energi thermal merupakan tipe khusus alat penukar panas yang mengubah radiasi surya menjadi energi thermal melalui suatu medium atau fluida yang bergerak. Kolektor surya merupakan komponen utama dalam setiap sistem surya. Alat ini akan mengabsorb radiasi surya yang datang, mengubahnya menjadi energi panas, dan memindahkannya melalui suatu fluida (biasanya udara, air, atau minyak) untuk tujuan atau aplikasi yang berguna.

Photovoltaic (PV) merupakan cara yang sangat berguna dalam pemanfaatan energi surya dengan mengubahnya secara langsung menjadi listrik. Sel surya merupakan alat yang mampu mengubah sinar matahari menjadi listrik dengan menggunakan efek photoelektrik. Ketika cahaya matahari mengenai suatu sel PV, photon dari cahaya matahari yang terabsorb akan memindahkan elektron dari atom-atom dari sel. Elektron bebas akan mengalir melalui sel, membentuk, dan mengisi lubang-lubang di dalam sel. Pergerakan elektron dan lubang-lubang inilah yang menyebabkan timbulnya listrik. PV biasanya terbuat dari semiconductor grade Si. Efisiensi konversi energi surya pada umumnya berkisar antara 15-20% Namun biaya yang tinggi dalam pembuatan sel Si membatasi penggunaannya. Kelemahan sel Si lainnya adalah penggunaan senyawa kimia yang berbahaya dalam proses pembuatannya. Oleh sebab itu perlu alternative sel surya dengan biaya murah dan ramah lingkungan. Pada sel PV lapis tipis (thin-film PV cell), deposisi lapisan semikonduktor tipis dari PV material dapat dilakukan pada lapisan penyangga rendah biaya seperti gelas, logam, atau plastik foil. Material lapis tipis memiliki absorptivitas cahaya yang lebih tinggi dibandingkan dengan material kristalin, lapisan deposit material PV sangat tipis berkisar dari beberapa micrometer hingga kurang dari 1 mikrometer (sel amorphous tunggal dapat setipis 0.3  $\mu\text{m}$ ). Semakin tipis lapisan material maka biaya yang dihemat dapat semakin besar. Teknik deposisi dengan cara menyemprotkan material PV secara langsung ke substrat gelas atau logam jauh lebih murah. Dengan demikian, proses pembuatan lebih cepat, penggunaan energi lebih sedikit, dan produksi massal menjadi lebih mudah dibandingkan dengan silikon kristalin. Efisiensi konversi mungkin lebih rendah namun akan dikompensasi dengan rasio perolehan energi terhadap berat. Material yang cocok untuk lapis tipis antara lain: tembaga indium sulfida,

cadmium telurida (CdTe), dan tembaga indium diselenida (CuInSe<sub>2</sub>) dan campuran logam terkait lainnya.

Solar photovoltaic/thermal(PVT) merupakan kolektor hibrid yang mengkombinasikan sel surya photovoltaic dengan kolektor thermal untuk memperoleh dua tipe energi yaitu energi listrik dan energi thermal secara bersamaan. PVT kolektor mampu mengkonversi lebih banyak energi surya per unit luas permukaan menjadi sumber energi sekunder yang bermanfaat dibandingkan dengan kombinasi terpisah modul PV dan panel thermal surya. Fan et.al. (2014) melakukan eksperimen menggunakan 900Wp tipe liquid, glazed mc-Si PVT sistem. Energi surya yang masuk ke dalam kolektor diubah menjadi listrik sedangkan energi thermal akan tersimpan dalam air panas dan ada kehilangan energi surya akibat konveksi dan radiasi pada permukaan kolektor dan melalui material insulasi panas. Sistem PVT dapat mencapai efisiensi konversi maksimum sebesar 45,67% dan efisiensi konversi rata-rata sebesar 41,08%.

### **Pengering Herbal dengan Pengering Surya PVT**



Gambar 2.8 PVT Solar Dryer di Ubaya

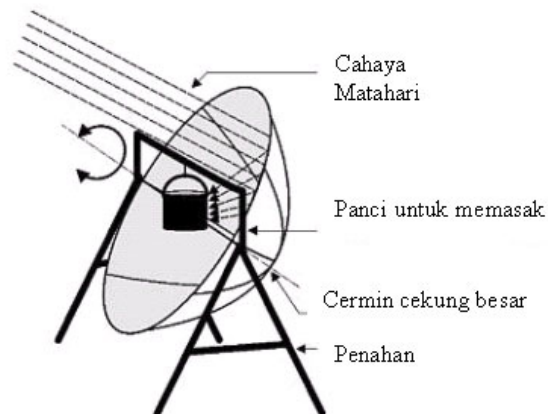
Sistem PVT/ udara banyak dimanfaatkan dalam berbagai aplikasi praktis karena penggunaan material yang minimal and biaya operasi yang rendah meskipun efisiensinya lebih rendah dibandingkan sistem PVT/air. Sukamongkol et.al. (2010) melakukan eksperimen untuk memprediksi kinerja dinamis dari perolehan panas suatu kondesor dengan PV/T

kolektor udara untuk meregenerasi desikan untuk mengurangi penggunaan energi oleh AC pada ruang di iklim tropis. Sistem terdiri atas 5 bagian: ruang tamu, unit dehumidifikasi desikan dan regenerasi, sistem AC, PV/T kolektor, dan unit mixing udara. Thermal energi yang dihasilkan oleh sistem dapat memproduksi udara kering hangat dengan temperature 53oC dan RH sebesar 23%. Listrik sebesar 6% dari radiasi total surya per hari dapat diperoleh melalui sistem PV/T ini. Lebih lanjut, penggunaan hybrid PV/T pemanas udara yang digabungkan dengan perolehan panas dari kondenser untuk meregenerasi desikan untuk dehumidifikasi, dapat menghemat penggunaan energi sistem AC sebesar 18%.

### 2.2.5 Kompor Matahari

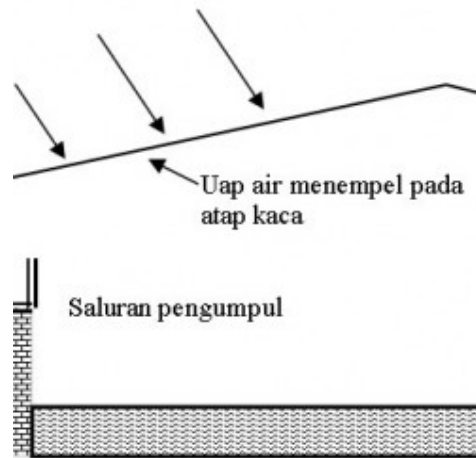
Prinsip kerja dari kompor matahari adalah dengan memfokuskan panas yang diterima dari matahari pada suatu titik menggunakan sebuah cermin cekung besar sehingga didapatkan panas yang besar yang dapat digunakan untuk menggantikan panas dari kompor minyak atau kayu bakar. Gambar 6.16 menunjukkan diagram sebuah kompor surya tipe parabola.

KOMPOR MATAHARI



Gambar 2.9 Kompor tenaga surya tipe parabola

### 2.2.6 Distilasi Air



Gambar 2.10. Skema destilasi surya

Prinsip kerja destilasi air adalah dengan memanfaatkan sebuah kolam yang dangkal, dengan kedalaman 25 mm hingga 50 mm, ditutup oleh kaca. Air yang dipanaskan oleh radiasi matahari, sebagian menguap, sebagian uap itu mengembun pada bagian bawah dari permukaan kaca yang lebih dingin. Kaca tersebut dimiringkan sedikit (~10 derajat) untuk memungkinkan embunan mengalir karena gaya berat menuju ke saluran penampungan yang selanjutnya dialirkan ke tangki penyimpanan. Gambar 6.17 menunjukkan skema destilasi tenaga surya.

### 2.2.7 Pembangkitan Listrik tenaga panas Matahari

Panas surya yang dihasilkan dari sistem terkonsentrasi melalui pemantulan ini dapat menghasilkan temperatur tinggi. Temperatur yang tinggi digunakan untuk memanaskan fluida yang selanjutnya dilewatkan turbin untuk memutar generator dan menghasilkan listrik. Berbagai tipe sistem pembangkitan listrik tenaga panas surya ditunjukkan pada Gambar 6.18



**Gambar 2.11** Berbagai bentuk sistem pembangkit panas tenaga surya untuk pembangkit listrik (sumber: dari berbagai sumber di internet)

# BAB 3

# ENERGI SURYA LISTRIK

## 3.1. ENERGI LISTRIK TENAGA SURYA

### Sel Surya

Sel surya dalam bahasa Inggris *solar cells* merupakan perangkat yang dapat mengubah energi cahaya matahari menjadi energi listrik secara langsung. Peristiwa terbentuknya energi listrik dari energi cahaya dalam suatu bahan dinamakan efek fotovoltaic atau *Photovoltaic* (PV), dan sehari-hari sel surya sering dinamakan *Photovoltaic* (PV).

### Perkembangan Teknologi Sel Surya

Perkembangannya sel surya berawal dari penemuan efek photovoltaic oleh Edmond Becquerel pada tahun 1939. Berikut ini beberapa catatan berkaitan dengan sejarah perkembangan teknologi sel surya dari masa kemasa:

Hingga saat ini terdapat beberapa jenis sel surya yang berhasil dikembangkan oleh para peneliti hingga menghasilkan panel sel surya yang memiliki efisiensi relatif tinggi dengan biaya pembuatan yang lebih rendah.

*Generasi pertama* sel surya komersial adalah tipe wafer (berlapis). Tipe sel surya wafer pertama yang ditemukan adalah berbahan silikon kristal tunggal. Dalam perkembangannya, tipe ini mampu menghasilkan efisiensi yang lebih tinggi dari bahan lain. Sel surya silikon kristal tunggal jenis wafer yang tersedia di pasaran memiliki efisiensi pada kisaran 20%. Kendala utama pengembangan silikon kristal tunggal untuk dapat diproduksi secara komersial adalah biaya produksi yang sangat tinggi, sehingga panel sel surya yang dihasilkan menjadi tidak ekonomis sebagai sumber energi alternatif. Jenis sel surya wafer yang kedua adalah silikon poli-kristal. Saat ini, hampir sebagian besar panel sel surya yang beredar di pasar komersial berasal dari *screen printing* jenis silikon poli-kristal. Jenis sel surya ini memiliki harga pembuatan yang lebih murah namun tingkat efisiensinya lebih rendah jika dibandingkan dengan silikon kristal tunggal.

*Generasi kedua sel surya* adalah tipe lapisan tipis (*thin film*). Ide pembuatan jenis sel surya lapisan tipis adalah untuk mengurangi biaya pembuatan sel surya mengingat tipe ini

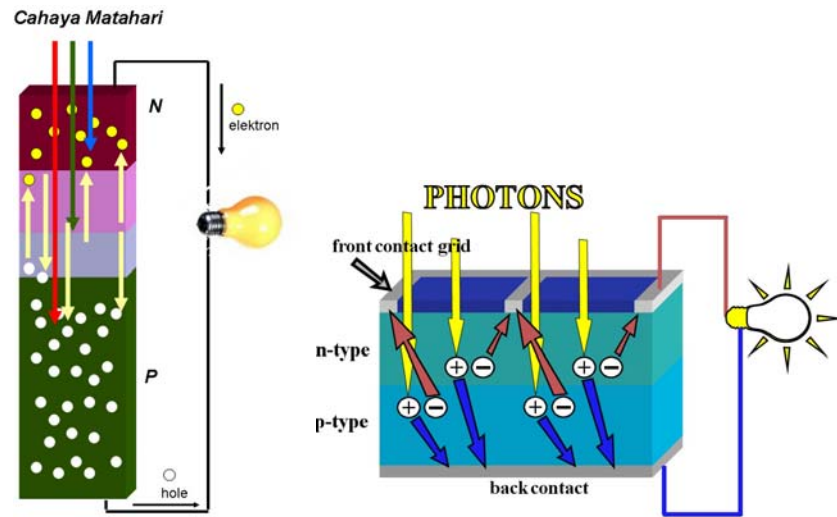
hanya menggunakan kurang dari 1% dari bahan baku silikon jika dibandingkan dengan bahan baku untuk tipe silikon wafer. Penghematan bahan baku pada pembuatan lapisan tipis ini dapat menurunkan harga per KWh energi yang dibangkitkan. Efisiensi tertinggi yang telah dihasilkan oleh jenis sel surya lapisan tipis ini adalah pada kisaran 19,5% dengan material CIGS. Keunggulan lain tipe lapisan tipis adalah semikonduktor sebagai lapisan sel surya dapat dideposisi pada substrat yang lentur sehingga menghasilkan perangkat sel surya yang fleksibel. Kedua generasi tipe wafer dan lapisan tipis dari sel surya tersebut diatas masih mendominasi pasaran sel surya di seluruh dunia. Secara umum perangkat sel surya mempunyai usia aktif mencapai 20 tahun lebih.

Para ilmuwan terus mengembangkan teknologi sel surya ini, namun hingga saat ini belum ada satu tipe sel surya tertentu yang dapat diklaim menjadi generasi ketiga menyusul generasi pertama dan kedua. Ada beberapa usulan yang dilaporkan antara lain sel surya tandem yang dalam skala laboratorium efisiensinya dilaporkan mencapai 68%, sel surya *multijunction*, dan sel surya bahan organik. Semua jenis ini belum tersedia secara komersial.

Sebagaimana diketahui bahwa ketersediaan energi surya dipermukaan bumi mencapai 81000 TerraWatt, sementara pemanfaatannya sebagai sumber energi secara langsung masih sangat sedikit hingga hari ini.

### **Cara Kerja Sel Surya**

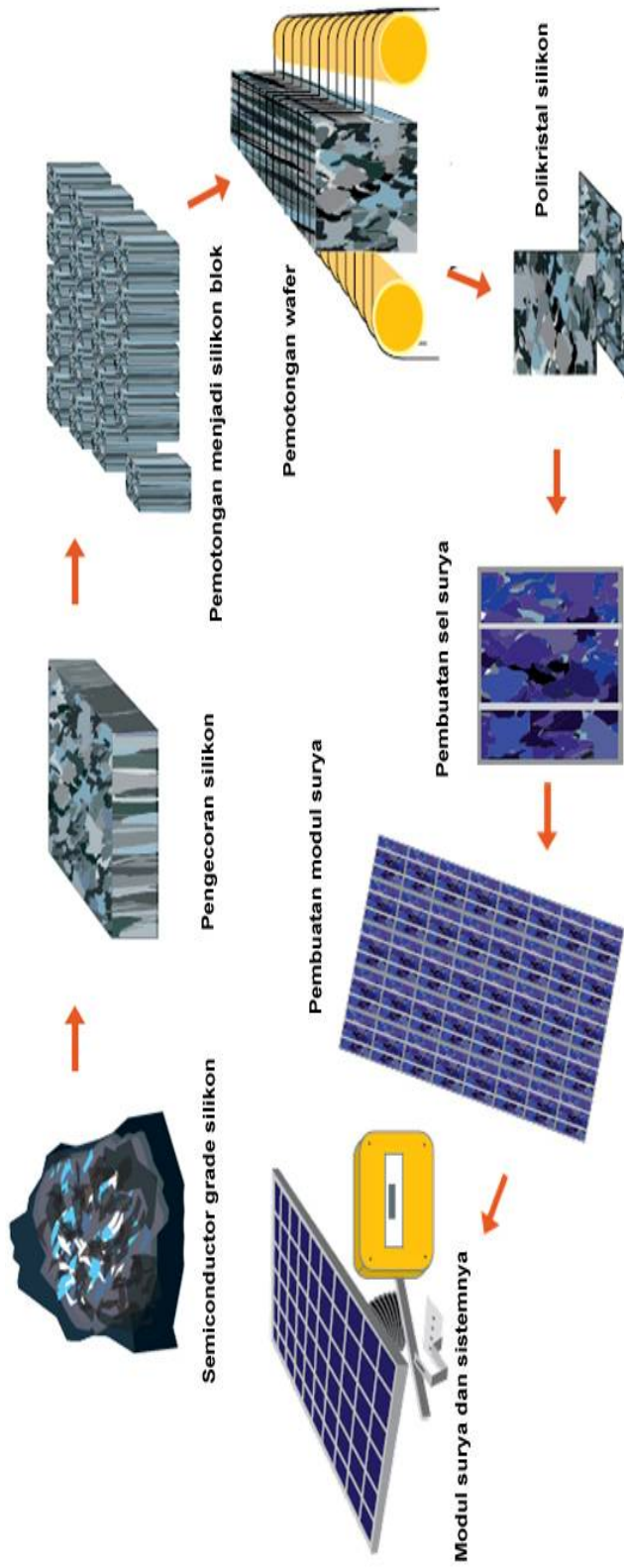
Pada umumnya sel surya terbuat dari bahan semikonduktor seperti silikon. Proses pengubahan cahaya matahari menjadi listrik ini dimungkinkan karena bahan material yang menyusun sel surya berupa semikonduktor yang terdiri atau tersusun dari *dua* jenis semikonduktor yakni jenis *n* dan jenis *p*. Semikonduktor jenis *n* merupakan semikonduktor yang memiliki kelebihan elektron, sehingga kelebihan muatan negatif, (*n* = negatif). Sedangkan semikonduktor jenis *p* memiliki kelebihan hole, sehingga disebut dengan *p* (*p* = positif) karena kelebihan muatan positif. Kedua jenis semikonduktor tersebut disambung membentuk sambungan p-n yang merupakan sebuah sel surya. Pada sambungan *p-n* inilah proses konversi cahaya matahari menjadi listrik terjadi (lihat Gambar 6.2). Biasanya semikonduktor *n* berada pada lapisan atas sambungan *p* yang menghadap kearah datangnya cahaya matahari, dan dibuat jauh lebih tipis dari semikonduktor *p*.



Gambar 3.1. Proses terbentuknya arus listrik pada sel surya

Ketika cahaya matahari mengenai sambungan  $p-n$ , maka elektron mendapat energi dari cahaya matahari untuk melepaskan dirinya dari semikonduktor  $n$ . Terlepasnya elektron ini meninggalkan lubang (hole) pada daerah yang ditinggalkan sehingga setiap kali terbentuk pasangan elektron dan lubang. Jika kedua bagian semikonduktor tersebut dihubungkan dengan rangkaian kabel maka akan terjadi aliran elektron pada kabel dari tipe  $n$  ke tipe  $p$ . Aliran elektron tersebut tidak lain adalah arus listrik yang dapat dipakai untuk keperluan alat yang memerlukan energi listrik, misalnya menyalakan lampu.

Sebagaimana diketahui bahwa bahan baku dari sel surya pada umumnya adalah bahan semikonduktor yang terdapat di alam dan istilah sel surya merujuk pada satu sel dari penghasil listrik yang telah diolah dari bahan dasar. Satu sel surya dapat menghasilkan listrik dengan voltase tertentu yang relatif kecil. Untuk menghasilkan voltase listrik dengan besaran yang diinginkan ditempuh dengan menggabung beberapa sel secara paralel. Gabungan beberapa sel ini biasanya disebut dengan modul surya. Tahapan proses pengolahan bahan dasar hingga terbentuk modul surya secara garis besar seperti ditunjukkan pada Gambar 6.3

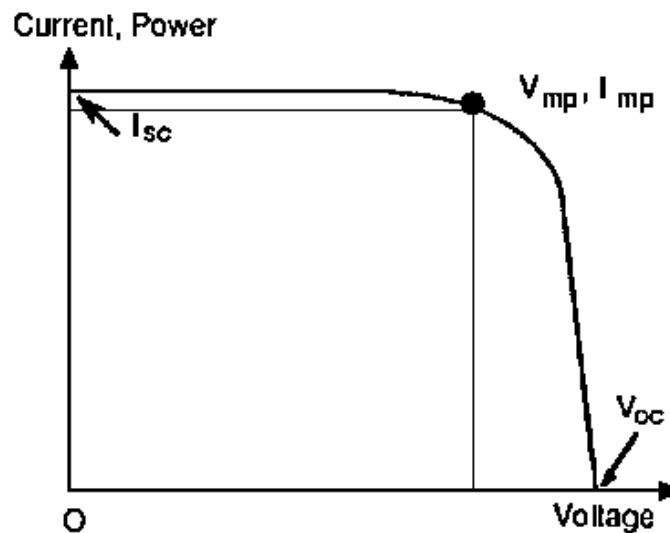


**Gambar 6.3** Tahapan proses pengolahan bahan dasar sel surya hingga terbentuk modul surya

### Karakteristik Arus dan Tegangan Sel Surya

Ketika dikenai cahaya daya listrik yang dihasilkan sel surya bergantung pada kemampuan perangkat sel surya tersebut untuk memproduksi tegangan ketika diberi beban dan arus melalui beban pada waktu yang sama. Kemampuan ini direpresentasikan dalam kurva arus-tegangan (I-V) seperti ditunjukkan pada Gambar 6.4.

Ketika sel pada kondisi tanpa sebab tahanan atau hubungan singkat (*short circuit*), arus yang dihasilkan dinamakan arus short circuit ( $I_{sc}$ ), sementara pada kondisi terbuka/open dimana beban dianggap tidak hingga, maka dihasilkan tegangan listrik yang disebut tegangan open-circuit. ( $V_{oc}$ ). Titik pada kurva I-V yang menghasilkan arus dan tegangan maksimum disebut titik daya maksimum (MPP), yakni perkalian antara arus maksimum ( $I_{mp}$ ) dan tegangan maksimum ( $V_{mp}$ )



Gambar 3.3. Karakteristik I-V sel surya

Karakteristik lain dari sebuah sel surya adalah perbandingan antara daya keluaran maksimum terhadap daya teoritisnya yang disebut dengan *fill factor* ( $ff$ ) dinyatakan dengan persamaan

$$ff = \frac{V_{mp} I_{mp}}{V_{oc} I_{sc}} \dots\dots\dots (6.4)$$

Kualitas dari sel surya biasanya dinyatakan dengan nilai *fill factor* yang menunjukkan besarnya kemampuan sel surya menyerap cahaya yang diterimanya. Atau sering juga dinyatakan dengan nilai efisiensi (dalam percobaan ini tidak diamati). Semakin besar nilai *fill factor* atau efisiensinya maka sel tersebut semakin baik. Daya maksimum yang dapat dihasilkan oleh sel surya dapat dinyatakan dengan persamaan

$$P_{\max} = V_{OC} \cdot I_{OC} \cdot ff \dots\dots\dots(6.5)$$

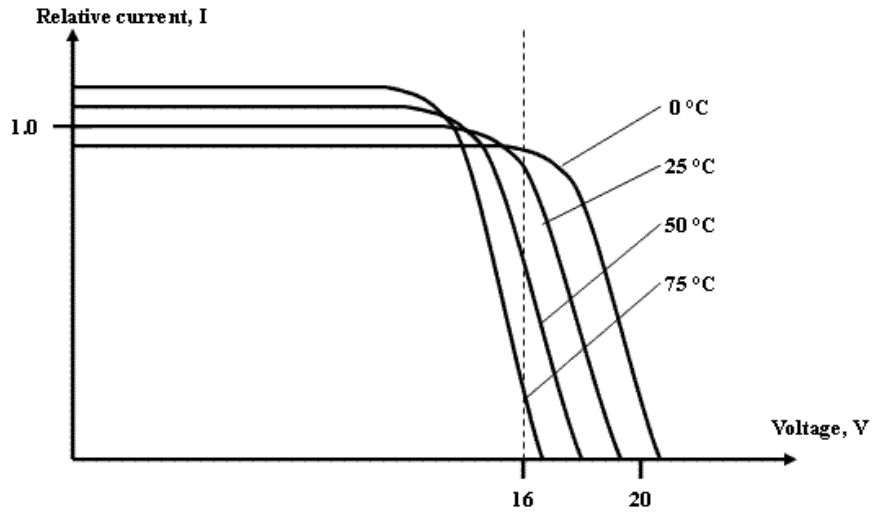
Performansi global dari sebuah sel surya sering kali dinyatakan dengan efisiensi ( $\eta$ ). Secara umum efisiensi sel surya merupakan perbandingan antara daya maksimum yang dihasilkan sel surya ( $P_{\max}$ ) dengan sinar matahari yang diterima luasan sel ( $P_{\text{cahaya}}$ ), secara matematis dapat dituliskan

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{\text{cahaya}}} \dots\dots\dots(6.6)$$

### Faktor Pengoperasian Sel Surya

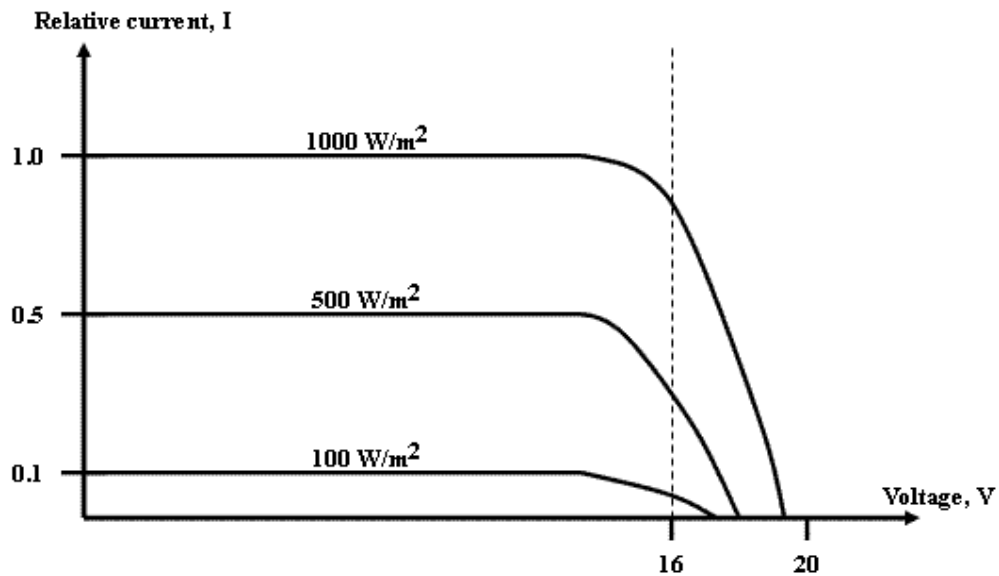
Performansi dan daya keluaran dari sel surya dipengaruhi oleh kondisi pengoperasiannya antara lain:

- a. Temperatur: Karakteristik sel surya pada umumnya diuji dan dilaporkan pada temperatur standard 25°C. Pada kondisi nyata di lapangan temperatur mungkin berbeda dengan saat pengujian. Hal tersebut mempengaruhi daya keluarannya. Secara umum kenaikan temperatur pengoperasian sel surya akan menyebabkan penurunan Voc secara signifikan sehingga menyebabkan penurunan daya keluarannya. Pengaruh kenaikan temperatur pengoperasian sebuah sel surya ditunjukkan pada Gambar 6.5. Pada kondisi real kecepatan tiup angin disekitar lokasi pengoperasian akan mempengaruhi temperatur sel surya.



Gambar 3.4. Efek dari temperatur sel surya terhadap I-V

- b. Radiasi matahari. Radiasi matahari di bumi dan berbagai lokasi bervariasi, dan sangat tergantung keadaan spektrum solar ke bumi. Tingkat radiasi matahari yang mengenai permukaan sel surya berpengaruh signifikan pada arus listrik keluaran, *current* (I), dan sedikit pada tegangan (Gambar 6.6). Hal tersebut tentu saja berpengaruh terhadap daya keluaran sel surya. Tingkat radiasi yang diterima sel surya akan dipengaruhi oleh orientasi (hadap sel surya) terhadap matahari dan kondisi atmosfer (seperti awan, debu, kelembaban udara, dsb.)



Gambar 3.5. Efek dari tingkat radiasi pada sel surya terhadap I-V

## Jenis-Jenis Sel Surya

Hingga saat ini terdapat beberapa jenis solar sel yang berhasil dikembangkan oleh para peneliti untuk mendapatkan device solar sel yang memiliki efisiensi yang tinggi atau untuk mendapatkan device solar sel yang murah dan mudah dalam pembuatannya.

Kristal tunggal (*mono cristalline*) berlapis/*wafer*. Tipe ini dalam perkembangannya mampu menghasilkan efisiensi yang sangat tinggi. Masalah terbesar yang dihadapi dalam pengembangan silikon kristal tunggal untuk dapat diproduksi secara komersial adalah harga yang sangat tinggi sehingga membuat solar sel panel yang dihasilkan menjadi tidak efisien sebagai sumber energi alternatif.

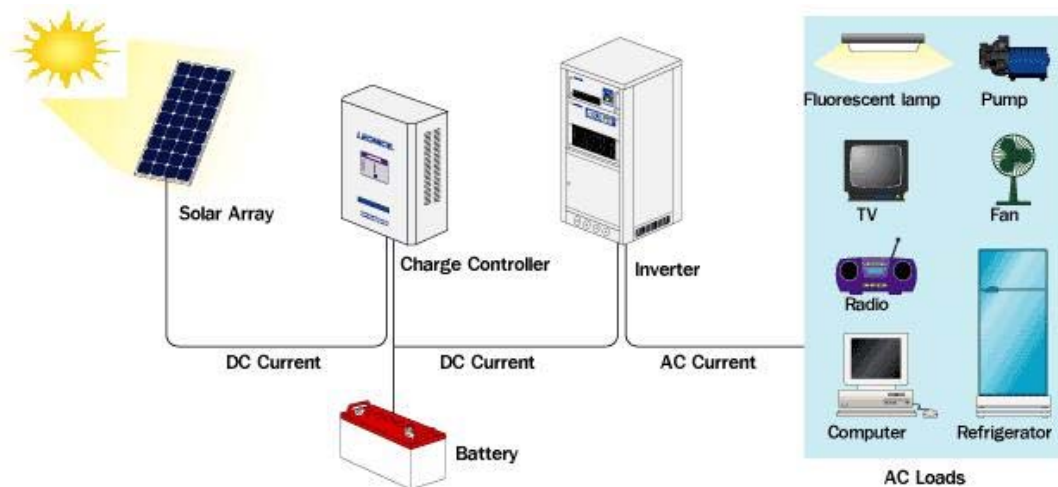
Poli kristal (*polycrystalline*) berlapis/*wafer*. Saat ini, hampir sebagian besar panel solar sel yang beredar di pasar komersial berasal dari *screen printing* jenis silikon poli kristal ini. Wafer silikon poli kristal dibuat dengan cara membuat lapisan-lapisan tipis dari batang silikon dengan metode *wire-sawing*. Jenis solar sel tipe ini memiliki harga pembuatan yang lebih murah meskipun tingkat efisiensinya lebih rendah jika dibandingkan dengan silikon kristal tunggal.

Amorphous (*thin film*). Ide pembuatan jenis solar sel lapisan tipis adalah untuk mengurangi biaya pembuatan solar sel mengingat tipe ini hanya menggunakan kurang dari 1% dari bahan baku silikon jika dibandingkan dengan bahan baku untuk tipe silikon wafer. Metode yang paling sering dipakai dalam pembuatan silikon jenis lapisan tipis ini adalah dengan PECVD dari gas silane dan hidrogen. Lapisan yang dibuat dengan metode ini menghasilkan silikon yang tidak memiliki arah orientasi kristal atau yang dikenal sebagai *amorphous* silikon (non kristal). Selain menggunakan material dari silikon, solar sel lapisan tipis juga dibuat dari bahan semikonduktor lainnya yang memiliki efisiensi solar sel tinggi seperti *Cadmium Telluride* (Cd Te) dan *Copper Indium Gallium Selenide* (CIGS). Pertumbuhan teknologi sel surya di dunia memang menunjukkan harapan akan solar sel yang murah dengan memiliki efisiensi yang tinggi.

### Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

Dalam pemasangannya, sistem PLTS dapat dibedakan menjadi tiga golongan besar masing masing:

- a. *Stand-alone*, sistem ini berdiri sendiri untuk mensuplai energi listrik sesuai dengan kebutuhan. Biasanya sistem *stand alone* dipasang pada daerah terpencil dimana sumber listrik lain tidak ditemukan. Untuk mensuplai kebutuhan listrik dimalam hari atau pada saat tidak ada radiasi matahari maka sistem PLTS *stand alone* dilengkapi dengan baterai penyimpan. Disamping itu diperlukan juga komponen-komponen pendukung seperti *charge controller* serta *inverter* untuk mendukung peralatan yang memakai listrik AC. Gambar 3.6 menunjukkan diagram sistem PLTS stand alone dalam mendukung berbagai kebutuhan listrik dalam rumah tangga. Disamping itu, berbagai keperluan peralatan listrik mungkin tidak membutuhkan komponen baterai seperti kalkulator tenaga surya, pompa air tenaga surya (bekerja hanya pada siang hari), dan berbagai peralatan lainnya.



**Gambar 3.6** Komponen sistem PLTS stand alone. (sumber: <http://www.ecosolarenergy.com.au>)

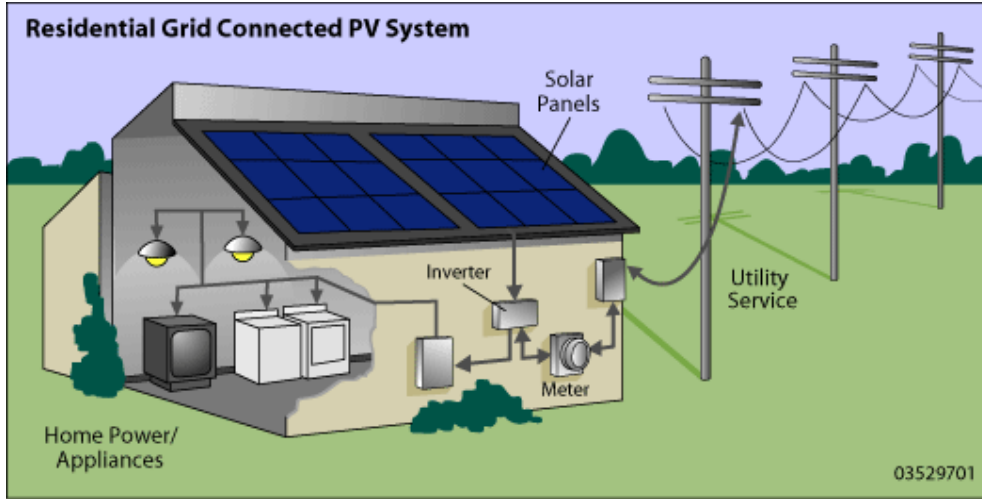
- b. Tipe *isolated grid*, tipe ini biasanya digunakan untuk beban listrik besar terisolasi dan terkonsentrasi, bisa dikombinasikan dengan sumber energi lain dalam operasi hybrid.

Gambar 6.8 adalah contoh sistem PLTS hybrid dengan pembangkit listrik tenaga angin.



**Gambar 3.7.** Sistem PLTS hybrid dengan pembangkit listrik tenaga angin

- c. Tipe *grid connected*, tipe ini digunakan pada daerah yang telah memiliki sistem jaringan listrik komersial, dan sistem langsung output energi surya ke dalam jaringan listrik. Pada beberapa negara telah menerapkan kebijakan bagi warganya untuk mendukung sistem *grid connected* energi terbarukan termasuk PLTS. Pada musim panas saat energi matahari berlimpah maka energi listrik dari sel surya disalurkan ke jaringan listrik milik pemerintah dan dalam hal ini si pemilik sistem PLTS akan mendapatkan kompensasi. Sebaliknya, pada musim dimana sedikit energi matahari maka kekurangan kebutuhan listrik si pemilik sistem PLTS akan tersuplai dari jaringan listrik negara, dan dia akan membayar tagihan listrik sesuai pemakaian. Gambar 6.9 a memperlihatkan sistem *grid connected* PLTS dalam suatu rumah dan Gambar 6.9 b PLTS *grid connected* skala besar.



Gambar 3.8 a. Sistem grid connected PLTS dalam suatu rumah.



Gambar 3.9 b. PLTS grid connected skala besar, Rovigo, Italy (sumber: <http://energyunion.eu>)

# BAB 4

## ENERGI GRAVITASI AIR

Ketika berada pada ketinggian tertentu maka air mempunyai energi potensial gravitasi, dan saat mengalir atau bergerak ke posisi yang lebih rendah energi potensial tersebut berubah menjadi energi kinetik. Energi kinetik inilah yang kemudian dikonversi menjadi energi mekanik pada turbin, dan turbin menggerakkan generator untuk menghasilkan listrik. Karena energi yang dikonversi berasal dari energi potensial gravitasi dan energi kinetik maka sumber energi air merupakan sumber energi yang murah dan relatif mudah didapat. Pada prinsipnya energi yang dimiliki air dapat dimanfaatkan dan digunakan dalam wujud energi mekanis maupun energi listrik. Pada jaman dahulu kincir air banyak dimanfaatkan untuk berbagai keperluan seperti penggilingan gandum, penggergajian kayu, mesin tekstil dan lain lain sebagainya melalui pemanfaatan arus sungai atau air terjun. Mulai sekitar abad 19 turbin air banyak dimanfaatkan sebagai pembangkit listrik untuk keperluan rumah tangga maupun industri.

### 4.1. ENERGI MEKANIK DAN DAYA AIR

Dua faktor utama yang menentukan besarnya tenaga air yang dimiliki oleh suatu sumber air adalah head dan debit air. Head merupakan beda ketinggian antara muka air pada reservoir dengan muka air yang menyentuh dan menggerakkan turbin air, diukur secara vertikal. Energi potensial yang dimiliki oleh sejumlah air pada ketinggian tertentu secara fisika dirumuskan sebagai:

$$E_p = mgh \dots\dots\dots(4.1)$$

dengan

$m$  adalah massa total air (kg)

$h$  adalah head (m)

$g$  adalah percepatan gravitasi ( $m/s^2$ )

Daya merupakan energi tiap satuan waktu, sehingga persamaan (4.1) dapat dinyatakan sebagai :

$$\frac{E_p}{t} = P = \frac{m}{t} gh$$

Dalam fluida diketahui bahwa massa per waktu  $\left(\frac{m}{t}\right)$  tidak lain adalah densitas dikalikan dengan debit aliran,  $\rho Q$  sehingga daya oleh sebuah sumber air dapat dirumuskan:

$$P = \rho Qgh \dots\dots\dots(4.2)$$

dimana

$P$  adalah daya (watt) yaitu

$Q$  adalah debit aliran ( $m^3/s$ )

$\rho$  adalah densitas air ( $kg/m^3$ )

Ditinjau dari gerakan air sedang mengalir maka energi kinetik air yang dimiliki suatu sumber dirumuskan:

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 \dots\dots\dots(4.3)$$

dengan  $v$  adalah kecepatan aliran air dalam  $m/s$ . sehingga daya air yang tersedia dapat dinyatakan dengan persamaan.

$$P = \frac{1}{2}\rho Qv^2 \dots\dots\dots(4.4)$$

Dalam mekanika fluida dikenal persamaan kontinuitas yang menyatakan bahwa debit aliran merupakan perkalian antara kecepatan alir dengan luas penampang aliran, secara matematis

$$Q = Av$$

dengan  $A$  adalah luas penampang aliran air ( $m^2$ ), sehingga besar daya air yang mengalir dapat dinyatakan dengan persamaan

$$P = \frac{1}{2}\rho Av^3 \dots\dots\dots (4.5)$$

#### 4.2 PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA AIR (PLTA)

Pembangkit listrik tenaga air (PLTA) memanfaatkan beda ketinggian dan jumlah debit pada aliran air. Sumber air yang dapat dimanfaatkan dapat berupa saluran irigasi, sungai, bendungan atau air terjun. Aliran air ini akan memutar poros turbin sehingga menghasilkan energi mekanik yang selanjutnya menggerakkan generator dan generator menghasilkan listrik.

Besarnya daya listrik yang dihasilkan oleh sebuah sistem PLTA bergantung pada faktor-faktor berikut:

- Ketinggian efektif (head)
- Debit air
- Effisiensi turbin
- Effisiensi generator
- Effisiensi sistem transmisi

Ketiga komponen effisiensi: turbin, generator, dan sistem transmisi sering juga dikombinasi menjadi effisiensi total. Secara matematika besarnya daya keluaran sistem PLTA dapat dirumuskan:

$$P_{out} = \rho \times Q \times h \times g \times \eta_{turbin} \times \eta_{generator} \times \eta_{transmisi}$$

atau

$$P_{out} = \rho \times Q \times h \times g \times \eta_{total}$$

Dimana

$P_{out}$  = daya keluaran sistem PLTA (W)

$Q$  = debit aliran ( $m^3/s$ )

$\rho$  = densitas air ( $kg/m^3$ )

$g$  = percepatan gravitasi ( $m/s^2$ )

$h$  = head (m)

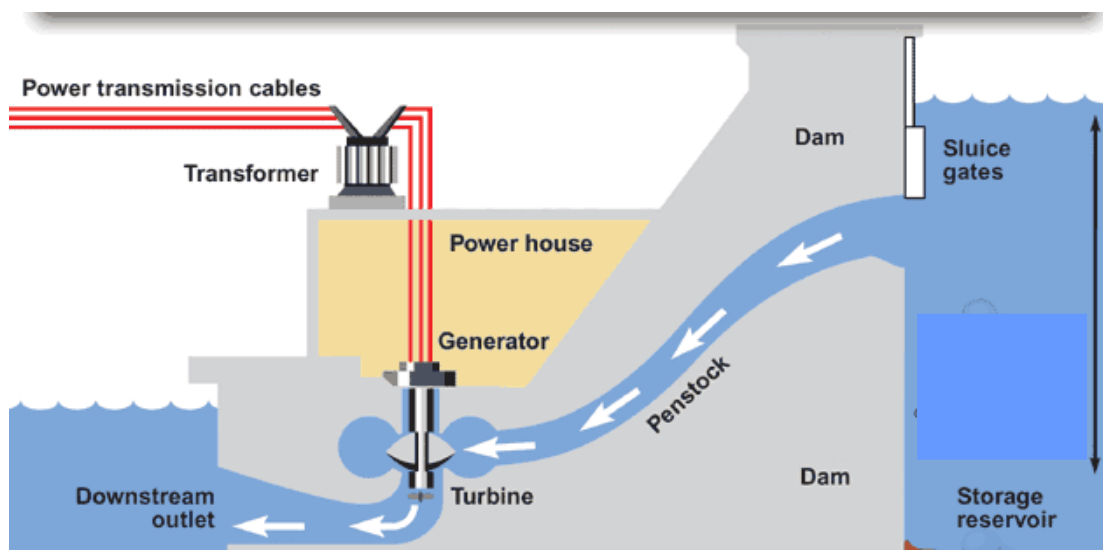
$\eta$  = effisiensi

Berdasarkan besarnya daya keluaran yang dihasilkan pembangkit listrik tenaga air digolongkan menjadi beberapa jenis:

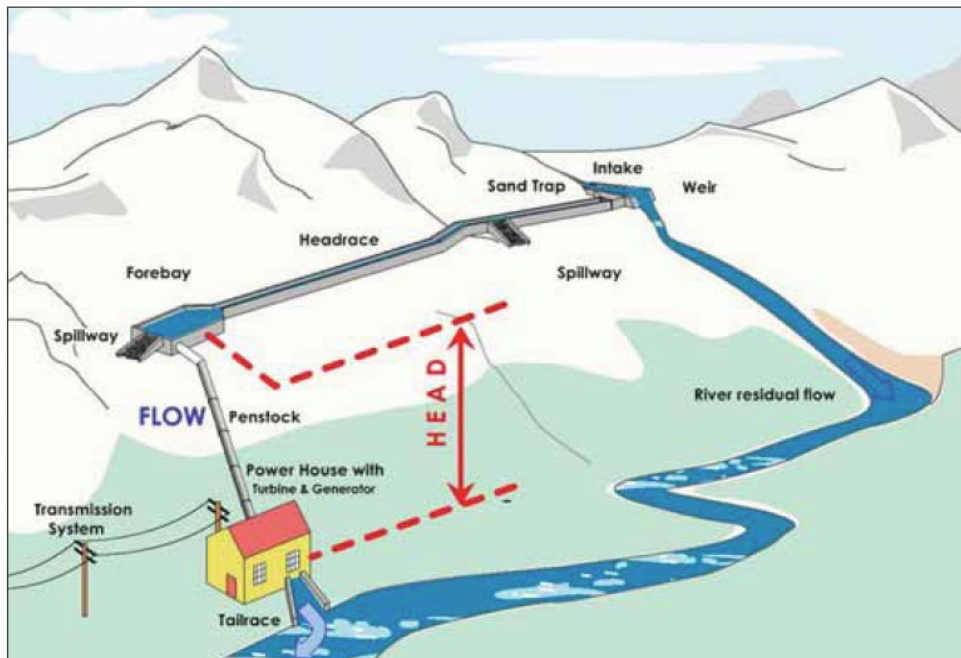
1. *Large-hydro* : daya keluaran lebih dari 100 MW
2. *Medium-hydro*: daya keluaran antara 15 – 100 MW
3. *Small-hydro* : daya keluaran antara 1 – 15 MW
4. *Mini-hydro* : daya keluaran diatas 100 kW, tetapi dibawah 1 MW
5. *Micro-hydro*: daya keluaran antara 5kW – 100 kW
6. *Pico-hydro* : daya keluaran yang dikeluarkan 5kW

### 4.3 KOMPONEN SISTEM PLTA

Pembangkit listrik tenaga air dapat dipasang di suatu lokasi yang mempunyai potensi seperti air terjun, aliran sungai, bendungan dan lain lain. Contoh skema PLTA untuk kondisi sumber air yang berbeda ditunjukkan pada Gambar 4.1 a dan b masing-masing untuk PLTA bendungan dan pembagian aliran sungai. Air sungai merupakan salah satu potensi yang cukup besar untuk dapat membangkitkan tenaga listrik. Diperkirakan potensi tenaga air yang terdapat di seluruh Indonesia mencapai sebesar 75 GW untuk produksi listrik. Namun kenyataannya potensi ini belum dimanfaatkan secara maksimal.



**Gambar 4.1 a.** Diagram sebuah sistem PLTA dengan bendungan (sumber: environment Canada)



**Gambar 4.1 b.** Diagram sebuah sistem PLTA dengan pembagian aliran sungai

Pada prinsipnya sebuah sistem pembangkit listrik tenaga air terdiri dari beberapa komponen utama termasuk:

### **Bendungan (Weir) dan Intake**

Pada umumnya untuk PLTA skala micro atau pico instalasinya memanfaatkan aliran sungai atau saluran irigasi langsung, sementara untuk PLTA dengan tipe yang lebih besar biasanya menggunakan jenis waduk (bendungan besar). Pada PLTA microhidro konstruksi bangunan intake untuk mengambil air langsung dapat berupa bendungan (weir) yang melintang sepanjang lebar sungai atau langsung membagi aliran air sungai tanpa dilengkapi bangunan bendungan. Lokasi intake harus dipilih secara cermat untuk menghindari masalah di kemudian hari.

### **Saluran Pembawa (Head Race)**

Komponen ini pada umumnya terdapat pada PLTA skala micro. Saluran pembawa berfungsi untuk mengalirkan air dari intake sampai ke bak penenang. Perencanaan saluran penghantar hendaknya memperhitungkan hal hal berikut:

- Minimum kehilangan tinggi tekan (head losses)
- Konstruksi dan Struktur bangunan yang memadai
- Nilai ekonomis yang tinggi

- Efisiensi fungsi
- Aman terhadap tinjauan teknis
- Mudah pengerjaannya
- Mudah pemeliharannya

### **Pipa Pesat (Penstock)**

Pipa pesat (penstock) adalah pipa yang berfungsi untuk mengalirkan air dari bak penenang (forebay tank) ke turbin air. Hal-hal yang perlu diperhatikan dalam perencanaan dan konstruksi penstock antara lain:

- material: mempertimbangkan kondisi operasi, sistem penyambungan, berat, aksesibilitas dan cost
- ukuran dan diameter: mempertimbangkan ketersediaan material, kemudahan proses pembuatan, keamanan, dan (friction losses). Sementara ketebalan penstock dipilih untuk menahan tekanan hidrolis dan surge pressure yang dapat terjadi.

### **Pintu Saluran Pembuangan**

Pintu saluran pembuangan ini berfungsi untuk membuang air apabila terjadi kelebihan volume air pada saluran pembawa.

### **Kolam Penenang (Forebay Tank)**

Fungsi utama kolam penenang adalah

- untuk mengendapkan dan menyaring kembali air agar kotoran tidak masuk dan merusak turbin.
- untuk menenangkan aliran air yang akan masuk ke dalam pipa pesat (penstock).

### **Pintu Pengatur**

Pintu pengatur berfungsi untuk mengatur volume air yang akan masuk dari kolam penenang ke pipa pesat.

### **Rumah Pembangkit (Power House)**

Pada rumah pembangkit ini terdapat turbin, generator dan peralatan lainnya. Bangunan ini menyerupai rumah dan diberi atap untuk melindungi peralatan dari hujan dan gangguan-gangguan lainnya.

### **Saluran Buang (Tail Race)**

Saluran buang berfungsi mengalirkan air keluar setelah memutar turbin.

### **Turbin Air**

Turbin air dikembangkan pada abad 19 dan digunakan secara luas untuk pembangkit tenaga listrik. Turbin air mengubah energi potensial air menjadi energi mekanis. Energi mekanis diubah dengan generator listrik menjadi tenaga listrik. Lebih rinci tentang jenis-jenis turbin air di bahas pada bagian 4.4.

### **Generator**

Energi mekanis oleh turbin dikonversi menjadi energi listrik berarus bolak balik oleh generator. Generator dihubungkan dengan turbin melalui gigi-gigi putar sehingga ketika baling-baling turbin berputar maka generator juga ikut berputar. Generator selanjutnya merubah energi mekanik dari turbin menjadi energi elektrik. Generator di PLTA bekerja seperti halnya generator pembangkit listrik lainnya. Lebih rinci tentang jenis-jenis turbin air di bahas pada bagian 4.5

### **Jalur Transmisi**

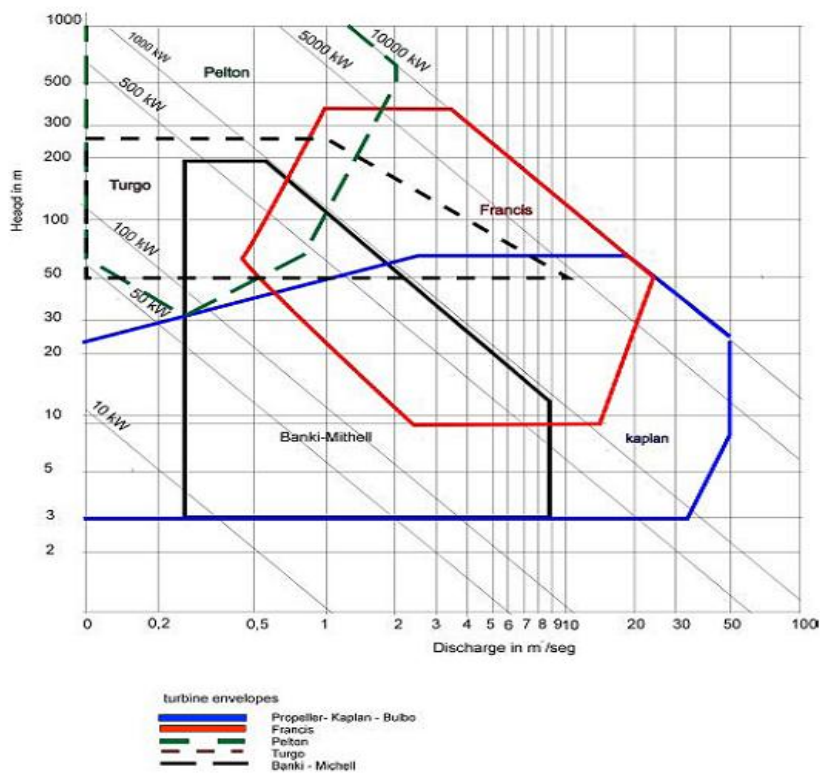
Jalur transmisi berfungsi menyalurkan energi listrik dari PLTA menuju rumah-rumah dan pusat industri.

## **4.3 TURBIN AIR**

Energi potensial air berubah menjadi energi mekanis dalam bentuk putaran oleh turbin air Berdasarkan prinsip kerjanya turbin air digolongkan menjadi dua type yaitu *turbin impuls* (*impulse turbine*) dan *turbin reaksi* (*reaction turbine*)

Tabel 1.1 Jenis Turbin Air

	Head Tinggi	Head Sedang	Head Rendah
<b>Turbin Impuls</b>	Pelton Turgo	cross-flow multi-jet Pelton Turgo	cross-flow
<b>Turbin Reaksi</b>		Francis	propeller Kaplan



Normal range of operation by Turbine type

Gambar 4.2 Daerah kerja turbin air

## Turbin Impuls

Pada turbin impuls energi potensial air diubah menjadi energi kinetik pada nozzle. Air yang keluar nozzle membentur sudu turbin sedemikian sehingga arah kecepatan aliran berubah sehingga terjadi perubahan momentum (impuls). Hal ini mengakibatkan roda turbin berputar. Pada turbin impuls tekanan air yang keluar dari sama dengan tekanan atmosfer sekitarnya.

## Turbin Pelton



**Gambar 4.3** Turbin Pelton

Sumber.

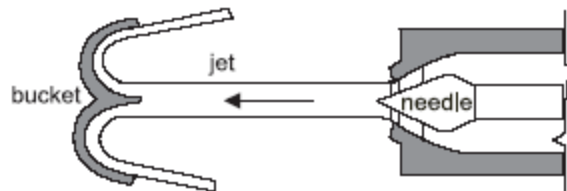
[http://en.wikipedia.org/wiki/pelton\\_wheel](http://en.wikipedia.org/wiki/pelton_wheel)

Turbin Pelton merupakan turbin impuls. Turbin Pelton terdiri dari satu set sudu jalan yang diputar oleh pancaran air yang disemprotkan dari satu atau lebih alat yang disebut nosel. Turbin Pelton adalah salah satu dari jenis turbin air yang paling efisien. Turbin Pelton adalah turbin yang cocok digunakan untuk head tinggi.



**Gambar 4.4 a.** Nozzle

Sumber: <http://europa.eu.int/en/comm/dg17/hydro/layman2.pdf>

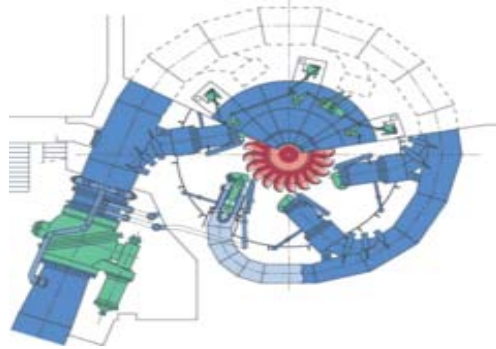


**Gambar 4.4 b.** Nozle

Sumber: <http://europa.eu.int/en/comm/dg17/hydro/layman2.pdf>

Bentuk sudu turbin terdiri dari dua bagian yang simetris. Sudu dibentuk sedemikian sehingga pancaran air akan mengenai tengah-tengah sudu dan pancaran air tersebut akan

berbelok ke kedua arah sehingga bisa membalikkan pancaran air dengan baik dan membebaskan sudu dari gaya-gaya samping. Untuk turbin dengan daya yang besar, sistem penyemprotan airnya dibagi lewat beberapa nosel. Dengan demikian diameter pancaran air bisa diperkecil dan ember sudu lebih kecil.

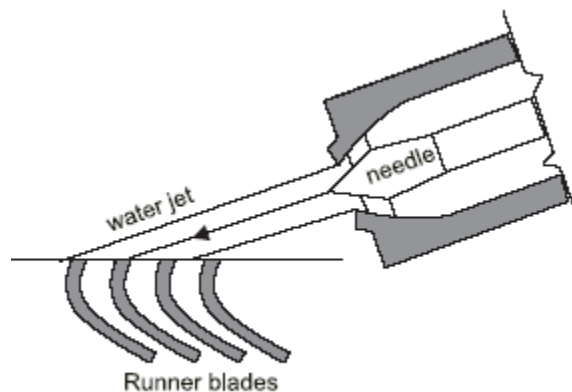


**Gambar 4.5** Turbin Pelton dengan banyak nozle  
Sumber: [http://en.wikipedia.org/wiki/pelton\\_wheel](http://en.wikipedia.org/wiki/pelton_wheel)

Turbin Pelton untuk pembangkit skala besar membutuhkan head lebih kurang 150 meter tetapi untuk skala mikro head 20 meter sudah mencukupi.

### **Turbin Turgo**

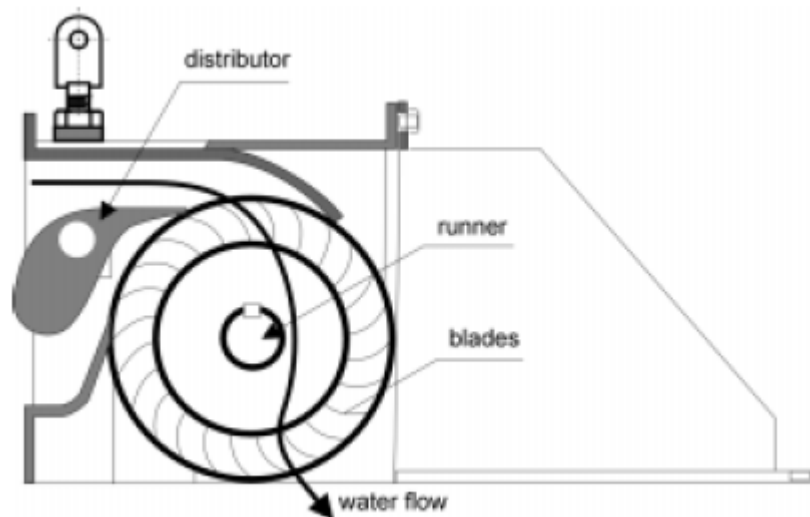
Turbin Turgo dapat beroperasi pada head 30 s/d 300 m. Seperti turbin pelton turbin turgo merupakan turbin impuls, tetapi sudunya berbeda. Pancaran air dari nozzle membentur sudu pada sudut  $20^\circ$ . Kecepatan putar turbin turgo lebih besar dari turbin Pelton. Akibatnya dimungkinkan transmisi langsung dari turbin ke generator sehingga menaikkan efisiensi total sekaligus menurunkan biaya perawatan.



**Gambar 4.6.** Sudu turbin Turgo dan nozzle  
Sumber: <http://europa.eu.int/en/comm/dg17/hydro/layman2.pdf>

## Turbin Crossflow

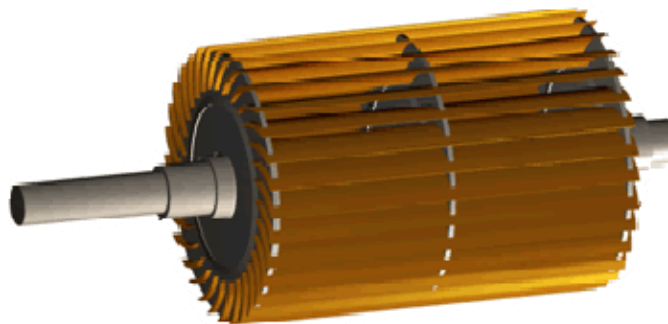
Salah satu jenis turbin impuls ini juga dikenal dengan nama Turbin Michell-Banki yang merupakan penemunya. Selain itu juga disebut Turbin Osberger yang merupakan perusahaan yang memproduksi turbin crossflow. Turbin crossflow dapat dioperasikan pada debit 20 litres/sec hingga 10 m<sup>3</sup>/sec dan head antara 1 s/d 200 m.



**Gambar 4.7** Turbin Crossflow

Sumber: <http://europa.eu.int/en/comm/dg17/hydro/layman2.pdf>

Turbin Crossflow menggunakan nozzle persegi panjang yang lebarnya sesuai dengan lebar runner. Pancaran air masuk turbin dan mengenai sudu sehingga terjadi konversi energi kinetik menjadi energi mekanis. Air mengalir keluar membentur sudu dan memberikan energinya (lebih rendah dibanding saat masuk) kemudian meninggalkan turbin. Runner turbin dibuat dari beberapa sudu yang dipasang pada sepasang piringan paralel.



**Gambar 4.8.** Turbin Crossflow

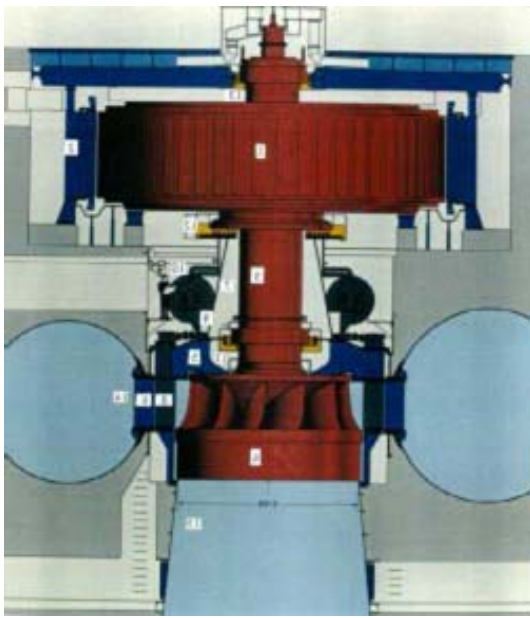
Sumber: <http://home.carolina.rr.com/microhydro>

## Turbin Reaksi

Sudu pada turbin reaksi mempunyai profil khusus yang menyebabkan terjadinya penurunan tekanan air selama melalui sudu. Perbedaan tekanan ini memberikan gaya pada sudu sehingga *runner* (bagian turbin yang berputar) dapat berputar. Turbin yang bekerja berdasarkan prinsip ini dikelompokkan sebagai turbin reaksi. Runner turbin reaksi sepenuhnya tercelup dalam air dan berada dalam rumah turbin.

## Turbin Francis

Turbin Francis merupakan salah satu turbin reaksi. Turbin dipasang diantara sumber air tekanan tinggi di bagian masuk dan air bertekanan rendah di bagian keluar. Turbin Francis menggunakan sudu pengarah. Sudu pengarah mengarahkan air masuk secara tangensial. Sudu pengarah pada turbin Francis dapat merupakan suatu sudu pengarah yang tetap ataupun sudu pengarah yang dapat diatur sudutnya. Untuk penggunaan pada berbagai kondisi aliran air penggunaan sudu pengarah yang dapat diatur merupakan pilihan yang tepat.

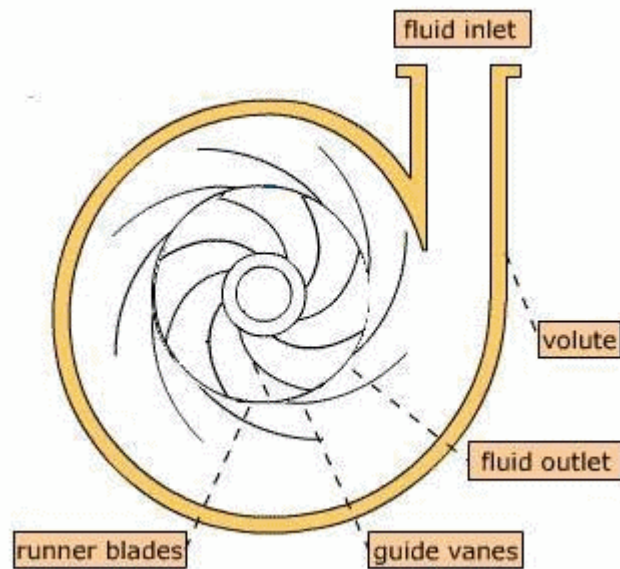


Keterangan gambar ;

1. Generator Rotor
2. Generator Stator
3. Turbine Shaft
4. Runner
5. Turbine Head Cover
6. Stay Ring Discharge Ring
7. Supporting Cone
8. Guide Vane
9. Operating Ring
10. Guide Vane Servomotor
11. Lower Guide Bearing
12. Thrust Bearing
13. Upper Guide Bearing
14. Spiral Case
15. Draft Tube Cone

**Gambar 4.9.** Turbin Francis

Sumber. [http://en.wikipedia.org/wiki/francis\\_turbine](http://en.wikipedia.org/wiki/francis_turbine)

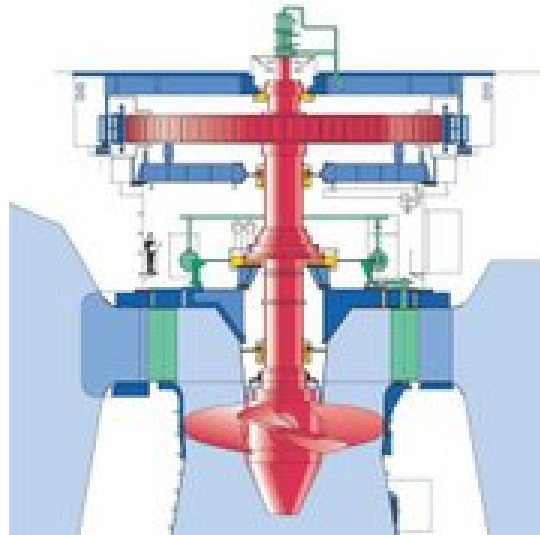


**Gambar 4.10.** Sketsa Turbin Francis

Sumber : <http://lingoalex.com/bilc/engine.html>

### Turbin Kaplan & Propeller

Turbin Kaplan dan propeller merupakan turbin reaksi aliran aksial. Turbin ini tersusun dari propeller seperti pada perahu.. Propeller tersebut biasanya mempunyai tiga hingga enam sudu.



**Gambar 4.11.** Turbin Kaplan

Sumber. [http://en.wikipedia.org/wiki/Kaplan\\_turbine](http://en.wikipedia.org/wiki/Kaplan_turbine)

## 4.5 GENERATOR AC (ALTERNATOR)

Pada umumnya listrik yang dipergunakan saat ini bekerja pada sumber tegangan bolak balik (ac), sehingga, generator ac merupakan alat yang paling penting untuk menghasilkan tenaga listrik. Generator ac, sering disebut alternator, mempunyai ukuran yang bervariasi menurut beban yang akan disuplai. Alternator pada PLTA mempunyai ukuran yang sangat besar, membangkitkan ribuan kilowatt pada tegangan yang sangat tinggi. Pada kasus lain, misalnya alternator di mobil, mempunyai ukuran sangat kecil.

### Dasar-dasar Generator AC

Semua generator listrik bergantung kepada prinsip induksi magnet. EMF diinduksikan dalam sebuah kumparan sebagai hasil dari (1) kumparan yang memotong medan magnet, atau (2) medan magnet yang memotong sebuah kumparan. Jika ada gerak relative antara sebuah konduktor dan medan magnet, tegangan akan diinduksikan dalam konduktor. Bagian generator yang mendapat induksi tegangan adalah *armature*. Agar gerak relative terjadi antara konduktor dan medan magnet, semua generator haruslah mempunyai dua bagian mekanis yaitu rotor dan stator.

### Rotating-Armature Alternator

Alternator armature bergerak (*rotating-armature alternator*) mempunyai konstruksi yang sama dengan generator dc yang mana armature berputar dalam sebuah medan magnet stasioner. Pada generator dc, emf dibangkitkan dalam belitan armature dan dikonversikan dari ac ke dc dengan menggunakan komutator (sebagai penyearah). Pada alternator, tegangan ac yang dibangkitkan tidak diubah menjadi dc dan diteruskan kepada beban dengan menggunakan slip ring. Armature yang bergerak dapat dijumpai pada alternator untuk daya rendah dan umumnya tidak digunakan untuk daya listrik dalam jumlah besar.

### Rotating-Field Alternators

Alternator medan berputar mempunyai belitan armature yang stasioner dan sebuah belitan medan yang berputar. Keuntungan menggunakan sistem belitan armature stasioner adalah bahwa tegangan yang dihasilkan dapat dihubungkan langsung ke beban.

Jenis armature berputar memerlukan slip ring dan sikat untuk menghantarkan arus dari armature ke beban. Armature, sikat dan slip ring sangat sulit untuk diisolasi, dan percikan bunga api dan hubung singkat dapat terjadi pada tegangan tinggi. Karenanya, alternator tegangan tinggi biasanya menggunakan jenis medan berputar. Karena tegangan yang dikenakan pada medan berputar adalah tegangan searah yang rendah, problem yang dijumpai pada tegangan tinggi tidak terjadi.

Armature stasioner, atau stator, pada alternator jenis ini mempunyai belitan yang dipotong oleh medan putar (rotating magnetic field). Tegangan yang dibangkitkan pada armature sebagai hasil dari aksi potong ini adalah tegangan ac yang akan dikirimkan kepada beban.

Stator terdiri dari inti besi yang dilaminasi dengan belitan armature yang melekat pada inti ini.

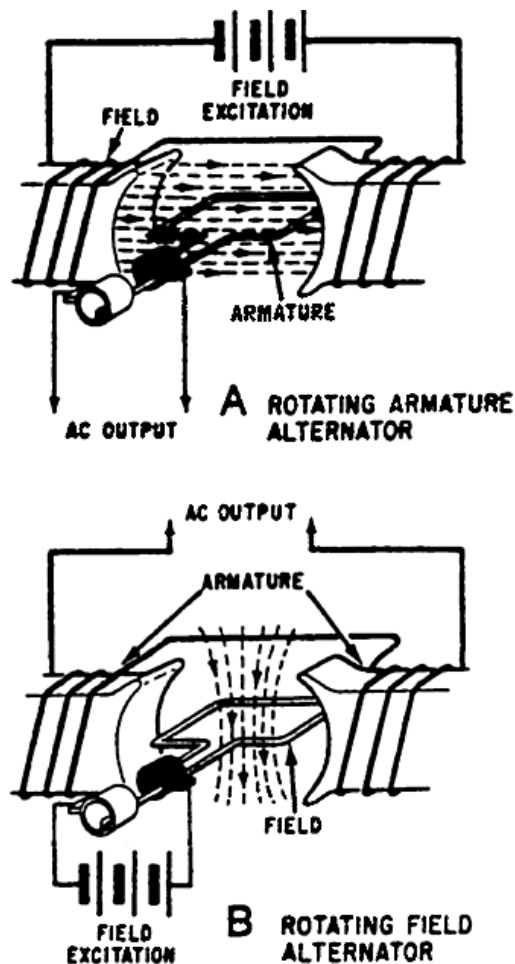


FIGURE 13-4. Types of AC Generators.

## Soal-Soal.

1. Pada suatu aliran sungai dapat didirikan sebuah PLTA dengan head 20 meter. Jika rata-rata debit aliran air sungai adalah 1500 liter/detik.
  - a. Hitung rata-rata daya keluaran PLTA yang dapat diharapkan jika efisiensi turbin air = 60%
  - b. Perkirakan jenis turbin yang cocok untuk sistem ini
  
2. Sebuah PLTA memiliki debit air penggerak turbin sebesar  $20 \text{ m}^3 / \text{detik}$  dengan daya tinggi air terjun 130 m. Apabila efisiensi turbin bersama generator 90% dan jika PLTA tersebut terbeban penuh 24 jam. Hitung:
  - a. Jumlah produksi kWh nya.
  - b. Pemakaian airnya.
  - c. Besar pemakaian air yang diperlukan untuk memproduksi 1 MWh.
  
3. Sebuah PLTA mempunyai tinggi terjun 240 meter dan instalasinya maksimum bisa melewatkan air sebanyak  $40 \text{ m}^3/\text{detik}$ . PLTA ini mempunyai kolam tando tahunan. Debit air sungai penggerak PLTA ini dalam satu tahun (365 hari) adalah sebagai berikut:  
Selama 245 hari rata-rata =  $60 \text{ m}^3/\text{det}$   
Selama 120 hari rata-rata =  $10 \text{ m}^3/\text{det}$   
Efisiensi rata-rata PLTA ini = 90%  
Ditanya (penguapan air dalam kolam diabaikan):
  - a. Berapa besar daya yang bisa dibangkitkan PLTA ini?
  - b. Berapa banyak air yang dibutuhkan untuk menghasilkan 1 kWh
  - c. Berapa besar volume kolam tando yang diperlukan dengan pengertian bahwa PLTA selalu siap operasi penuh sepanjang tahun?
  - d. Berapa besar produksi kWh yang bisa dicapai PLTA ini dalam satu tahun?
  - e. Apabila PLTA dioperasikan penuh maka berapa hari hal ini bisa dilakukan dalam 1 tahun?

# BAB 5

## ENERGI ANGIN

### 5.1 PENDAHULUAN

Energi angin telah dimanfaatkan oleh manusia sejak lama. Dahulu kala energi angin dimanfaatkan untuk sarana transportasi laut yakni untuk menggerakkan perahu layar, disamping itu pada perkembangannya energi angin banyak juga digunakan untuk pengolahan dan proses pertanian. Akhir-akhir ini energi angin merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang dimanfaatkan untuk pembangkit listrik.

Pemanfaatan energi angin dapat dilakukan diberbagai tempat dimana terdapat potensi angin, baik di daerah landai maupun dataran tinggi, bahkan dapat diterapkan di laut. Sebelum pendirian suatu sistem pembangkit energi angin, perlu diidentifikasi daerah-daerah yang memiliki potensi energi angin yang tinggi tetap agar pemanfaatannya optimal.

Angin tidak lain adalah udara yang bergerak dari tekanan yang tinggi ke tekanan yang rendah, yang terjadi dialam. Perbedaan tekanan udara disebabkan oleh perbedaan suhu udara akibat pemanasan atmosfer yang tidak merata oleh sinar matahari. Udara yang bergerak tersebut mempunyai massa, kerapatan dan kecepatan. Karena mempunyai massa dan kecepatan maka secara fisika angin mempunyai energi kinetik dan energi potensial. Namun pada angin energi kinetik lebih dominan daripada energi potensial.



**Gambar 5.1.** Turbin angin terpasang pada suatu daerah  
(sumber: <http://windturbinezone.com/wind-technology/wind-farms>)

## 5.2 JENIS-JENIS ANGIN

Angin terjadi sebagai akibat dari sirkulasi udara dipermukaan bumi yang dipengaruhi oleh penyinaran matahari dan rotasi bumi yang mengakibatkan adanya perbedaan tekanan dan berat jenis udara. Perbedaan berat jenis dan tekanan udara inilah yang akan menimbulkan adanya pergerakan udara yang didefinisikan sebagai angin. Berdasarkan prinsip terjadinya, angin dapat dibedakan sebagai berikut :

- **Angin Laut dan Angin Darat** : Angin jenis ini terjadi sebagai akibat adanya perbedaan suhu antara daratan dan lautan. Air di lautan bersifat lebih lambat dalam melepaskan panas dari radiasi sinar matahari daripada daratan, sehingga suhu di laut pada malam hari lebih tinggi dibandingkan dengan suhu di daratan. Perbedaan suhu ini akan menyebabkan terjadinya perbedaan tekanan udara di daratan dan lautan. Pada malam hari tekanan udara di laut lebih rendah dari pada di darat. Hal inilah yang menyebabkan angin akan bertiup dari arah darat ke arah laut. Sebaliknya, pada siang hari dari pukul 09.00 sampai dengan pukul 16.00 angin akan berhembus dari laut ke darat akibat sifat air yang lebih lambat menyerap panas matahari.

- **Angin Lembah**: Angin lembah adalah angin yang bertiup dari arah lembah ke arah puncak gunung yang biasa terjadi pada siang hari. Angin ini terjadi sebagai akibat adanya perbedaan suhu antara lembah dan puncak gunung.

- **Angin Musim** : Angin jenis ini sering disebut angin Muson, merupakan angin periodik yang terjadi terutama di Samudra Hindia dan sebelah selatan Asia. Angin Musim Barat/Angin Muson Barat adalah angin yang mengalir dari Benua Asia (musim dingin) ke Benua Australia (musim panas). Apabila angin melewati tempat yang luas, seperti perairan dan samudra, maka angin ini akan mengandung curah hujan yang tinggi. Angin Musim Barat menyebabkan Indonesia mengalami musim hujan. Angin ini terjadi pada bulan Desember, Januari dan Februari, dan maksimal pada bulan Januari . Angin Musim Timur/Angin Muson Timur adalah angin yang mengalir dari Benua Australia (musim dingin) ke Benua Asia (musim panas). Angin ini menyebabkan Indonesia mengalami musim kemarau, karena angin melewati celah-celah sempit dan berbagai gurun. Musim kemarau di Indonesia terjadi pada bulan Juni, Juli dan Agustus, dan maksimal pada bulan Juli.

- **Angin Permukaan:** Kecepatan dan arah angin ini dipengaruhi oleh perbedaan yang diakibatkan oleh material permukaan Bumi dan ketinggiannya. Secara umum, suatu tempat dengan perbedaan tekanan udara yang tinggi akan memiliki potensi angin yang kuat. Ketinggian mengakibatkan pusat tekanan menjadi lebih intensif.

- **Angin Topan:** Angin topan adalah pusaran angin kencang yang sering terjadi di wilayah tropis di antara garis balik utara dan selatan. Angin topan disebabkan oleh perbedaan tekanan dalam suatu sistem cuaca.

### 8.2.1 Perhitungan Potensi Energi Dan Daya Angin

Karena angin memiliki massa dan bergerak (mempunyai kecepatan) maka angin memiliki energi kinetik. Dalam fisika energi kinetik dirumuskan

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 \dots\dots\dots(5.1)$$

dengan  $v$  adalah kecepatan angin dalam m/s. Jika massa jenis angin  $\rho$  dan dengan ditinjau suatu luasan  $A$  yang dilalui angin yang bergerak dengan kecepatan  $v$ , maka massa angin  $m$  yang lewat setiap pada selang waktu  $t$  adalah:

$$m = \rho \times A \times v \times t \dots\dots\dots(5.2)$$

sementara daya adalah energi per satuan waktu, sehingga dengan mensubstitusikan massa angin ke persamaan 5.1 dapat dirumuskan daya angin sebagai berikut:

$$P = \frac{1}{2}\rho Av^3 \dots\dots\dots (5.3)$$

Dimana:

$P$  = daya angin (watt)

$\rho$  = massa jenis angin (kg/m<sup>3</sup>)

$A$  = luas penampang yang dilalui angin (m<sup>2</sup>)

$v$  = kecepatan angin (m/s)

Seringkali potensi daya di suatu daerah didefinisikan sebagai daya persatuan luas dengan satuan W/m<sup>2</sup>, dituliskan

$$P_{potensi} = \frac{1}{2}\rho v^3 \text{ [W/m}^2\text{]} \dots\dots\dots(5.4)$$

Perhatikan bahwa daya angin berbanding lurus dengan pangkat tiga kecepatannya. Hal tersebut sangat penting diperhatikan dalam merancang suatu pembangkit energi tenaga angin.

Meskipun perbedaan kecepatan yang kecil pada kecepatan akan mempengaruhi daya keluaran yang signifikan. Misalnya kecepatan angin 2 m/s dan 3 m/s akan menghasilkan potensi daya perbedaan daya keluaran antara 8 W/m<sup>2</sup> dan 27 W/m<sup>2</sup>.

### 5.3 DAYA KELUARAN TURBIN ANGIN

Secara umum daya keluaran sebuah turbin angin dapat dihitung dengan persamaan:

$$P_{turbin} = \eta_{turbin} \times \frac{1}{2} \times \rho \times A \times v^3 \dots\dots\dots(5.5)$$

Daya angin maksimum yang dapat diekstrak oleh turbin angin dengan luas sapuan rotor  $A$  bergantung dari efisiensi turbin. Penelitian menunjukkan bahwa untuk turbin angin jenis sumbu horizontal efisiensi maksimum adalah 16/27 (= 59.3%). Angka ini dinamakan batas Betz (*Betz limit*), diambil dari nama seorang ilmuwan Jerman Albert Betz. Pada kenyataannya karena ada rugi-rugi gesekan dan kerugian di ujung sudu, efisiensi aerodinamik dari turbin atau rotor,  $\eta_{turbin}$  ini akan lebih kecil lagi yaitu berkisar pada harga maksimum 0.45 saja untuk sudu yang dirancang dengan sangat baik.

Untuk keperluan praktis sering dipakai rumus pendekatan sederhana dengan menganggap efisiensi turbin dan massa jenis angin menjadi suatu konstanta  $k$ , sehingga persamaan menjadi

$$P_{turbin} = k \times A \times v^3$$

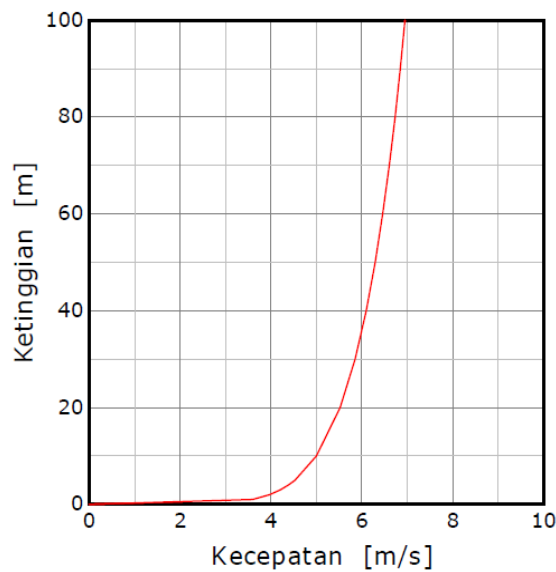
Dengan nilai konstanta  $k = 1.37 \times 10^{-5}$

### 5.4 PROFIL GESERAN ANGIN (*WIND SHEAR PROFILE*)

Angin mempunyai profil geseran atau profil kecepatan ketika mengalir melewati permukaan bumi. Pada lapisan terdekat dengan permukaan bumi kecepatan relatif angin terhadap permukaan bumi sama dengan nol. Kemudian kecepatan ini menjadi semakin tinggi sebanding ketinggian dari permukaan bumi. Ada dua jenis profil geseran angin yang biasa digunakan untuk menghitung energi: profil geseran angin eksponensial (*exponential wind shear profile*) dan profil geseran angin kekasaran permukaan (*surface roughness wind shear stress*). Profil geseran fluida eksponensial yang diungkapkan dengan persamaan:

$$v = v_{ref} \left( \frac{h}{h_{ref}} \right)^\alpha \dots\dots\dots (5.7)$$

Di mana,  $v$  adalah kecepatan pada ketinggian  $h$ ,  $v_{ref}$  dan  $h_{ref}$  masing-masing adalah kecepatan dan ketinggian di mana pengukuran dilakukan. Profil ini tergantung pada kekasaran permukaan. Untuk fluida secara umum  $\alpha$  mempunyai nilai  $1/7$ . Profil angin pada daerah yang memiliki banyak pepohonan seperti perkebunan atau hutan, nilai  $\alpha$  dapat mencapai  $0.3$ , sedangkan untuk laut atau daerah-daerah yang terbuka,  $\alpha$  mempunyai nilai  $0.1$ .



**Gambar 5.2** Profil umum geseran angin.

## 5.5 .ANALISIS POTENSI ANGIN

Sebelum memutuskan untuk mendirikan suatu sistem pembangkit tenaga angin disuatu lokasi maka dipertimbangkan potensi angin dilokasi yang dimaksud untuk mengetahui perkiraan jumlah energi yang dapat diperoleh, penentuan turbin yang sesuai, dan yang hal hal yang berkaitan dengan biaya dan teknis. Analisa potensi angin bertujuan untuk memperoleh informasi berikut:

1. Durasi kecepatan angin rendah dan kecepatan angin tinggi,
2. Pola angin berkala dalam periode tertentu,
3. Kecepatan angin di daerah yang tidak jauh dengan lokasi pengukuran,

4. Berapa banyak energi yang dapat tersedia pertahunnya.

Kecepatan angin dianalisa dan dihitung berdasarkan data pengukuran, baik dari Badan Meteorologi dan Geofisika (BMG) maupun hasil pengukuran sebagai suplemen dan bahan rujukan. Pada umumnya data kecepatan angin yang tersedia dalam rata-rata per jam atau rata-rata per hari selama kurun waktu satu bulanan dalam satu tahun akan diolah dengan menggunakan metode - metode statistik standar pengolahan data angin. Hasil analisis biasanya ditampilkan dalam bentuk grafik - grafik distribusi, termasuk:

- **Distribusi Waktu:** Distribusi waktu menampilkan plot data bulanan dengan rata-rata perhari dalam bentuk histogram untuk memperlihatkan fluktuasi angin perharinya. Kecepatan rata-rata angin perbulan dan pertahun dapat dihitung dari grafik ini. Jika resolusi sampling pengambilan data rata-rata semakin kecil, misalkan 10 menit, informasi tambahan yang sangat berguna seperti kecepatan angin *gust* dapat juga dikumpulkan. Informasi lain yang didapat dari distribusi waktu adalah informasi mengenai perioda angin rendah di bawah suatu kecepatan angin rujukan. Untuk suatu sistem pembangkit listrik tenaga angin informasi ini berguna untuk mengetahui perioda di mana turbin angin tidak beroperasi.

- **Distribusi Frekuensi:** Distribusi frekuensi kecepatan angin umumnya ditampilkan dalam bentuk histogram dengan ordinat jam dan aksis interval kecepatan angin. Distribusi frekuensi menunjukkan jumlah jam perbulan atau pertahun untuk setiap nilai kecepatan angin. Distribusi frekuensi dapat dipakai untuk menghitung keluaran energi turbin angin.

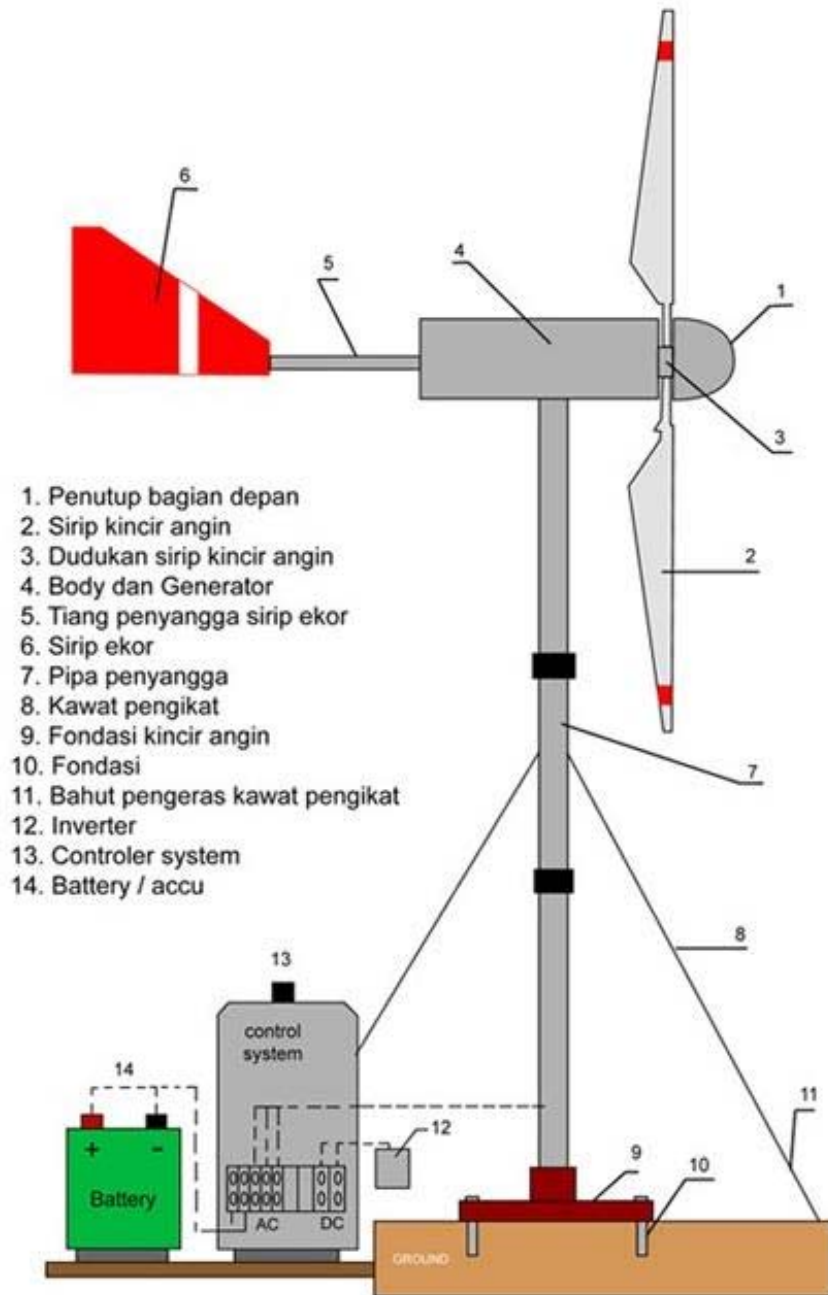
- **Distribusi Durasi dan Distribusi Kumulatif:** Penyajian data angin dalam bentuk distribusi durasi berguna untuk mengetahui jumlah jam di mana kincir/turbin angin akan bekerja dan jumlah jam di mana kincir/turbin angin akan menghasilkan daya yang berlebihan. Jika kurva yang didapat lebih horisontal maka daerah kecepatan angin tertentu akan lebih konstan. Sebaliknya semakin curam kurva distribusi durasi maka pola angin di berbagai daerah aliran semakin fluktuatif. Kebalikan dari distribusi durasi adalah distribusi kumulatif. Distribusi kumulatif akan memberikan informasi mengenai jumlah jam di mana kincir/turbin angin tidak dapat beroperasi pada angin rendah atau berapa jam turbin angin beroperasi di bawah daya nominalnya.

- **Distribusi Weibull:** Pada analisis energi angin, suatu fungsi distribusi dipakai untuk memperkirakan keluaran turbin angin secara lebih akurat dan mengetahui berbagai informasi mengenai pola angin. Fungsi distribusi yang sangat mendekati dengan data angin seperti ini adalah fungsi Weibull. Fungsi Weibull yang digunakan umumnya adalah Fungsi Distribusi Kumulatif dan Fungsi Densitas Probabilitas. Fungsi Distribusi Kumulatif menunjukkan fraksi atau kemungkinan dimana kecepatan angin tertentu lebih kecil atau sama dengan suatu kecepatan angin referensi.

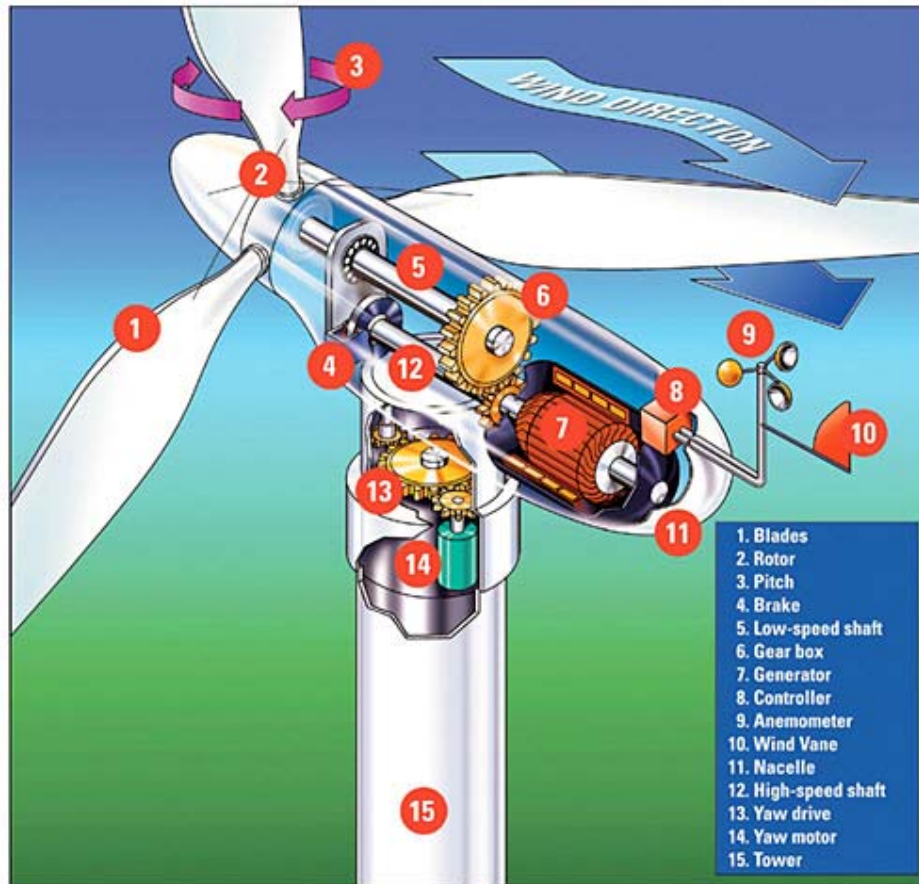
#### 5.4 Pembangkit Listrik Tenaga Angin

Sebuah sistem pembangkit listrik tenaga angin terdiri dari beberapa bagian termasuk tiang penyangga (tower), turbin dan komponennya, generator, dan sistem penyimpanan dan konversi listrik AC-DC. Masing-masing komponen untuk setiap bagian (untuk sebuah turbin angin sumbu horizontal) ditunjukkan pada Gambar 5.3 . Bilah-bilah kincir angin (*blades*) akan berputar ketika angin bertiup, perputaran bilah-bilah ini akan menyebabkan berputarnya turbin angin yang kemudian membuat generator dalam body akan ikut berputar juga sehingga terbangkitlah listrik AC. Sebagai akibat dari angin yang tidak konstan menyebabkan tegangan listrik AC yang dihasilkan mempunyai frekuensi yang selalu berubah-ubah. Untuk mengatasinya hal ini pada umumnya listrik AC yang dihasilkan dikonversi ke DC terlebih dahulu dan disimpan kedalam baterai. Listrik DC dari baterai selanjutnya dikonversi kembali ke tegangan AC dengan menggunakan inverter.

Generator pada sistem pembangkit listrik tenaga angin mempunyai prinsip yang sama pada generator-generator pembangkit listrik lainnya. Prinsip kerjanya menggunakan teori medan elektromagnetik. Secara sederhana, 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. Gambar 5.4 menunjukkan diagram dan komponen-komponen dari sebuah generator pada sebuah turbin angin poros horizontal.



**Gambar 5.3** Komponen sebuah PLTA turbin horizontal.  
 sumber : <http://www.kincirangin.info/plta-gbr.php>



**Gambar 5.4** Komponen generator pada sebuah PLTA turbin horizontal.  
sumber : <http://www.alternative-energy-news.info>

- **Kincir Angin:** Menurut sumbu putarnya kincir angin digolongkan menjadi dua type, masing-masing kincir angin yang berputar dengan sumbu horizontal (*Horizontal-axis wind turbines (HAWTs)*), dan yang berputar dengan sumbu vertical (*Vertical-axis wind turbines (VAWTs)*). Gambar 5.5 menunjukkan berbagai bentuk kincir angin.

Turbin angin dengan sumbu horizontal mempunyai sudu yang berputar dalam bidang vertikal seperti halnya propeler pesawat terbang. Turbin angin ini biasanya mempunyai sudu dengan bentuk irisan melintang khusus di mana aliran udara pada salah satu sisinya dapat bergerak lebih cepat dari aliran udara di sisi yang lain ketika angin melewatinya. Fenomena ini menimbulkan daerah tekanan rendah pada belakang sudu dan daerah tekanan tinggi di depan sudu. Perbedaan tekanan ini membentuk gaya yang menyebabkan sudu berputar.

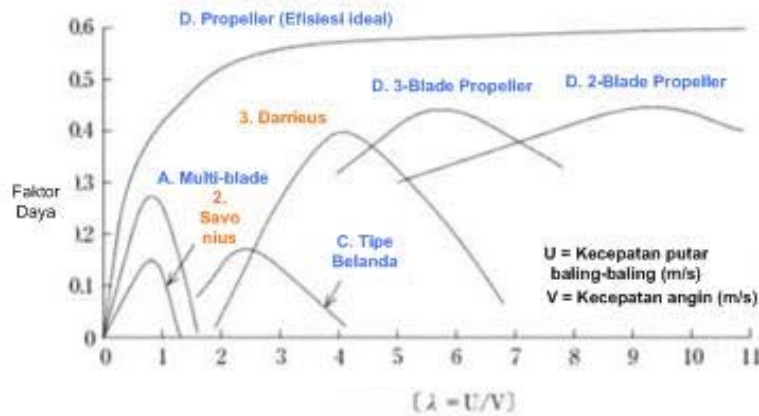
Turbin angin dengan sumbu vertikal bekerja dengan prinsip yang sama seperti halnya kelompok horizontal. Namun, sudunya berputar dalam bidang yang paralel dengan

tanah, seperti *mixer* kocokan telur. Setiap jenis turbin angin memiliki ukuran dan efisiensi yang berbeda. Untuk memilih jenis turbin angin yang tepat untuk suatu kegunaan diperlukan tidak hanya sekedar pengetahuan tetapi juga pengalaman.



**Gambar 7** Jenis-jenis kincir angin  
(sumber: <http://indone5ia.wordpress.com>)

Pemilihan turbin yang sesuai harus didasarkan pada karakteristik angin dilokasi pemasangan turbin. Dengan kata lain karakteristik turbin harus sesuai dengan kondisi angin untuk menghasilkan daya keluaran yang optimum. Kincir angin jenis *multi-blade* dan *Savonius* cocok digunakan untuk aplikasi pada lokasi dimana kecepatan rata-rata angin rendah. Sedangkan kincir angin tipe *Propeller*, paling umum digunakan karena dapat bekerja dengan lingkup kecepatan angin lebih tinggi. Gambar 5.6 menunjukkan karakteristik setiap kincir angin sebagai fungsi dari kemampuannya untuk mengubah energi kinetik angin menjadi energi putar turbin untuk setiap kondisi kecepatan angin.



Gambar 5.6 Karakteristik kincir angin

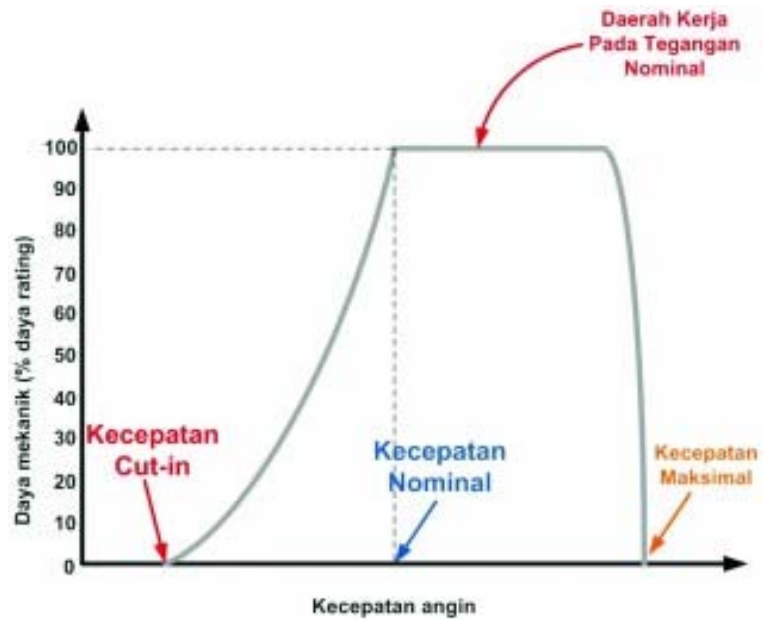
- **Gearbox**: komponen ini berfungsi untuk mengubah putaran rendah pada kincir menjadi putaran tinggi.
- **Brake System** - Komponen ini diperlukan saat angin berhembus terlalu kencang yang dapat menimbulkan putaran berlebih pada generator. Dampak dari kerusakan akibat putaran berlebih diantaranya : *overheat*, rotor *breakdown*, terjadi arus lebih pada generator.
- **Generator** - Ada berbagai jenis generator yang dapat digunakan dalam sistem turbin angin, antara lain generator serempak (*synchronous generator*), generator tak-serempak (*unsynchronous generator*), rotor sangkar maupun rotor belitan ataupun generator magnet permanen. Penggunaan generator serempak memudahkan kita untuk mengatur tegangan dan frekuensi keluaran generator dengan cara mengatur-atur arus medan dari generator. Sayangnya penggunaan generator serempak jarang diaplikasikan karena biayanya yang mahal, membutuhkan arus penguat dan membutuhkan sistem kontrol yang rumit. Generator tak-serempak sering digunakan untuk sistem turbin angin dan sistem mikrohidro, baik untuk sistem *fixed-speed* maupun sistem *variable speed*.
- **Penyimpan energi**: Pada sistem pembangkit listrik tenaga angin mandiri (*stand alone*), dibutuhkan baterai untuk menyimpan energi listrik berlebih yang dihasilkan turbin angin.
- **Tower**: Secara umum tower dapat dibedakan menjadi 3 jenis masing masing *Guyed*, *Lattice* dan *Mono-structure*. Setiap jenis tower memiliki karakteristik masing-masing dalam hal biaya, perawatan, efisiensinya, ataupun dari segi kesusahan dalam pembuatannya (Gambar 5.7)



**Gambar 5.7** : Berbagai tipe tower sistem pembangkit listrik tenaga angin: *Guyed* (kiri) *Lattice* (tengah) *Mono-structure* (kanan)

### Karakteristik Kerja Turbin Angin

Setiap turbin angin mempunyai karakteristik kerja turbin. Karakteristik ini menjadi acuan pengguna untuk memilih turbin yang tepat untuk suatu lokasi. Daerah kerja angin dapat dibagi menjadi 3, yaitu (a) *cut-in speed* (b) kecepatan kerja angin rata-rata (kecepatan nominal) (c) *cut-out speed*. Gambar 5.8 menunjukkan pembagian daerah kerja dari turbin angin. Secara ideal, turbin angin dirancang dengan kecepatan cut-in yang seminimal mungkin, kecepatan nominal yang sesuai dengan potensi angin lokal, dan kecepatan cut-out yang semaksimal mungkin. Namun secara mekanik kondisi ini sulit diwujudkan karena kompensasi dari perancangan turbin angin dengan nilai kecepatan maksimal ( $V_{\text{cutoff}}$ ) yang besar adalah  $V_{\text{cut}}$  dan  $V_{\text{rated}}$  yang relatif akan besar pula.



**Gambar 5.8** Karakteristik kerja turbin angin  
(sumber: <http://indone5ia.wordpress.com>)

# BAB 6

## ENERGI BIOMASSA

### 6.1. PENDAHULUAN

Biomassa bahan atau senyawa organik hasil proses fotosintetik, baik berupa produk maupun buangan. Pepohonan, rumput, ubi, limbah pertanian, limbah hutan, tinja dan kotoran ternak merupakan contoh biomassa. Bagi manusia, biomassa merupakan kebutuhan utama sebagai sumber perolehan akan kebutuhan serat, bahan pangan, pakan ternak, minyak nabati, bahan bangunan dan sebagainya.

Pada proses pembentukan biomassa melalui fotosintetik, butir-butir hijau daun (klorofil) pada tumbuhan bekerja sebagai sel surya, menyerap energi radiasi matahari dan mengubah karbondioksida dengan air menjadi senyawa karbon, hydrogen dan oksigen (*hydrocarbon*).

Disamping sebagai kebutuhan primer biomassa juga digunakan sebagai sumber energi terutama untuk biomassa yang nilai ekonomisnya rendah, misalnya limbah atau bahan buangan biomassa lainnya dimana produk primernya sudah diambil.

Sumber energi biomassa merupakan salah satu sumber energi terbarukan (*renewable energy*) dimana proses dan ketersediannya terjadi secara berkelanjutan. Di Indonesia, biomassa merupakan sumber daya alam yang sangat penting dengan berbagai produk primer sebagai serat, kayu, minyak, bahan pangan dan lain-lain yang selain digunakan untuk memenuhi kebutuhan domestik juga diekspor dan menjadi tulang punggung penghasil devisa negara.

### 6.2 BIOMASS SEBAGAI SUMBER ENERGI

Indonesia mempunyai potensi biomassa yang sangat besar. Energi dari produk limbah yang berasal dari ternak maupun sisa tanaman pertanian berpotensi untuk dikembangkan. Sebagai negara agraria limbah dari proses pertanian tanaman pangan dan perkebunan berpotensi cukup besar yang dapat dipergunakan untuk keperluan lain seperti bahan bakar nabati. Penggunaan limbah sebagai bahan bakar nabati memberi beberapa keuntungan:

- Meningkatkan efisiensi energi secara keseluruhan karena kandungan energi yang terdapat pada limbah cukup besar dan akan terbuang percuma jika tidak dimanfaatkan.

- Penghematan biaya, karena seringkali membuang limbah bisa lebih mahal dari pada memanfaatkannya.
- Mengurangi keperluan akan tempat penimbunan sampah karena penyediaan tempat penimbunan akan menjadi lebih sulit dan mahal, khususnya di daerah perkotaan.

Akhir-akhir ini biomassa sebagai produk utama untuk sumber energi juga akhir-akhir ini dikembangkan secara pesat. Biodiesel sudah umum dikenal yang diproduksi dari bahan baku kelapa sawit, jarak, kedelai dan lain lain. Sementara bioethanol dihasilkan dari bahan baku seperti tebu, ubi kayu, jagung, sorghum, sago dll.

### **6.3. PRINSIP PEMBAKARAN BAHAN BAKAR**

Pada prinsipnya peristiwa pembakaran bahan bakar merupakan reaksi antara kimia bahan bakar dengan oksigen (O). Pada umumnya bahan bakar mengandung unsur Karbon (C), Hidrogen (H) dan Belerang (S). Unsur yang paling berperan penting terhadap besarnya energi yang dilepaskan adalah C dan H. Kandungan unsur C dan H berbeda-beda untuk masing masing bahan. Banyaknya energi yang dilepaskan pada proses pembakaran disebut entalpi pembakaran. Entalpi pembakaran merupakan beda entalpi antara produk dan reaktan dari proses pembakaran sempurna. Entalpi pembakaran ini dapat dinyatakan sebagai *Higher Heating Value* (HHV) atau *Lower Heating Value* (LHV). Jika seluruh hasil pembakaran dalam wujud cair sedangkan entalpi dinyatakan dalam HHV. Sedangkan LHV jika seluruh air hasil pembakaran dalam bentuk uap.

Pembakaran dapat berlangsung sempurna atau lengkap (*complete combustion*), maupun tidak sempurna/tidak lengkap (*incomplete combustion*). Pada pembakaran sempurna seluruh unsur C bereaksi dengan oksigen menghasilkan CO<sub>2</sub>, seluruh unsur H menghasilkan H<sub>2</sub>O dan seluruh S menghasilkan SO<sub>2</sub>. Pada pembakaran tak sempurna unsur C yang dikandung dalam bahan bakar tidak seluruhnya bereaksi dengan oksigen menghasilkan CO<sub>2</sub>, kadang-kadang juga senyawa lain seperti CO.

### **6.4 KONVERSI ENERGI BIOMASSA**

Biomassa dapat diolah atau dikonversi menjadi berbagai jenis bahan bakar sesuai dengan bentuk dan keperluannya. Secara garis besar teknologi konversi energi biomassa digolongkan menjadi tiga jenis konversi: pembakaran langsung, konversi termo kimia, dan

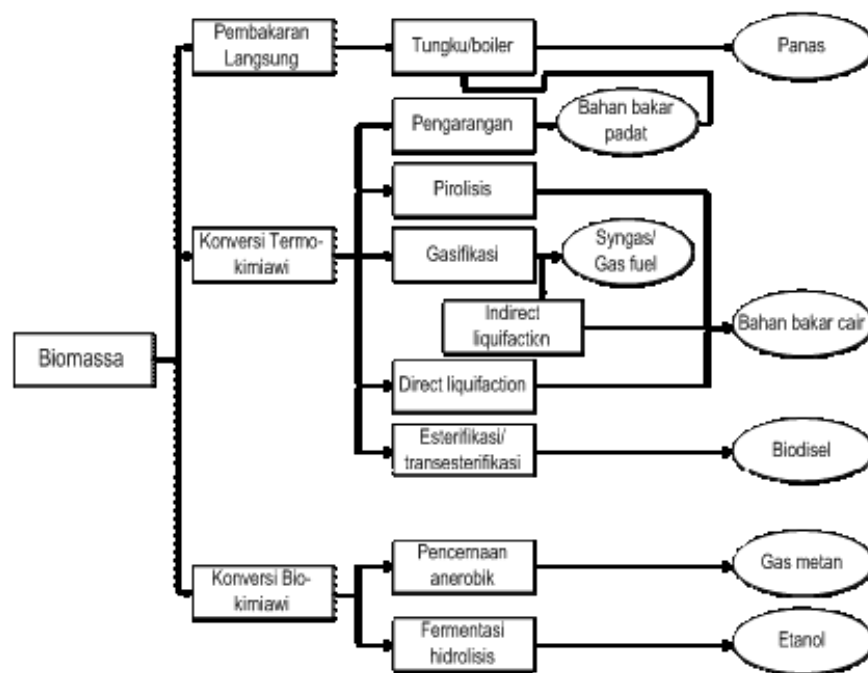
konversi biokimia. Masing –masing teknologi konversi menggunakan metode dan alat yang berbeda.

Teknologi paling sederhana adalah pembakaran langsung untuk menghasilkan panas. Pada umumnya bahan biomassa mudah dibakar secara langsung. Sejak jaman dahulu manusia telah memanfaatkan teknologi pembakaran langsung. Contoh paling sederhana misalnya orang jaman dahulu (bahkan untuk beberapa daerah hingga saat ini) menggunakan kayu bakar untuk memasak.

Pada teknologi konversi termokimiawi, dalam prosesnya diperlukan perlakuan panas untuk memicu terjadinya reaksi kimia dalam menghasilkan bahan bakar. Produk akhir dari teknologi konversi termokimiawi dapat berupa bahan bakar padat maupun bahan bakar cair.

Konversi biokimiawi merupakan teknologi konversi yang menggunakan bantuan mikroba dalam menghasilkan bahan bakar. Produk akhir dari teknologi konversi biokimiawi dapat berupa bakar cair seperti metana dan etanol.

Gambar 6.1 menampilkan jenis – jenis teknologi konversi serta produk akhir bahan bakar energi dari biomassa.



Gambar 6.1. Diagram teknologi biomassa

## Gasifikasi

Gasifikasi biomassa merupakan proses konversi bahan selulosa menjadi bahan bakar yang terjadi dalam suatu reaktor gasifikasi (*gasifier*). Bahan bakar yang dihasilkan dari proses gasifikasi tersebut dapat dipergunakan sebagai bahan bakar motor untuk menggerakkan generator pembangkit listrik.

Selama proses gasifikasi, reaksi kimia utama yang terjadi adalah endotermis (diperlukan panas dari luar selama proses berlangsung). Media yang paling umum digunakan pada proses gasifikasi ialah udara dan uap. Produk yang dihasilkan dapat dikategorikan menjadi tiga bagian utama, yaitu padatan, cairan (termasuk gas yang dapat dikondensasikan) dan gas permanen. Media yang paling umum digunakan dalam proses gasifikasi adalah udara dan uap. Gas yang dihasilkan dari gasifikasi dengan menggunakan udara mempunyai nilai kalor yang lebih rendah tetapi disisi lain proses operasi menjadi lebih sederhana.

Beberapa keunggulan dari teknologi gasifikasi yaitu :

- Mampu menghasilkan produk gas yang konsisten yang dapat digunakan sebagai pembangkit listrik.
- Mampu memproses beragam input bahan bakar termasuk batu bara, minyak berat, biomassa, berbagai macam sampah kota dan lain sebagainya.
- Mampu mengubah sampah yang bernilai rendah menjadi produk yang bernilai lebih tinggi.
- Mampu mengurangi jumlah sampah padat.
- Gas yang dihasilkan tidak mengandung furan dan dioxin yang berbahaya.

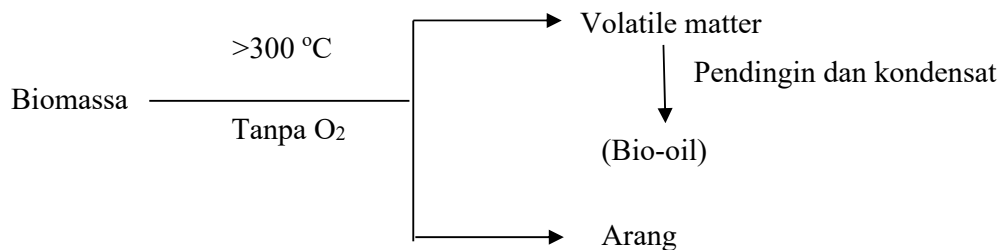
Selama proses gasifikasi terdapat beberapa tahapan proses yaitu:

1. Tahapan pemanasan dimana temperatur padatan naik sampai sebelum terjadi proses pengeringan.
2. Tahap pengeringan dimana terjadi pelepasan uap air dari padatan.
3. Tahap pemanasan lanjut dimana temperatur padatan naik kembali sampai sebelum terjadi proses devolatilisasi.
4. Tahap devolatilisasi dimana volatil dalam padatan keluar sampai tersisa arang. Tergantung dari bahan bakar yang digunakan volatil dapat terdiri dari gas-gas H<sub>2</sub>O, H<sub>2</sub>N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>S, NH<sub>3</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> dan hidrokarbon tidak jenuh.
5. Tahap gasifikasi
6. Tahap pembakaran arang (terjadi jika masih terdapat udara yang tersisa)

Gasifikasi merupakan salah satu alternatif dalam rangka program penghematan dan diversifikasi energi. Selain itu gasifikasi akan membantu mengatasi masalah penanganan dan pemanfaatan limbah pertanian, perkebunan dan kehutanan.

### Pirolisis

Pirolisis adalah proses konversi suatu bahan organik pada suhu tinggi ( $>300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) dan terurai menjadi ikatan molekul yang lebih kecil. Pirolisis merupakan suatu bentuk insinerasi yang menguraikan bahan organik secara kimia melalui pemanasan dengan mengalirkan nitrogen sebagai gas inert. Proses ini menghasilkan uap organik, gas pirolisis dan arang. Uap organik yang dihasilkan mengandung karbon monoksida, metana, karbon dioksida, tar yang mudah menguap dan air. Uap organik kemudian dikondensasikan menjadi cairan. Cairan hasil pirolisis dikenal sebagai bio-oil (bahan bakar cair/minyak).



**Gambar 6. 2.** Skema pengolahan biomassa dengan pirolisis

Jumlah arang yang dihasilkan bergantung pada komposisi awal biomassa. Semakin banyak kandungan volatile matter maka semakin sedikit arang yang dihasilkan karena banyak bagian yang terlepas ke udara. Penentuan komposisi awal biomassa dilakukan dengan uji analisis pendekatan (proximate analysis).

Pada proses pirolisis terdapat beberapa tingkatan proses, yaitu pirolisa primer dan pirolisis sekunder. Pirolisa primer adalah pirolisa yang terjadi pada bahan baku (umpan), sedangkan pirolisa sekunder adalah pirolisa yang terjadi atas partikel dan gas/uap hasil pirolisa primer. Penting diingat bahwa pirolisis adalah penguraian karena panas, sehingga keberadaan  $\text{O}_2$  dihindari pada proses tersebut karena akan memicu reaksi pembakaran.

## Karbonisasi

Karbonisasi merupakan suatu proses untuk mengkonversi bahan organik menjadi arang. Pada proses karbonisasi akan melepaskan zat yang mudah terbakar seperti CO, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>, formaldehid, metana, formik dan acetyl acid serta zat yang tidak terbakar seperti CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O dan tar cair. Gas-gas yang dilepaskan pada proses ini mempunyai nilai kalor yang tinggi dan dapat digunakan untuk memenuhi kebutuhan kalor pada proses karbonisasi.

## Liquification

*Liquification* adalah proses pembentukan bahan bakar cair melalui perubahan wujud: gas (a) dari gas menjadi liquid (cair) melalui proses kondensasi dengan pendinginan, (b) dari padat ke liquid dengan peleburan, bisa juga dengan pemanasan atau penggilingan dan pencampuran dengan cairan lain untuk memutuskan ikatan. Pada pengolahan batubara proses *liquification* menghemat transportasi dan memudahkan dalam pemanfaatan.

## Metana dari Biomassa

Jika terkena air bahan organik pada umumnya secara alamiah akan mengalami fermentasi dengan kondisi anaerobik (tanpa kehadiran oksigen). Proses penguraian secara anaerobik merubah bahan organik menjadi metana dan karbon dioksida, misalnya pada tangki tinja. Pada tahap awal bakteri pembentuk asam menghancurkan bahan organik yang kompleks, serta merubah lemak, protein, dan hidrokarbon menjadi asam organik yang sederhana. Pada tahap selanjutnya asam organik dipecahkan oleh bakteri metan menjadi metana dan dioksida bahan. Persamaan reaksi kimia tahapan ini dinyatakan dengan:

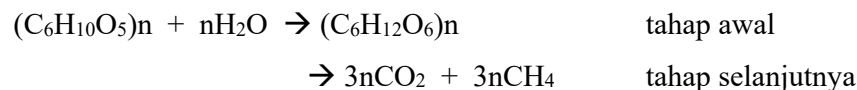
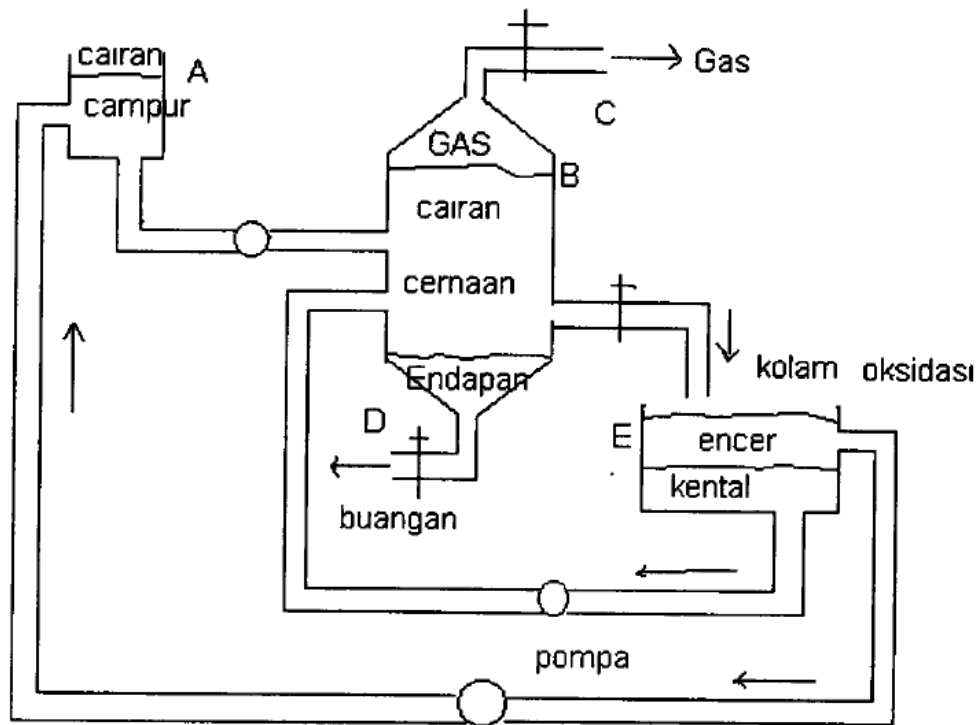


Diagram instalasi gas biomassa secara sederhana seperti diperlihatkan pada Gambar 6.3

Bahan organik dimasukkan di A dan dicampur dengan air dan selanjutnya dipompa ke tangki pencernaan B. Proses pencernaan terjadi di Tangki B. Temperatur proses akan berpengaruh pada kecepatan pencernaan. Bahan bakar gas yang dihasilkan keluar melalui C, sementara endapan yang terjadi dalam tangki B dikeluarkan melalui keran D.



Gambar 6.3 Skema instalasi gas biomassa

Selain anaerobic digestion, proses pembuatan etanol dari biomassa tergolong dalam konversi biokimiawi. Biomassa yang kaya dengan karbohidrat atau glukosa dapat difermentasi sehingga terurai menjadi etanol dan  $\text{CO}_2$ . Akan tetapi, karbohidrat harus mengalami penguraian (hidrolisa) terlebih dahulu menjadi glukosa. Etanol hasil fermentasi pada umumnya mempunyai kadar air yang tinggi dan tidak sesuai untuk pemanfaatannya sebagai bahan bakar pengganti bensin. Etanol ini harus didistilasi sedemikian rupa mencapai kadar etanol di atas 96.5%.

### Biogas

Pada prinsipnya, pembuatan gas bio sangat sederhana, hanya dengan memasukkan substrat (kotoran ternak) ke dalam *digester* yang anaerob. Dalam waktu tertentu gas bio akan terbentuk yang selanjutnya dapat digunakan sebagai sumber energi, misalnya untuk kompor gas atau listrik. Penggunaan *biodigester* dapat membantu pengembangan sistem pertanian dengan mendaur ulang kotoran ternak untuk memproduksi gas bio dan diperoleh hasil samping (by-product) berupa pupuk organik. Selain itu, dengan pemanfaatan *biodigester*

dapat mengurangi emisi gas metan (CH<sub>4</sub>) yang dihasilkan pada dekomposisi bahan organik yang diproduksi dari sektor pertanian dan peternakan, karena kotoran sapi tidak dibiarkan terdekomposisi secara terbuka melainkan difermentasi menjadi energi gas bio.

Potensi kotoran sapi untuk dimanfaatkan sebagai bahan pembuatan gas bio sebenarnya cukup besar, namun belum banyak dimanfaatkan. Bahkan selama ini telah menimbulkan masalah pencemaran dan kesehatan lingkungan. Umumnya para peternak membuang kotoran sapi tersebut ke sungai atau langsung menjualnya ke pengepul dengan harga sangat murah. Padahal dari kotoran sapi saja dapat diperoleh produk-produk sampingan (by-product) yang cukup banyak. Sebagai contoh pupuk organik cair yang diperoleh dari urine mengandung auksin cukup tinggi sehingga baik untuk pupuk sumber zat tumbuh. Serum darah sapi dari tempat-tempat pemotongan hewan dapat dimanfaatkan sebagai sumber nutrisi bagi tanaman, selain itu dari limbah jeroan sapi dapat juga dihasilkan aktivator sebagai alternatif sumber dekomposer. (efek rumah kaca), sehingga upaya ini dapat diusulkan sebagai bagian dari program.

### **Biodiesel**

Biodiesel merupakan bahan bakar dari minyak nabati yang memiliki sifat menyerupai minyak diesel atau solar. Bahan bakar ini ramah lingkungan karena menghasilkan emisi gas buang yang jauh lebih baik dibandingkan dengan diesel/solar, yaitu bebas sulfur, bilangan asap (smoke number) yang rendah; memiliki cetane number yang lebih tinggi sehingga pembakaran lebih sempurna (*clear burning*); memiliki sifat pelumasan terhadap piston mesin; dan dapat terurai (*biodegradable*) sehingga tidak menghasilkan racun (*non toxic*). Menurut hasil penelitian BBPT, biodiesel bisa langsung digunakan 100% sebagai bahan bakar pada mesin diesel tanpa memodifikasi mesin dieselnnya atau dalam bentuk campuran dengan solar pada berbagai konsentrasi mulai dari 5%. Keunggulan biodiesel diantaranya :

- Angka Cetane tinggi (>50), yakni angka yang menunjukkan ukuran baik tidaknya kualitas Solar berdasarkan sifat kecepatan bakar dalam ruang bakar mesin. Semakin tinggi bilangan cetane, semakin cepat pembakaran semakin baik efisiensi termodinamisnya.
- Titik kilat (*flash point*) tinggi, yakni temperatur terendah yang dapat menyebabkan uap Biodiesel menyala, sehingga Biodiesel lebih aman dari bahaya kebakaran pada saat disimpan maupun pada saat didistribusikan dari pada solar.

- Tidak mengandung sulfur dan benzene yang mempunyai sifat karsinogen, serta dapat diuraikan secara alami
- Menambah pelumasan mesin yang lebih baik daripada solar sehingga akan memperpanjang umur pemakaian mesin
- Dapat dengan mudah dicampur dengan solar biasa dalam berbagai komposisi dan tidak memerlukan modifikasi mesin apapun
- Mengurangi asap hitam dari gas asap buang mesin diesel secara signifikan walaupun penambahan hanya 5% - 10% volume biodiesel kedalam solar

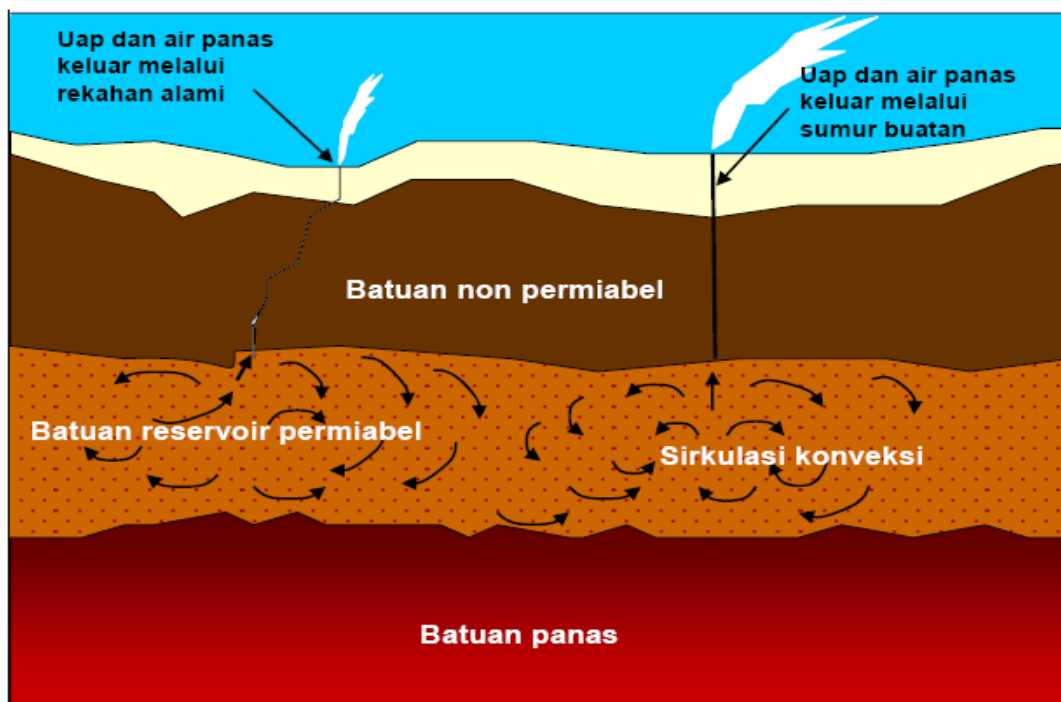
Biodiesel membutuhkan bahan baku minyak nabati yang dapat dihasilkan dari tanaman yang mengandung asam lemak seperti kelapa sawit (*Crude Palm Oil/CPO*), jarak pagar (*Crude Jatropha Oil/CJO*), kelapa (*Crude Coconut Oil/CCO*), sirsak, srikaya, kapuk, dll. Indonesia sangat kaya akan sumber daya alam yang dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku biodiesel. Kelapa sawit merupakan salah satu sumber bahan baku minyak nabati yang prospektif dikembangkan sebagai bahan baku biodiesel di Indonesia, mengingat produksi CPO Indonesia cukup besar dan meningkat tiap tahunnya. Tanaman jarak pagar juga prospektif sebagai bahan baku biodiesel mengingat tanaman ini dapat tumbuh di lahan kritis dan karakteristik minyaknya yang sesuai untuk biodiesel.

# BAB 7

## ENERGI PANAS BUMI

### 7.1 ENERGI PANAS BUMI

Energi panas Bumi (*Geothermal*) adalah energi yang diekstraksi dari panas yang tersimpan di dalam Bumi. Panas bumi merupakan sumber energi panas yang terkandung di dalam air panas, uap air dan batuan bersama mineral ikutan dan gas lainnya yang secara genetik semuanya tidak dapat dipisahkan dalam suatu sistem panas bumi dan untuk pemanfaatannya diperlukan proses penambangan. Energi panas Bumi ini berasal dari aktivitas tektonik di dalam Bumi yang terjadi sejak planet ini diciptakan. Panas bumi mengalir secara kontinu dari dalam bumi menuju ke permukaan yang manifestasinya dapat berupa: gunung berapi, mata air panas, dan geyser.



Gambar 7.1. Diagram sistem sumber panas bumi

Pada keadaan umum semakin jauh ke dalam perut bumi suhu batuan akan makin tinggi. Setiap penurunan 1 km kedalaman ke perut bumi temperatur naik sebesar 25 - 30°C, dengan kata lain setiap kedalaman bertambah 100 meter temperatur naik sekitar 2,5 sampai

3°C. Jika suhu di permukaan bumi adalah 27°C maka untuk kedalaman 100 meter suhu diperkirakan sekitar 29,5°C. Untuk kedalaman 1 km suhu batuan dapat mencapai 52-60°C. Pertambahan panas tersebut dinamakan sebagai gradien geotermal. Gradien geotermal mempunyai variasi yang lebih besar pada lokasi tertentu terutama di sekitar daerah gunung merapi. Variasinya dapat mencapai 1 -25°C untuk pertambahan kedalaman 100m

Di dalam kulit bumi ada kalanya aliran air dekat sekali dengan batuan panas dengan suhu bisa mencapai 148°C. Air tersebut tidak menjadi uap (*steam*) karena tidak ada kontak dengan udara. Bila air panas tadi bisa keluar ke permukaan bumi melalui celah atau terjadi rekahan di kulit bumi, maka muncul air panas yang biasa disebut dengan *hot spring*. Air panas alam ini biasa dimanfaatkan sebagai kolam air panas, dan banyak pula yang sekaligus menjadi tempat wisata. Karena diperlukan kondisi tertentu agar supaya magma dapat berada di dekat permukaan bumi sehingga memungkinkan untuk memanaskan batuan dan air tanah di dalam reservoir, maka di permukaan bumi hanya sedikit tempat yang mempunyai potensi panas bumi. Terutama yang berada di area *Pacific Rim* atau dikenal juga sebagai *ring of fire* yaitu gugusan gunung berapi di kepulauan maupun pinggir benua yang membentang.



**Gambar 7.2** Salah satu daerah dengan sumber panas bumi di Sumatra

Energi panas bumi telah sejak lama dipergunakan untuk memanaskan air maupun ruangan ketika musim dingin. Saat ini pemanfaatan energi panas bumi lebih umum untuk menghasilkan energi listrik. Diperkirakan pada 2007 sekitar 10 Giga Watt pembangkit listrik tenaga panas Bumi telah dipasang di seluruh dunia dan berkontribusi sekitar 0.3% total energi listrik dunia.

Pada jaman dahulu panas bumi hanya digunakan untuk mandi, mencuci dan memasak. Dewasa ini pemanfaatan fluida panas bumi sangat beraneka ragam, baik untuk pembangkit listrik maupun untuk keperluan-keperluan lainnya di sektor non-listrik, seperti:

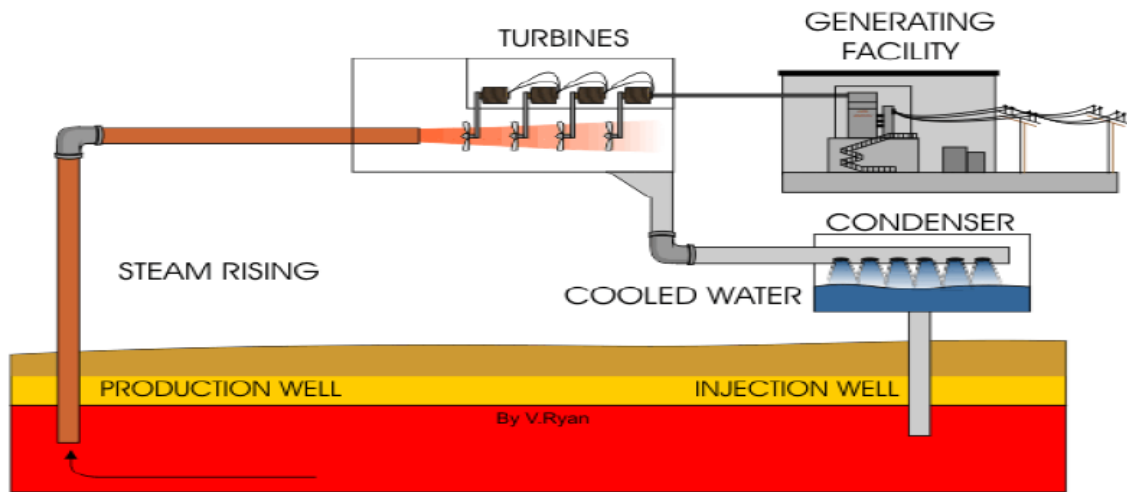
- Pemanas/pendingin ruangan,
- Green house/rumah kaca,
- Prose mengeringkan hasil pertanian dan peternakan,
- mengeringkan kayu
- dan lain-lain.

## 7.2 PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA PANAS BUMI

Panas yang ada pada air dan uap yang keluar ke permukaan bumi dapat dimanfaatkan secara langsung sebagai pemanas. Selain bermanfaat sebagai pemanas, panas bumi dapat dimanfaatkan sebagai tenaga pembangkit listrik. Air panas alami bila bercampur dengan udara akan menimbulkan uap panas (*steam*) yang selanjutnya dimanfaatkan sebagai sumber pembangkit tenaga listrik selalui sistem generator pembangkit listrik. Berdasarkan suhu sumber panas bumi biasanya dikategorikan menjadi dua jenis yaitu sumber panas bumi bersuhu rendah (*low temperature*) ( $<150^{\circ}\text{C}$ ) dan yang bersuhu tinggi (*high temperature*) ( $>150^{\circ}\text{C}$ ). Untuk pembangkit listrik sumber panas bumi bersuhu tinggi mempunyai potensi yang lebih baik. Namun dengan perkembangan teknologi, sumber panas bumi dengan kategori suhu rendah dengan suhu  $>50^{\circ}\text{C}$  juga dapat digunakan.

Sebagaimana sistem pembangkit listrik pada umumnya, sistem pembangkit listrik tenaga panas bumi (PLTP) menggunakan uap untuk memutar turbin yang kemudian mengaktifkan generator untuk menghasilkan listrik. Pembangkit yang digunakan untuk merubah panas bumi menjadi tenaga listrik secara umum mempunyai komponen yang sama dengan power plant lain yang bukan berbasis panas bumi, yaitu terdiri dari generator, turbin sebagai penggerak generator, *heat exchanger*, *chiller*, pompa, dan sebagainya. Teknologi pembangkit listrik tenaga panas bumi digolongkan menjadi tiga jenis masing-masing:

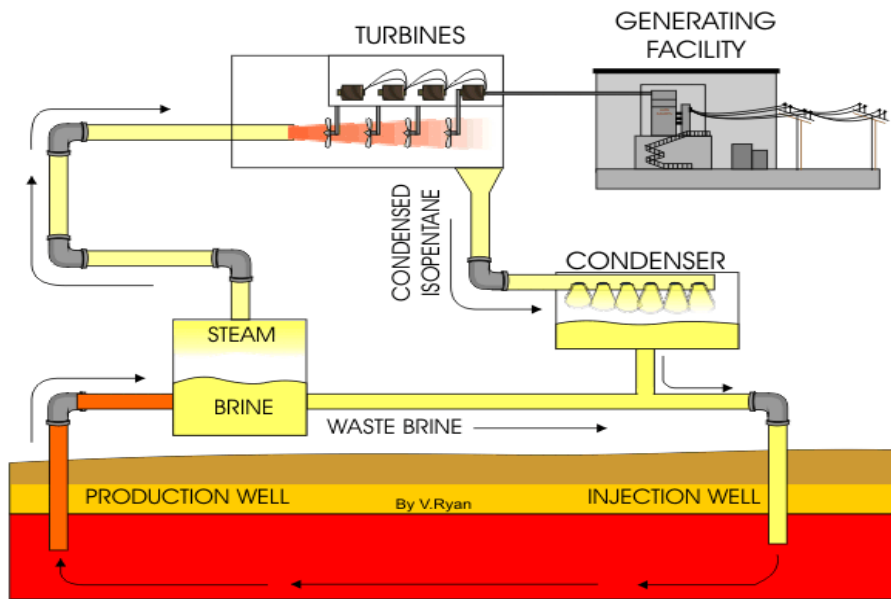
1. *dry steam*,
2. *flash steam*,
3. *binary cycle*.



**Gambar 7.3** Diagram Pembangkit listrik tenaga panas bumi *dry steam*

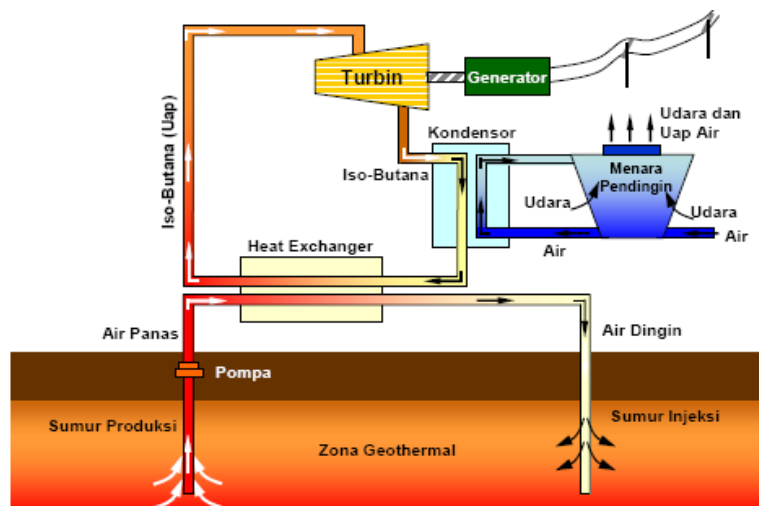
Pada sistem *dry steam* sumber uap panas diambil dari dari bawah permukaan. Sistem ini dipakai jika fluida yang dikeluarkan melalui sumur produksi berupa fasa uap. Uap tersebut yang langsung dimanfaatkan untuk memutar turbin dan kemudian turbin akan mengubah energi panas bumi menjadi energi gerak yang akan memutar generator untuk menghasilkan energi listrik. Gambar 7.3 menunjukkan diagram sebuah PLTP dry sistem.

Pembangkit listrik tenaga panas bumi jenis *Flash Sistem* memanfaatkan sumber panas bumi yang berisi air dengan temperatur lebih besar dari 182°C. PLTP sistem ini merupakan PLTP yang paling umum digunakan. Air yang sangat panas ini dialirkan ke atas melalui pipa sumur produksi dengan tekanannya sendiri. Karena mengalir keatas, tekanannya menurun dan beberapa bagian dari air menjadi uap. Uap ini kemudian dipisahkan dari air dan dialirkan untuk memutar turbin. Sisa air dan uap yang terkondensasi kemudian disuntikkan kembali melalui sumur injeksi kedalam reservoir, yang memungkinkan sumber energi ini berkesinambungan dan terbaru . Gambar 7.4 menunjukkan diagram sebuah PLTP *flash sistem*.



**Gambar 7.4** Diagram Pembangkit listrik tenaga panas bumi *flash sistem*

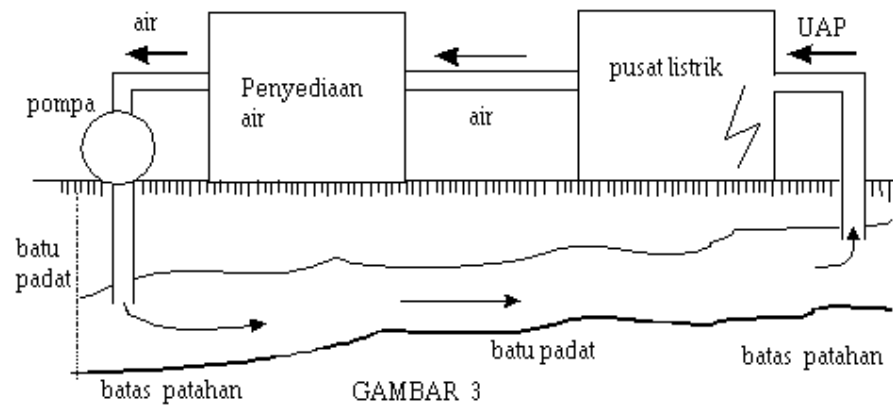
Pada sumber panas bumi yang lebih rendah ( $107^{\circ}$ - $182^{\circ}\text{C}$ ) pada umumnya PLTP menggunakan teknologi *Binary Cycle*. Sistem kerjanya adalah dengan menggunakan panas dari air panas untuk mendidihkan fluida kerja yang biasanya senyawa organik yang mempunyai titik didih rendah seperti iso-butana. Fluida kerja ini diuapkan dengan heat exchanger yang kemudian uap tersebut digunakan untuk memutar turbin. Air kemudian disuntikkan kembali kedalam reservoir melalui sumur injeksi untuk dipanaskan kembali (lihat Gambar 7.5).



**Gambar 7.5** Diagram Pembangkit listrik tenaga panas bumi *binary cycle*

### 7.3 ENERGI PANAS BUMI "BATUAN PANAS"

Pada beberapa lokasi batuan panas yang ada dalam perut bumi berkontak dengan sumber panas bumi (magma) sehingga dapat dijadikan sebagai sumber panas. Dalam hal ini energi panas harus diambil dengan cara menyuntikkan air ke dalam batuan panas dan dibiarkan menjadi uap panas, dan selanjutnya uap panas menggerakkan turbin.



Gambar 7.6. Skema pembangkitan tenaga listrik energi panas bumi "batuan panas"

Pada umumnya batuan panas pada terletak jauh di dalam perut bumi, sehingga untuk memanfaatkannya perlu teknik pengeboran khusus yang memerlukan biaya cukup tinggi. Gambar 7.6 memperlihatkan skema pembangkitan tenaga listrik energi panas bumi "batuan panas".

Pengembangan PLTP cukup menjanjikan. Apalagi kalau diingat bahwa pemanfaatan energi panas bumi sebagai sumber penyedia tenaga listrik adalah termasuk teknologi yang tidak menimbulkan pencemaran terhadap lingkungan, suatu hal yang dewasa ini sangat diperhatikan dalam setiap pembangunan dan pemanfaatan teknologi, agar alam masih dapat memberikan daya dukungnya bagi kehidupan umat manusia. Bila pemanfaatan energi panas bumi dapat berkembang dengan baik, maka kota-kota di sekitar daerah sumber energi panas bumi yang pada umumnya terletak di daerah pegunungan, kebutuhan tenaga listriknya dapat dipenuhi dari pusat listrik tenaga panas bumi. Apabila masih terdapat sisa daya tenaga listrik dari pemanfaatan energi panas bumi, dapat disalurkan ke daerah lain sehingga ikut mengurangi beban yang harus dibangkitkan oleh pusat listrik tenaga uap, baik yang dibangkitkan oleh batubara maupun oleh tenaga diesel yang keduanya menimbulkan pencemaran udara.

#### 7.4. ENERGI PANAS BUMI DI INDONESIA

Di Indonesia terdapat ratusan potensi panas bumi, yaitu di sepanjang jalur vulkanik mulai dari bagian Barat Sumatera, terus ke Pulau Jawa, Bali, Nusatenggara dan kemudian membelok ke arah utara melalui Maluku dan Sulawesi. Menurut penelitian sistem panas bumi di Indonesia umumnya merupakan sistem hidrothermal yang mempunyai temperatur tinggi ( $>225^{\circ}\text{C}$ ), hanya beberapa diantaranya yang mempunyai temperatur sedang ( $150\text{-}225^{\circ}\text{C}$ ).

Menurut laporan para peneliti terjadinya sumber energi panas bumi di Indonesia serta karakteristiknya adalah sebagai berikut. Ada tiga lempengan yang berinteraksi di Indonesia, yaitu lempeng Pasifik, lempeng India-Australia dan lempeng Eurasia. Tumbukan yang terjadi antara ketiga lempeng tektonik tersebut telah memberikan peranan yang sangat penting bagi terbentuknya sumber energi panas bumi di Indonesia. Tumbukan antara lempeng India, Australia di sebelah selatan dan lempeng Eurasia di sebelah utara mengasilkan zona penunjaman (subduksi) di kedalaman 160 - 210 km di bawah Pulau Jawa- Nusatenggara dan di kedalaman sekitar 100 km di bawah Pulau Sumatera. Hal ini menyebabkan proses magmatisasi di bawah Pulau Sumatera lebih dangkal dibandingkan dengan di bawah Pulau Jawa atau Nusatenggara. Karena perbedaan kedalaman jenis magma yang dihasilkannya berbeda.

Pada kedalaman yang lebih besar jenis magma yang dihasilkan akan lebih bersifat basa dan lebih cair dengan kandungan gas magmatik yang lebih tinggi sehingga menghasilkan erupsi gunung api yang lebih kuat yang pada akhirnya akan menghasilkan endapan vulkanik yang lebih tebal dan terhampar luas. Oleh karena itu, reservoir panas bumi di Pulau Jawa umumnya lebih dalam dan menempati batuan vulkanik, sedangkan reservoir panas bumi di Sumatera terdapat di dalam batuan sedimen dan ditemukan pada kedalaman yang lebih dangkal. Sistem panas bumi di Pulau Sumatera umumnya berkaitan dengan kegiatan gunung api andesitisriolitis yang disebabkan oleh sumber magma yang bersifat lebih asam dan lebih kental, sedangkan di Pulau Jawa, Nusatenggara dan Sulawesi umumnya berasosiasi dengan kegiatan vulkanik bersifat andesitis-basaltis dengan sumber magma yang lebih cair. Karakteristik geologi untuk daerah panas bumi di ujung utara Pulau Sulawesi memperlihatkan kesamaan karakteristik dengan di Pulau Jawa. Akibat dari sistem penunjaman yang berbeda, tekanan atau kompresi yang dihasilkan oleh tumbukan miring (oblique) antara lempeng India-Australia dan lempeng Eurasia menghasilkan sesar regional yang memanjang sepanjang Pulau Sumatera yang merupakan sarana bagi kemunculan sumber-sumber panas bumi yang berkaitan dengan gunung-gunung api muda.

Lebih lanjut dapat disimpulkan bahwa sistim panas bumi di Pulau Sumatera umumnya lebih dikontrol oleh sistim patahan regional yang terkait dengan sistim sesar Sumatera, sedangkan di Jawa sampai Sulawesi, sistim panas buminya lebih dikontrol oleh sistim pensesaran yang bersifat lokal dan oleh sistim depresi kaldera yang terbentuk karena pemindahan masa batuan bawah permukaan pada saat letusan gunung api yang intensif dan ekstensif. Reservoir panas bumi di Sumatera umumnya menempati batuan sedimen yang telah mengalami beberapa kali deformasi tektonik atau pensesaran setidak-tidaknya sejak Tersier sampai Resen. Hal ini menyebabkan terbentuknya porositas atau permeabilitas sekunder pada batuan sedimen yang dominan yang pada akhirnya menghasilkan permeabilitas reservoir panas bumi yang besar, lebih besar dibandingkan dengan permeabilitas reservoir pada lapangan-lapangan panas bumi di Pulau Jawa ataupun di Sulawesi.

# BAB 8

## ENERGI LAUT

Energi laut (*ocean energy*) merupakan energi kinetik air laut yang dapat dikonversikan menjadi energi bentuk lain, terutama energi listrik melalui turbin dan generator. Secara garis besar energi yang berasal dari laut dapat dikategorikan menjadi tiga jenis, masing-masing:

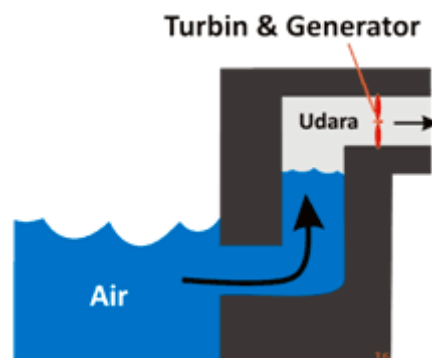
1. energi ombak (*wave energy*),
2. energi pasang surut (*tidal energy*),
3. hasil konversi energi panas laut (*ocean thermal energy conversion*).

### 8.1 ENERGI OMBAK

Ombak terjadi oleh angin yang bertiup di permukaan laut. Ombak mempunyai sumber energi yang cukup besar namun diperlukan teknologi untuk mengubahnya menjadi listrik.

Ada berbagai metode yang telah digunakan untuk menangkap energi ombak antara lain:

- **Kolom osilasi air (*Oscillating Water Column*)**; Pada sistem ini aliran masuk dan keluarnya ombak kedalam ruangan khusus menyebabkan terdorongnya udara keluar dan masuk melalui sebuah saluran di atas ruang tersebut.



**Gambar 8.1.** Diagram *Oscillating Water Column*

Jika di ujung saluran diletakkan sebuah turbin, maka aliran udara yang keluar masuk tersebut akan memutar turbin yang menggerakkan generator.

- **Pelamis**; Pelamis merupakan nama sebuah perusahaan yang mendesain teknologi pembangkit listrik yang diberi nama pelamis ( sebelumnya *Ocean Power Delivery*). Perusahaan ini mendesain tabung-tabung yang sekilas terlihat seperti ular mengambang di permukaan laut sebagai penghasil listrik. Setiap tabung memiliki panjang 100 meter lebih dan terbagi menjadi empat segmen. Setiap ombak yang melalui alat ini akan menyebabkan tabung silinder tersebut bergerak secara vertikal maupun lateral. Gerakan yang ditimbulkan akan mendorong piston diantara tiap sambungan segmen yang selanjutnya memompa cairan hidraulik bertekanan melalui sebuah motor untuk menggerakkan generator listrik. Supaya tidak ikut terbawa arus, setiap tabung ditahan di dasar laut menggunakan jangkar khusus.



**Gambar 8.2.** Pelamis-salah satu jenis alat pembangkit listrik tenaga ombak.

(sumber: <http://www.pelamiswave.com>)

- **Renewable Energy Holdings**; Produk pembangkit tenaga gelombang dari perusahaan *Renewable Energy Holdings* menghasilkan listrik dari tenaga ombak menggunakan peralatan yang dipasang di dasar laut dekat tepi pantai sedikit mirip dengan Pelamis. Prinsipnya menggunakan gerakan naik turun dari ombak untuk menggerakkan piston yang bergerak naik turun pula di dalam sebuah silinder.



**Gambar 8.2** Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang *Renewable Energy Holdings*

---

Gerakan dari piston tersebut selanjutnya digunakan untuk mendorong air laut guna memutar turbin.

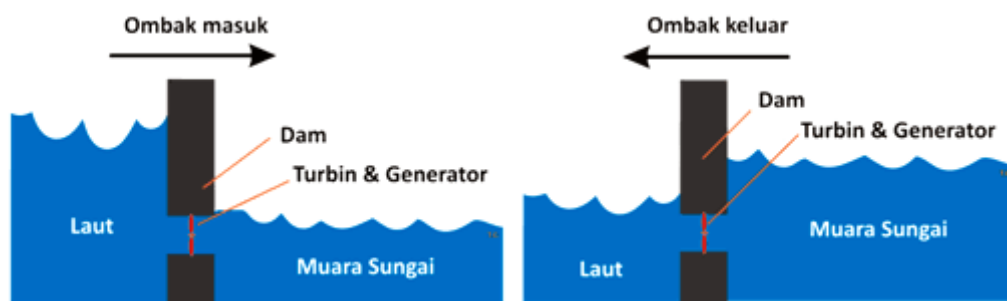
- **SRI International;** Perusahaan ini mengembangkan pembangkit dengan memanfaatkan bahan sejenis plastik khusus bernama elastomer dielektrik yang bereaksi terhadap listrik. Ketika listrik dialirkan melalui elastomer tersebut, elastomer akan meregang dan terkompresi bergantian. Sebaliknya jika elastomer tersebut dikompresi atau diregangkan, maka energi listrik pun timbul. Berdasarkan konsep tersebut idenya ialah menghubungkan sebuah pelampung dengan elastomer yang terikat di dasar laut. Ketika pelampung diombang-ambing oleh ombak, maka regangan maupun tahanan yang dialami elastomer akan menghasilkan listrik.
- **BioPower Systems;** Konsep pengembangan pembangkit listrik oleh perusahaan adalah mengembangkan sirip-ekor-ikan-hiu buatan dan rumput laut mekanik untuk menangkap energi dari ombak. Ketika arus ombak menggoyang sirip ekor mekanik dari samping ke samping, sebuah kotak gir akan mengubah gerakan osilasi tersebut menjadi gerakan searah yang menggerakkan sebuah generator magnetik. Rumput laut mekaniknya pun bekerja dengan cara yang sama, yaitu dengan menangkap arus ombak di permukaan laut dan menggunakan generator yang serupa untuk merubah pergerakan laut menjadi listrik.

## 8.2 ENERGI PASANG SURUT

Pasang surut menggerakkan air dalam jumlah besar setiap harinya; dan pemanfaatannya dapat menghasilkan energi dalam jumlah yang cukup besar. Dalam sehari bisa terjadi hingga dua kali siklus pasang surut. Oleh karena waktu siklus bisa diperkirakan (kurang lebih setiap 12,5 jam sekali), suplai listriknya pun relatif lebih dapat diandalkan daripada pembangkit listrik berteaga ombak. Pada dasarnya ada dua metodologi untuk memanfaatkan energi pasang surut:

### Dam pasang surut (tidal barrages)

Metode dam pasang surut (tidal barrages) mirip dengan pembangkit listrik tenaga air biasa yang terdapat di dam/waduk penampungan air sungai. Perbedaannya terletak pada bendungan/dam yang dibangun yang memanfaatkan siklus pasang surut. Dam ini biasanya dibangun di muara sungai dimana terjadi pertemuan antara air sungai dengan air laut. Ketika ombak masuk atau keluar (terjadi pasang atau surut), air mengalir melalui terowongan yang terdapat di dam. Aliran masuk atau keluarnya ombak dapat dimanfaatkan untuk memutar turbin (Gambar 8.3)



**Gambar 8.3.** Gerakan air dalam muara sungai ketika terjadi pasang: pasang naik (kiri); pasang surut (kanan)



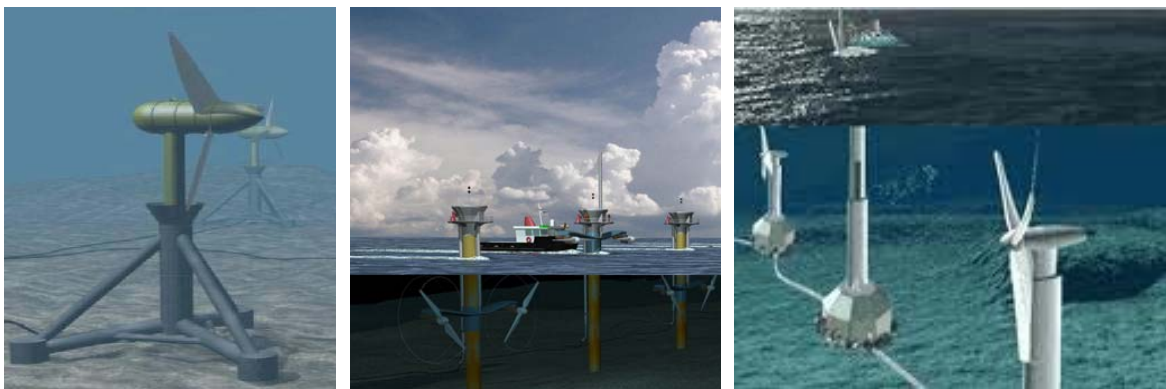
**Gambar 5.** Pembangkit listrik tenaga pasang surut La Rance, Brittany, Perancis.  
(sumber: <http://www.theecologist.org>)

Pembangkit listrik tenaga pasang surut (PLTPs) terbesar di dunia terdapat di muara sungai Rance di sebelah utara Perancis. Pembangkit listrik ini dibangun pada tahun 1966 dan berkapasitas 240 MW. PLTPs La Rance didesain dengan teknologi canggih dan beroperasi secara otomatis, sehingga hanya membutuhkan dua orang saja untuk pengoperasian pada akhir pekan dan malam hari. PLTPs terbesar kedua di dunia terletak di Annapolis, Nova Scotia, Kanada dengan kapasitas “hanya” 16 MW.

Kekurangan terbesar dari pembangkit listrik tenaga pasang surut adalah mereka hanya dapat menghasilkan listrik selama ombak mengalir masuk (pasang) ataupun mengalir keluar (surut), yang terjadi hanya selama kurang lebih 10 jam per harinya. Namun, karena waktu operasinya dapat diperkirakan, maka ketika PLTPs tidak aktif, dapat digunakan pembangkit listrik lainnya untuk sementara waktu hingga terjadi pasang surut lagi.

### **Turbin Lepas Pantai (Offshore Turbines)**

Turbin lepas pantai bekerja seperti pembangkit listrik tenaga angin versi bawah laut dengan air laut sebagai fluida penggerak turbin. Keunggulannya dibandingkan metode pertama yaitu: lebih murah biaya instalasinya, dampak lingkungan yang relatif lebih kecil daripada pembangunan dam, dan persyaratan lokasinya pun lebih mudah sehingga dapat dipasang di lebih banyak tempat. Beberapa bentuk turbin lepas pantai untuk pembangkit listrik tenaga pasang surut ditunjukkan pada gambar.

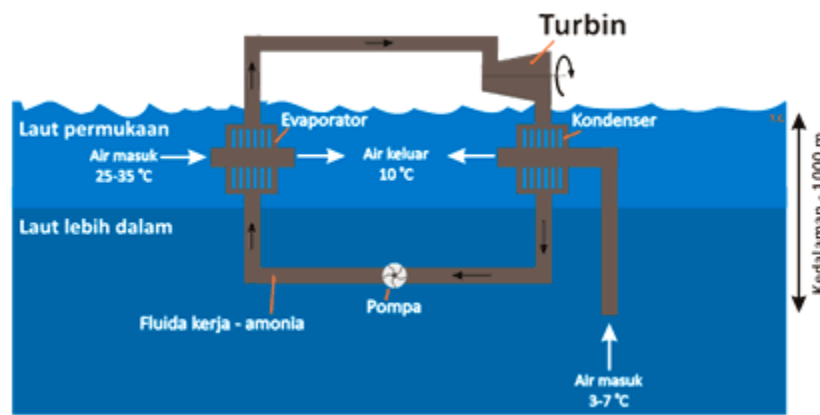


**Gambar 8.6.** Berbagai jenis turbin lepas pantai yang digerakkan oleh arus pasang surut. (dari berbagai sumber)

### 8.3 ENERGI PANAS LAUT

Secara alami terdapat perbedaan temperatur antara air di kedalaman dengan permukaan laut. Temperatur di permukaan laut pada umumnya lebih tinggi karena panas dari sinar matahari diserap sebagian oleh permukaan laut. Perbedaan ini dapat dimanfaatkan sebagai sumber pembangkit energi listrik yang disebut dengan konversi energi panas laut (*Ocean Thermal Energy Conversion* atau OTEC).

Perbedaan temperatur antara permukaan yang hangat dengan air laut dalam yang dingin dibutuhkan minimal  $25^{\circ}\text{C}$  agar dapat dimanfaatkan untuk membangkitkan listrik. Teknologi OTEC biasanya memanfaatkan fluida kerja yang mudah menguap seperti misalnya amonia. Gambar 8.7 menunjukkan diagram sebuah sistem pembangkit listrik tenaga panas laut dengan fluida kerja amonia siklus tertutup.



**Gambar 8.7.** Pembangkit listrik tenaga panas laut dengan siklus tertutup