

## BAB II

### KAJIAN PUSTAKA

#### A. Penelitian Sebelumnya

1. Marizka Lustia Dewi<sup>1</sup>, dalam penelitiannya yang berjudul *Analisis Kinerja Kincir Angin Poros Vertikal dengan Modifikasi Rotor Savonius L Untuk Optimasi Kinerja Kincir*. Dalam penelitian ini disimpulkan bahwa hasil pengujian dan analisis perhitungan menunjukkan bahwa semakin besar sudut kelengkungan, jari-jari kincir semakin besar hal ini menyebabkan gaya hambat yang dialami kincir pun semakin besar sehingga kecepatan kincir berkurang.
2. Bayu Mahendra<sup>2</sup>, dalam penelitiannya yang berjudul *Pengaruh Jumlah Sudu Terhadap Unjuk Kerja Kincir Angin Savonius Tipe L*. Dalam penelitian ini disimpulkan bahwa hasil pengujian dan analisis perhitungan menunjukkan bahwa kincir angin dengan jumlah sudu 3 mempunyai unjuk kerja yang tinggi dibandingkan dengan jumlah sudu yang lainnya.
3. Andri Kusbiantoro<sup>3</sup>, dalam penelitiannya yang berjudul *Pengaruh Panjang Lengkung Sudu Terhadap Unjuk Kerja Kincir Angin Poros Vertikal Savonius*. Dari penelitian yang telah dilakukan disimpulkan bahwa jarak celah sudu berpengaruh terhadap *performa* kincir angin poros vertikal Savonius dimana *performa* terbesar pada setiap kecepatan angin dimiliki

---

<sup>1</sup> Marizka Lustia Dewi, “*Analisis Kinerja Kincir Angin Poros Vertikal Dengan Modifikasi Rotor Savonius L Untuk Optimasi Kinerja Kincir*”, Surakarta: Universitas Sebelas Maret, 2010

<sup>2</sup> Bayu Mahendra, “*Pengaruh Jumlah Sudu Terhadap Unjuk Kerja Kincir Angin Savonius Tipe L*”, Malang: Universitas Brawijaya, t.d

<sup>3</sup> Andri Kusbiantoro, “*Pengaruh Panjang Lengkung Sudu Terhadap Unjuk Kerja Kincir Angin Poros Vertikal Savonius*”, Malang: Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, t.d

oleh kincir angin dengan panjang lengkung sudu  $6/12$  lingkaran, kecuali pada kecepatan angin  $3 \text{ m/s}$  daya poros dan efisiensi terbesar dimiliki oleh kincir angin  $5/12$  lingkaran.

4. Syamsul Bahri dan Suheri<sup>4</sup>, dalam penelitiannya yang berjudul *Pengujian Unjuk Kerja Kincir Angin Type Savonius Dua Tingkat Delapan Sudu Lengkung U*, mereka menyimpulkan bahwa berdasarkan hasil analisa maka kincir angin 2 (dua) tingkat yang memiliki 4 (empat) sudu lengkung U, lebih efektif dibandingkan dengan kincir angin 1 (satu) tingkat yang memiliki 2 (dua) sudu lengkung U. Salah satu yang menyebabkan hal ini terjadi karena pengaruh perbedaan luas penampang yang merupakan faktor utama pada kincir angin, karena besarnya luas penampang berpengaruh terhadap sapuan angin atau yang menyebabkan gaya dorong pada kincir angin.

## **B. Definisi Angin**

Angin adalah udara yang bergerak. Gaya penggerak angin adalah gaya yang menyebabkan udara yang bergerak. Udara bergerak karena adanya gaya yang diakibatkan oleh perbedaan tekanan dan perbedaan suhu. Gaya apung adalah gaya gerak udara ke atas akibat perbedaan suhu. Lapisan batas adalah lapisan udara antara permukaan Bumi dan ketinggian tertentu ketika kecepatan angin tidak lagi terpengaruh oleh kondisi permukaan Bumi. Atmosfir adalah lapisan udara yang menyelimuti Bumi.<sup>5</sup>

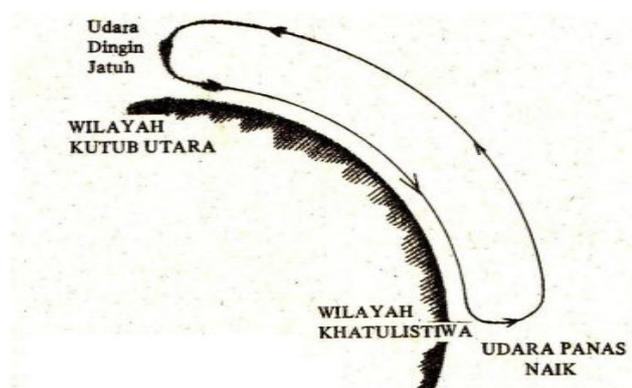
---

<sup>4</sup> Syamsul Bahri Dan Suheri, *Pengujian Unjuk Kerja Kincir Angin Type Savonius Dua Tingkat Delapan Sudu Lengkung U*, Universitas Samudra Langsa. td

<sup>5</sup> Prasasto Satwiko, *Fisika Bangunan*, Yogyakarta: ANDI Yogyakarta, 2009, h. 5

Radiasi Matahari memanaskan di berbagai tempat di Bumi dengan kecepatan yang berbeda pada siang dan malam hari. Hal ini menyebabkan berbagai bagian atmosfer memanaskan dalam waktu yang berbeda. Udara panas menaik, dan udara yang lebih sejuk tertarik untuk menggantikannya. Inilah yang menyebabkan terjadinya angin.<sup>6</sup>

Angin terjadi karena adanya perbedaan suhu antara udara panas dan udara dingin yang menyebabkan terjadinya suatu perputaran udara berupa perpindahan udara. Di daerah khatulistiwa, udaranya menjadi panas mengembang dan menjadi ringan, naik ke atas dan bergerak ke daerah yang lebih dingin. Sebaliknya daerah kutub yang dingin, udaranya menjadi dingin dan turun ke bawah. Sehingga terjadilah suatu perputaran udara berupa perpindahan udara dari kutub utara ke garis khatulistiwa menyusuri permukaan Bumi dan sebaliknya suatu perpindahan udara dari garis katulistiwa kembali ke kutub utara, melalui lapisan udara yang lebih tinggi.<sup>7</sup>



Gambar 2.1 Skema Terjadinya Angin

Hukum Buys Ballot menyatakan:

<sup>6</sup> Tim Contained Energi Indonesia, *ENERGI yang Terbarukan*, PNPM-Mandiri. h. 38 t.d

<sup>7</sup> Ryski, "Kajian Kelayakan Potensi Energi Angin Pada Kawasan Universitas Tanjungpura Pontianak Untuk Dimanfaatkan Menjadi Energi Listrik," Universitas Tanjungpura, h. 2 t.d

- a. Udara bergerak dari daerah bertekanan tinggi ke daerah bertekanan rendah.
- b. Pada belahan Bumi selatan angin membelok ke kiri dan pada belahan Bumi utara angin membelok ke kanan.<sup>8</sup>

#### 1. Proses Terjadinya Angin

Apabila dipanaskan, udara memuai. Udara yang telah memuai menjadi lebih ringan sehingga naik. Apabila hal ini terjadi, tekanan udara turun karena udaranya berkurang. Udara dingin di sekitarnya mengalir ke tempat yang bertekanan rendah tadi. Udara menyusut menjadi lebih berat dan turun ke tanah. Di atas tanah udara menjadi panas lagi dan naik kembali. Angin dapat bergerak secara horizontal maupun vertikal dengan kecepatan yang dinamis dan fluktuatif.<sup>9</sup>

#### 2. Mekanisme Perpindahan Panas

Perpindahan kalor hanya terjadi di antara daerah yang berbeda suhunya dan aliran kalor selalu terjadi dari suhu lebih tinggi ke lebih rendah.<sup>10</sup> Benda yang menerima kalor, suhunya akan naik atau wujudnya berubah. Benda yang melepas kalor, suhunya akan turun atau wujudnya akan berubah. Besarnya kalor yang diserap atau dilepas oleh suatu benda berbanding lurus dengan:

- a. Massa benda

---

<sup>8</sup> Istiyanto, *Sains Fisika untuk kelas X*, Klaten: Intan Pariwara, 2004, h. 143

<sup>9</sup> [www.pengertian-dan-macam-macam-angin](http://www.pengertian-dan-macam-macam-angin). (online 29 April 2015)

<sup>10</sup> Hugh D. Young dan Roger A. Freedman. *Fisika Universitas Edisi 10 Jilid I*. Jakarta: Erlangga. 2002. h. 475

b. Kalor jenis benda

c. Perubahan suhu.

Besarnya kalor tersebut dirumuskan sebagai:

$$Q = m c \Delta T \quad (2.1)$$

Dengan :  $m$  = massa benda (kg)

$\Delta T$  =  $T_2 - T_1$  = kenaikan suhu ( $^{\circ}\text{C}$ , K)

$c$  = kalor jenis benda ( kal/g  $^{\circ}\text{C}$ , J/kg K)

dalam sistem SI, satuan kalor adalah *joule* (J).

1 kalori = 4,184 Joule

1 Joule = 0,24 kalori

*Satu kalori* adalah banyaknya kalor yang diperlukan untuk menaikkan suhu  $1^{\circ}\text{C}$  air murni yang massanya 1 gram.<sup>11</sup>

Tiga mekanisme perpindahan kalor adalah *konduksi*, *konveksi* dan *radiasi*. Konduksi terjadi pada suatu benda atau dua benda yang disentuhkan. Konveksi tergantung dari massa dari suatu daerah ruang ke arah lainnya. Radiasi adalah perpindahan panas melalui radiasi elektromagnetik, seperti sinar matahari, tanpa memerlukan media atau pun pada ruang di antaranya.

a. Konduksi adalah perpindahan kalor yang tidak disertai dengan perpindahan zat penghantar. Misalnya, pada batang logam yang dipanaskan salah satu ujungnya, maka ujung batang akan ikut panas.

Laju perpindahan kalor secara konduksi bergantung pada panjang  $L$ ,

---

<sup>11</sup> Ahmad Zaelani, dkk, *1700 Bank Soal Fisika SMA/MA*, Bandung: Yrama Widya, 2007 h.220

luas penampang  $A$ , konduktivitas termal  $k$  atau jenis bahan, dan beda suhu  $\Delta T$ . Oleh karena itu banyaknya kalor yang dapat dipindah selama waktu tertentu ditulis dengan persamaan berikut:

$$H = \frac{Q}{t} = kA \frac{\Delta T}{L} \text{ atau } Q = kAt \frac{\Delta T}{L} \quad (2.2)$$

Makin besar nilai  $k$  suatu bahan, makin mudah zat itu menghantar kalor. Bahan konduktor memiliki nilai  $k$  besar, sedangkan bahan isolator memiliki nilai  $k$  kecil.

- b. Konveksi adalah perpindahan kalor oleh gerakan massa pada fluida dari suatu daerah ruang ke daerah lainnya. yang disertai dengan perpindahan partikel-partikel zat. Terdapat dua jenis konveksi, yaitu konveksi alami dan konveksi paksa. Pada konveksi paksa, aliran panas dipaksa dialirkan ketempat yang dituju dengan bantuan alat tertentu, misalnya dengan kipas angin atau *blower*. Konveksi alami pergerakan atau aliran energi kalor terjadi akibat perbedaan massa jenis, misalnya pada ventilasi rumah, terjadinya angin darat dan angin laut, dan aliran asap pada cerobong asap pabrik. Konveksi paksa terjadi misalnya, pada sistem pendingin sistem mobil, alat pengering rambut, dan pada reaktor pembangkit tenaga nuklir. Laju perpindahan kalor pada konveksi bergantung pada luas permukaan benda  $A$  yang bersentuhan, koefisien konveksi  $h$ , waktu  $t$ , dan beda suhu  $\Delta T$  antara benda dengan fluida. Banyaknya kalor yang dihantarkan secara konveksi dapat dihitung dengan persamaan berikut :

$$H = \frac{Q}{t} = hA\Delta T \text{ atau } Q = hAt\Delta T \quad (2.3)$$

Nilai  $h$  bergantung pada bentuk dan kedudukan permukaan yang bersentuhan dengan fluida.

Perpindahan kalor konveksi adalah proses yang sangat kompleks, dan tidak ada persamaan sederhana untuk mendeskripsikannya. Berikut ini adalah sedikit fakta hasil percobaan.

- 1) Arus panas karena konveksi berbanding lurus dengan luas permukaan. Ini adalah alasan mengapa luas permukaan radiator dan kipas pendingin harus besar.
- 2) Kekentalan fluida memungkinkan konveksi alami berjalan lambat.
- 3) Arus panas akibat konveksi dapat dianggap sebanding dengan  $\frac{1}{4}$  daya dari perbedaan suhu antara permukaan dan bagian utama fluida.<sup>12</sup>

c. Radiasi

Radiasi adalah perpindahan energi kalor dalam bentuk gelombang elektromagnetik. Energi Matahari yang sampai ke Bumi terjadi secara radiasi atau pancaran tanpa melalui zat perantara. Laju pancaran kalor secara matematis ditulis dengan persamaan:

$$H = \frac{Q}{t} = \sigma A\Delta T^4 \quad (2.4)$$

---

<sup>12</sup> Hugh D. Young dan Roger A. Freedman. *Fisika Universitas jilid I*..... h. 478

Dengan  $\sigma$  adalah konstanta Stefan – Boltzman dengan nilai  $5,67 \times 10^{-8}$   $W/m^2K^4$  . persamaan tersebut berlaku untuk benda dengan permukaan hitam sempurna.<sup>13</sup>

### 3. Faktor-faktor Terjadi Angin

Faktor-faktor yang menyebabkan terjadi angin antara lain adalah:

- a. Gradien Barometris, yaitu bilangan yang menunjukkan perbedaan tekanan udara dari dua isobar yang jaraknya 111 km. Makin besar gradien barometrisnya, makin cepat tiupan anginnya.
- b. Lokasi, kecepatan angin di dekat khatulistiwa lebih cepat daripada angin yang jauh dari garis khatulistiwa.
- c. Tinggi Lokasi, semakin tinggi lokasinya semakin kencang pula angin yang bertiup. Hal ini disebabkan oleh pengaruh gaya gesekan yang menghambat laju udara. Di permukaan Bumi, gunung, pohon, dan topografi yang tidak rata lainnya memberikan gaya gesekan yang besar. Semakin tinggi suatu tempa, gaya gesekan ini semakin kecil.
- d. Waktu, Angin bergerak lebih cepat pada siang hari, dan sebaliknya angin bergerak lambat pada malam hari.

### 4. Sifat-sifat Angin

Beberapa sifat angin antara lain:

- a. Angin menyebabkan tekanan terhadap permukaan yang menentang arah angin tersebut.
- b. Angin mempercepat pendinginan dari benda yang panas.

---

<sup>13</sup> Supriyanto, *FISIKA UNTUK SMA*, h.164

- c. Kecepatan angin sangat beragam dari tempat ke tempat lain, dan dari waktu ke waktu.<sup>14</sup>

## 5. Kecepatan Angin

Kecepatan angin ditentukan oleh perbedaan tekanan udara antara tempat asal dan tujuan angin dan resistensi medan yang dilaluinya.<sup>15</sup>

Kecepatan angin dinyatakan dalam satuan meter per sekon, kilometer per jam, atau knot (1 knot 0,5 m/s).<sup>16</sup> Sebelum adanya alat pengukur, angin ditaksir dengan skala kekuatan angin yang dikemukakan oleh armada Beaufort dan disebut skala Beaufort. Ada 13 skala dari skala Beaufort 0 (nol) artinya angin tenang (*calm*) sampai skala 12 artinya angin siklon.<sup>17</sup>

Tabel 2.1 Skala Beaufort Moderen

Nomor Beaufort	Kekuatan	Kecepatan
0	Tenang	< 1 Km
1	Sedikit tenang	1 Km/h – 5 Km/h
2	Sedikit hembusan angin	6 Km/h – 11 Km/h
3	Hembusan angin pelan	12 Km/h – 19 Km/h
4	Hembusan angin sedang	20 Km/h – 29 Km/h
5	Hembusan angin sejuk	30 Km/h – 39 Km/h
6	Hembusan angin kuat	40 Km/h – 50 Km/h
7	Mendekati kencang	51 Km/h – 61 Km/h

<sup>14</sup> *Ibid*

<sup>15</sup> *Ibid*

<sup>16</sup> Akhmad Fadholim, “ Analisis Data Arah Dan Kecepatan Angin Landas Pacu (Runway) Menggunakan Aplikasi Windrose Plot (Wrplot),” Jurnal Ilmu Komputer Volume 9 Nomor 2, Stasiun Meteorologi Pangkalpinang, September 2013, h.85

<sup>17</sup> Bayong Tjasyono HK, “Sistem Angin,” Workshop Kincir angin, Bandung: FITK – ITB, 22 agustus 2007 ( online 1 Juni 2015 )

8	Kencang	62 Km/h – 74 Km/h
9	Kencang sekali	75 Km/h – 87 Km/h
10	Badai	88 Km/h – 101 Km/h
11	Badai dasyat	102 Km/h – 117 Km/h
12	Badai topan	> 118 Km/h

Sumber : *Wikipedia.org* (online 16 Oktober 2016 )

Tekanan udara bebas dibakukan menjadi tekanan standar yaitu 1 atmosfer yang berlaku di setiap tempat dan waktu. Pembakuan ini merupakan sebuah penyederhanaan dan idealisasi, karena tentu saja tekanan udara di satu lokasi berubah menurut ketinggian temperatur, dalam tekanan dan tingkat jumlah dan jenis pertikel udara atmosfernya. Untuk keperluan cuaca digunakan satuan tekanan lain yaitu atmosfer (atm), cm-raksa (cmHg) dan milibar (mb). Dalam sistem satuan Internasional tekanan udara standar ini adalah :

$$1 \text{ mb} = 0,001 \text{ bar}$$

$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ atm} = 76 \text{ cmHg} = 1,01 \text{ bar} = 1,01325 \times 10^5 \text{ Pa} = 101,325 \text{ Pa}$$

atau bisa dibulatkan menjadi 101 kPa saja.<sup>18</sup>

## 6. Pola Angin di Indonesia

Pola angin di Indonesia pada umumnya dapat dibagi menjadi dua, yaitu angin musim dan angin setempat ( angin lokal )

### a. Angin Musim ( muson )

Angin musim di Indonesia dapat dibedakan atas angin musim timur dan angin musim barat.

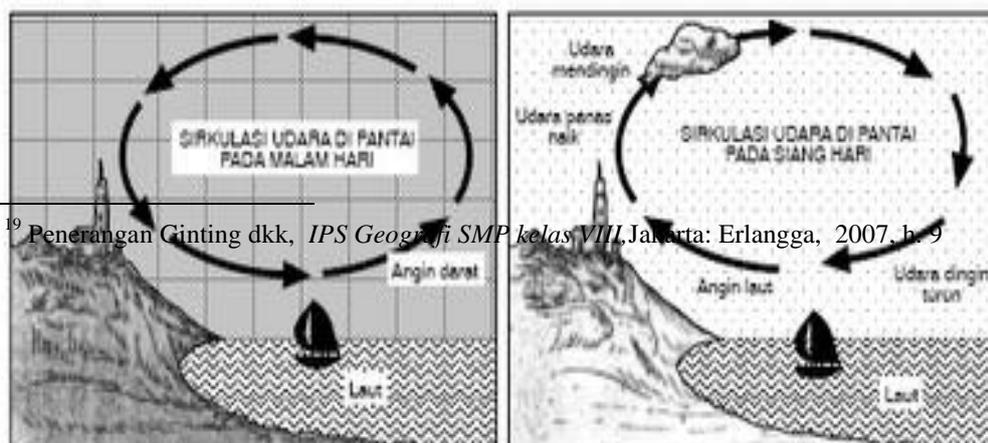
---

<sup>18</sup> Mohamad Ishaq, *Fisika Dasar Edisi 2*, Yogyakarta: Graha Ilmu, 2007, h.303

- 1) Angin musim timur, terjadi antara bulan April - Oktober. Ketika udara di belahan Bumi utara lebih panas dibandingkan belahan Bumi selatan karena Matahari berada di belahan utara. Oleh karena udara di belahan Bumi utara lebih panas, tekanan udaranya menjadi rendah. Sebaliknya di belahan Bumi selatan udaranya lebih dingin, tekanan udaranya lebih tinggi ( maksimum ). Australia berada di belahan Bumi selatan tekanan udaranya menjadi maksimum, sedangkan Asia berada di belahan utara tekanan udaranya lebih rendah ( minimum ). Dengan demikian angin bertiup dari Australia menuju Asia. Angin ini melalui Indonesia yang kita sebut dengan angin musim timur.
- 2) Angin musim barat terjadi antara bulan Oktober – April. ketika itu angin belahan Bumi utara lebih dingin dibanding dengan belahan Bumi selatan karena ketika itu Matahari berada di belahan Bumi selatan. Tekanan udara di belahan Bumi utara menjadi tinggi (maksimum). Sebaliknya, di belahan Bumi selatan tekanan udaranya menjadi rendah ( minimum).<sup>19</sup>

b. Angin Setempat ( angin lokal )

Di Indonesia terdapat beberapa pola angin yang kita jumpai pada daerah atau tempat-tempat tertentu, antara lain sebagai berikut.



<sup>19</sup> Penerangan Ginting dkk, *IPS Geografi SMP kelas VIII*, Jakarta: Erlangga, 2007, h. 9

## Gambar 2.2: Angin Darat dan Angin Laut

### 1) Angin Laut

Angin laut adalah angin yang bertiup dari arah laut ke arah darat yang umumnya terjadi pada siang hari dari pukul 09.00 sampai dengan pukul 16.00. Angin ini bisa dimanfaatkan para nelayan untuk pulang dari menangkap ikan di laut.

### 2) Angin Darat

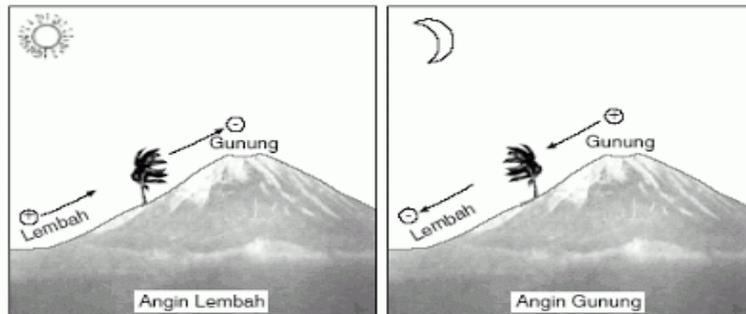
Angin darat adalah angin yang bertiup dari arah darat ke arah laut, yang pada umumnya terjadi saat malam hari, dari jam 20.00 sampai dengan 06.00. Angin jenis ini bermanfaat bagi para nelayan untuk berangkat mencari ikan dengan perahu bertenaga angin sederhana.

### 3) Angin Lembah

Angin lembah adalah angin yang bertiup dari arah lembah ke puncak gunung dan biasa terjadi pada siang hari.

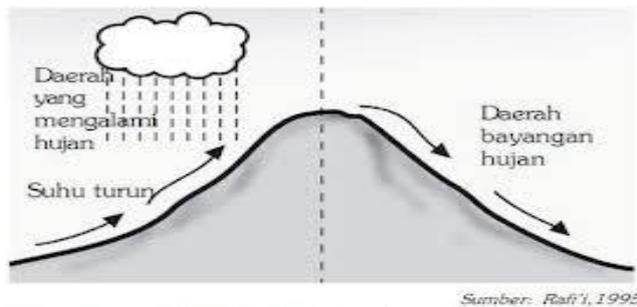
### 4) Angin Gunung

Angin gunung adalah angin yang bertiup dari puncak gunung ke lembah gunung dan terjadi pada malam hari.



Gambar 2.3 Angin Lembah dan Angin Gunung

### 5) Angin Fohn



Gambar 2.4 Angin Fohn

Angin Fohn (Angin Jatuh) adalah angin yang terjadi sesuai hujan Orografis. Angin yang bertiup pada suatu wilayah dengan temperatur dan kelengasan yang berbeda.

Angin Fohn terjadi karena ada gerakan massa udara yang naik pegunungan yang tingginya lebih dari 200 meter, udara naik di satu sisi lalu turun di sisi lain. Angin yang jatuh dari puncak gunung bersifat panas dan kering, karena uap air sudah di buang pada saat hujan orografis.

Biasanya angin ini bersifat panas merusak dan dapat menimbulkan korban. Tanaman yang terkena angin ini bisa mati

dan manusia yang terkena angin ini bisa turun daya tahan tubuhnya terhadap serangan penyakit.<sup>20</sup>

### C. Kincir Angin

Kincir adalah sebuah alat yang mengambil energi dari fluida. Geometri kincir sedemikian rupa sehingga fluida memberikan torsi pada rotor searah dengan putarannya. Daya poros yang dihasilkan dapat menggerakkan generator atau peralatan lainnya.<sup>21</sup>

#### 1. Jenis Kincir Angin

Kincir angin dibagi menjadi dua kelompok utama berdasarkan arah sumbu:

##### a. Kincir Angin Sumbu Horizontal.

Kincir angin dengan sumbu horizontal mempunyai sudu yang berputar dalam bidang vertikal seperti halnya propeler pesawat terbang. Kincir angin biasanya mempunyai sudu dengan berbentuk 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.



---

<sup>20</sup> *Ibid*

<sup>21</sup> Beyce Munson, *Mekanika Fluida Jilid 2*, Jakarta: Erlangga, 2005, h. 405

Gambar 2.5 Kincir Angin Sumbu Horizontal<sup>22</sup>

b. Kincir Angin Savonius.

Kincir angin dengan Savonius bekerja dengan prinsip yang sama seperti halnya kelompok horizontal. Namun, sudunya berputar dalam bidang yang paralel dengan tanah, seperti *mixer* kocokan telur.



Gambar 2.6 Kincir Angin Sumbu Vertikal<sup>23</sup>

Setiap jenis kincir angin memiliki ukuran dan efisiensi yang berbeda. Dalam memilih jenis kincir angin yang sesuai untuk suatu kegunaan diperlukan tidak hanya sekedar pengetahuan tetapi juga pengalaman.<sup>24</sup>

2. Kelebihan dan Kekurangan Kincir Angin

Kelebihan dan kekurangan kincir angin sumbu horizontal dan kincir angin sumbu vertikal.

a. Kincir Angin Sumbu Horizontal

---

<sup>22</sup> Buku panduan energi terbarukan. h. 47

<sup>23</sup> [http:// www.savonius\\_balaton\\_trioro.com](http://www.savonius_balaton_trioro.com)

<sup>24</sup> Y. Daryanto, *Kajian Potensi Angin*. h. 15

- 1) Prakondisi
  - a) Mulai beroperasi pada saat kecepatan angin mencapai 3-5 m/detik.
  - b) Memerlukan pemilihan lokasi yang tepat.
- 2) Keuntungan
  - a) Memberikan kinerja yang lebih baik pada produksi energi dibandingkan dengan kincir angin dengan Savonius.
  - b) Kincir angin berkapasitas 3 kW menghasilkan listrik 5.000-7.000 kWh per tahun (kecepatan angin 5.4 m/detik).
- 3) Kekurangan
  - a) Memerlukan kecepatan angin yang lebih tinggi untuk bisa memproduksi listrik.
  - b) Memerlukan menara yang tinggi untuk menangkap kecepatan angin yang cukup.
  - c) Tambahan sistem ekor (yaw) adalah bagian dari kincir horizontal, lebih kompleks.

b. Kincir Angin Vertikal

Kincir angin sumbu vertikal memiliki prinsip kerja yang sama dengan kincir angin sumbu horizontal, perbedaan utamanya adalah posisi rotor berputar .<sup>25</sup>

1) Prakondisi

---

<sup>25</sup> Tim Contained Energi Indonesia, *ENERGI yang Terbarukan*, h.28 ( online 5 Maret 2015)

Mulai beroperasi pada saat kecepatan angin mencapai 1.5-3 m/detik

2) Keuntungan

- a) Bisa ditempatkan di lokasi di mana kincir angin bersumbu horizontal akan sesuai.
- b) Tidak perlu diarahkan ke arah angin.
- c) Mulai dioperasikan pada angin berkecepatan rendah.
- d) Pemeliharaan lebih mudah.
- e) Dikenal tidak bising.

3) Kekurangan

Kinerja lebih buruk dalam memproduksi energi dibandingkan dengan kincir angin bersumbu horizontal.<sup>26</sup>

#### **D. Sistem Konversi Energi Angin**

Sistem konversi energi angin merupakan suatu sistem yang bertujuan untuk mengubah energi potensial angin menjadi energi mekanik poros oleh rotor untuk kemudian diubah lagi oleh alternator menjadi energi listrik. Prinsip utamanya adalah mengubah energi listrik yang dimiliki angin menjadi energi kinetik poros. Besarnya energi yang dapat ditransferkan ke rotor tergantung pada massa jenis udara, luas area dan kecepatan angin. Hal ini selanjutnya akan dibahas melalui persamaan-persamaan.

---

<sup>26</sup> *Ibid*, h.42

Energi kinetik untuk suatu massa angin  $m$  yang bergerak dengan kecepatan  $v$  yang nantinya akan diubah menjadi energi poros dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$EK = \frac{1}{2} mv^2 \quad (2.5)$$

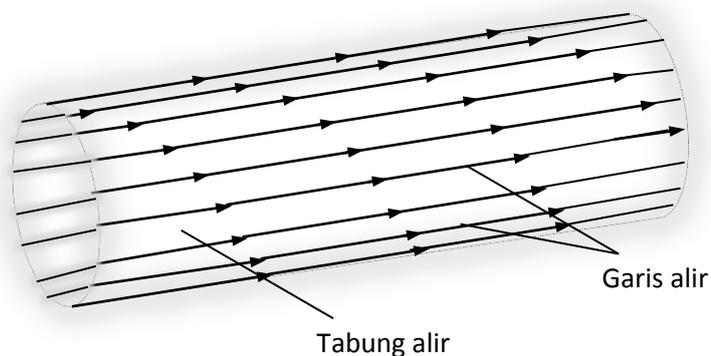
Energi kinetik yang terkandung dalam angin inilah yang ditangkap oleh kincir angin untuk memutar rotor.

### **E. Aliran Fluida**

Aliran fluida secara ekstrim dapat menjadi kompleks, seperti terlihat pada laju arus sungai dan pusaran api pada obor. Tetapi beberapa hal dapat ditunjukkan dengan model ideal yang relatif sederhana. Fluida ideal adalah fluida yang *inkompresibel* ( yaitu, yang densitasnya sulit dirubah) dan tidak memiliki gesekan dalam (disebut *viskositas*). Cairan umumnya mendekati inkompresibel, dan kita juga bisa memperlakukan gas sebagai fluida inkompresibel jika beda tekanan antara daerah satu ke daerah lain tidak terlalu jauh. Gesekan dalam pada fluida menyebabkan teangan geser ketika dua batas fluida bergerak relatif satu dengan yang lain, seperti fluida mengalir di dalam tabung atau sekitar rintangan. Dalam beberapa kasus kita akan mengabaikan gaya gesekan ini dibandingkan gaya timbul dari gravitasi dan beda tekanan.

Pola yang ditempuh sebuah partikel dalam aliran fluida disebut garis lair ( *flow line* ). Jika seluruh aliran tidak berubah terhadap waktu, aliran disebut aliran tunak ( *steady flow* ). Dalam aliran tunak, setiap elemen yang memiliki titik tertentu akan memiliki pola yang sama. Dalam kasus ini “peta” laju aliran fluida pada berbagai titik dalam ruangan cenderung konstan,

meskipun masing-masing partikel dapat berubah baik dalam besar ataupun arah selama gerakannya. Garis arus (*streamlain*) adalah kurva di mana garis singgungnya pada setiap titik adalah arah dari laju fluida pada titik tersebut. Ketika pola aliran berubah terhadap waktu, garis arus tidak akan bertabrakan dengan garis alir. Kita hanya akan membahas keadaan aliran tunak di mana garis aliran dan garis arus identik.



Gambar 2.7 Tabung alir dibatasi oleh garis alir dalam aliran tunak.

Garis aliran yang melalui sudut elemen luas imajiner, seperti garis A dalam gambar 2.7 membentuk tabung yang disebut tabung alir (*flow tube*). Dari definisi garis aliran dalam aliran tunak tidak ada fluida yang dapat melalui sisi dinding tabung aliran fluida dalam tabung aliran yang berbeda tidak dapat bercampur.<sup>27</sup>

Aliran fluida dapat laminar atau turbulen, tergantung pada banyak faktor seperti kelajuan, kekasaran permukaan, dan jenis bahan permukaan. Pada kelajuan yang cukup lambat, aliran akan laminar, ini menghasilkan gaya gesekan yang cukup rendah. Bila kelajuan relatif udara dan permukaan bertambah, aliran laminar menjadi tidak setabil dan lapisan – lapisan udara

---

<sup>27</sup> Hugh D.Young dan Roger A.Freedman. *Fisika Unifersitas*.Jakarta:Erlangga. 2002. h. 435

mulai terpisah. Aliran kemudian menjadi turbulen, yang ditandai oleh pusaran arus udara. Lapisan batas turbulen mempunyai gesekan yang jauh lebih besar dibanding lapisan laminar, tetapi gesekan terbesar disebabkan oleh ketidaksetabilan gesekan udara pada daerah transisi antara aliran laminar dan turbulen. Sebenarnya gesekan aerodinamika dapat menjadi 5 kali lebih besar dalam jangkauan kelajuan transisi dibandingkan gesekan aerodinamika untuk aliran turbulen murni.<sup>28</sup>

Gambar 2.8 Aliran udara sekitar benda.

## **F. Turbulensi**

Ketika laju aliran fluida melebihi titik kritis tertentu, aliran tidak lagi laminar. Pola aliran menjadi benar-benar tidak beraturan, kompleks, selalu berubah terhadap waktu dan tidak terdapat pola keadaan tunak. Aliran kacau yang tidak teratur ini disebut turbulensi. Perbedaan antara aliran laminar dan aliran turbulen untuk dua sistem secara umum ; arus air dan naiknya asap di udara. Persamaan Bernoulli tidak tepat digunakan untuk kasus-kasus dimana terjadinya turbulensi, karena aliran tidak tunak.

Transisi dari aliran laminar ke turbulen terjadi sangat tiba-tiba. Pola aliran yang stabil pada laju rendah dapat tiba-tiba menjadi tidak stabil ketika

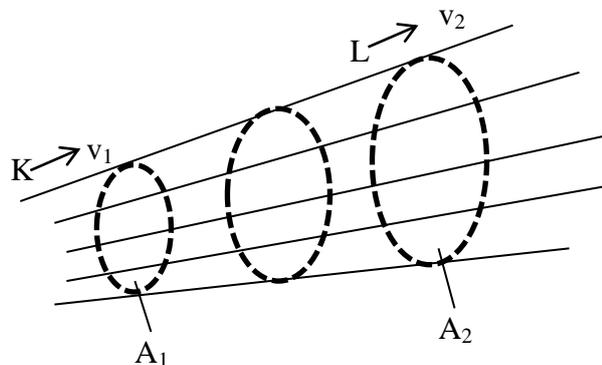
---

<sup>28</sup> Paul A.Tipler. *Fisika Untuk Sains dan Teknik*. Jakarta: Erlangga. 1998. h. 412

mencapai laju kritis. Ketidak teraturan dalam pola aliran dapat disebabkan oleh kekasaran dinding pipa, perbedaan densitas fluida, dan masih banyak faktor lain. Pada laju aliran rendah, gangguan tidak terlalu berpengaruh; pola aliran stabil dan cenderung tetap pada keadaan laminer. Tetapi, ketika laju kritis dicapai, pola aliran menjadi tidak stabil. Gangguan tidak lagi dianggap tidak berpengaruh, tetapi bertambah sampai merusak seluruh pola aliran laminer.<sup>29</sup>

### G. Persamaan Kontinuitas

Gerak fluida di dalam satu tabung aliran haruslah sejajar dengan dinding tabung meskipun besar kecepatan fluida dapat berbeda dari satu titik ke titik lain di dalam tabung.



Gambar 2.9 Tabung Alir dengan Perubahan Luas Penampang

Misalkan pada titik K besar kecepatan adalah  $v_1$  dan pada titik L kecepatannya adalah  $v_2$ . kemudian misalkan  $A_1$  dan  $A_2$  adalah luas penampang tabung aliran tegak lurus garis-garis arus pada titik K dan L.

<sup>29</sup> Hugh D. Young dan Roger A. Freedman. *Fisika Universitas*..... h. 441

Selama selang waktu  $\Delta t$  elemen fluida bergerak sejauh  $x = v \cdot \Delta t$ . Fluida yang melalui penampang  $A_1$  bergerak sejauh  $x_1 = v_1 \cdot \Delta t$  dan volumenya adalah  $V_1 = A_1 \cdot x_1$ , sedangkan yang melalui penampang  $A_2$  bergerak sejauh  $x_2 = v_2 \cdot \Delta t$  dan volumenya  $V_2 = A_2 \cdot x_2$ .

Untuk fluida yang tunak tak ada elemen fluida yang keluar melalui dinding, sehingga jumlah massa yang menembus tiap penampang haruslah sama.

$$\begin{aligned}
 m_1 &= m_2 \\
 \rho_1 \cdot V_1 &= \rho_2 \cdot V_2 \\
 \rho_1 \cdot A_1 \cdot v_1 \cdot \Delta t &= \rho_2 \cdot A_2 \cdot v_2 \cdot \Delta t \\
 \rho_1 \cdot A_1 \cdot v_1 &= \rho_2 \cdot A_2 \cdot v_2 \qquad (2.6)
 \end{aligned}$$

Persamaan di atas dinamakan persamaan kontinuitas. Untuk fluida tak kompresibel berlaku:

$$A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2 \Leftrightarrow v_1 : v_2 = A_2 : A_1 \qquad (2.7)$$

Dengan demikian, dapat dikatakan bahwa dalam aliran fluida tak kompresibel dan tunak kecepatan aliran berbanding terbalik dengan luas penampang.

Hasil kali  $A \cdot v$  menyatakan volum fluida yang mengalir persatuan waktu yang dinamakan debit ( $Q$ ).<sup>30</sup> Dengan demikian

$$Q = A \cdot v \qquad (2.8)$$

- Dengan :
- $Q =$  debit ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
  - $A =$  luas penampang ( $\text{m}^2$ )
  - $v =$  kecepatan fluida ( $\text{m/s}$ )

---

<sup>30</sup> Ahmad Zaelani, dkk, *1700 Bank soal*, h. 200

Sedangkan massa udara yang bergerak dalam satuan waktu dengan kekerapatan udara  $\rho$  sebagai:

$$m = \rho.Q \text{ atau } m = \rho.A.v \quad (2.9)$$

Sehingga energi kinetik angin yang berhembus dalam satuan waktu (daya angin) adalah:

$$P_{\text{angin}} = \frac{1}{2} (\rho A v) (v^2) = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (2.10)$$

dengan:  $P_{\text{angin}}$  = daya angin (watt)

$\rho$  = densitas udara (pada suhu  $27^0$  C,  $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$ )<sup>31</sup>

A = luas penampang kincir ( $\text{m}^2$ )

$v$  = kecepatan udara (m/s)

Sedangkan A adalah luas penampang sudu, secara matematis dapat ditulis sebagai berikut:

$$A = D \times h \quad (2.11)$$

dengan : D = diameter sudu (m) dan h = tinggi sudu (m)

## H. Teori Momentum Elementer Betz

Seorang aerodinamikawan berkebangsaan Jerman yang bernama Albertz Betz adalah orang yang pertama kali memperkenalkan teori tentang kincir angin. Ia mengasumsikan bahwa suatu kincir mempunyai sudu-sudu yang tidak terhingga jumlahnya dan tanpa hambatan. Dalam sistem konversi energi angin, energi mekanik kincir hanya dapat diperoleh dari energi kinetik yang tersimpan dalam aliran angin.<sup>32</sup> Dan pada saat yang

---

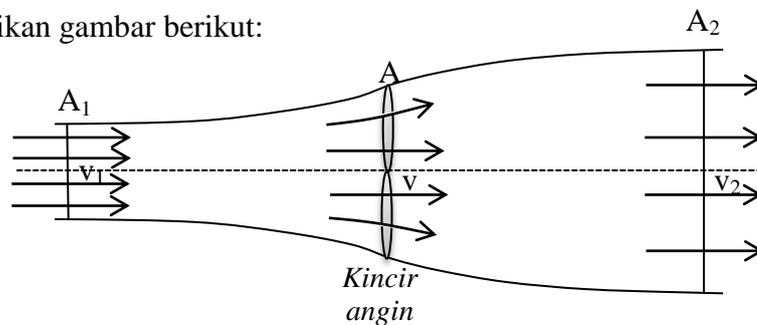
<sup>31</sup> Kus Irianto, *Fisika*, Bandung, PT. Sarana Pasca Karya. 1995. h. 21

<sup>32</sup> Farel.H.Napitupulu dan Fritz Mauritz, *Uji Eksperimental dan Analisis Pengaruh Variasi Kecepatan dan Jumlah Sudu Terhadap Daya dan Putaran Kincir Angin Vertikal Axis Savonius dengan Menggunakan Sudu Pengarah*, Jurnal Dinamis Volume II No.12, Fakultas Teknik Universitas Sumatera Utara, Januari 2013 h.3

bersamaan luas penampang yang dilewati angin haruslah lebih besar, sesuai dengan persamaan kontinuitas.

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 \quad (2.12)$$

Jika  $v_1$  adalah kecepatan angin sebelum melewati kincir angin,  $v$  adalah kecepatan saat mengenai kincir angin dan  $v_2$  adalah kecepatan angin setelah mengenai kincir angin. Maka daya mekanik kincir diperoleh dari selisih energi kinetik angin sebelum dan setelah melewati kincir angin<sup>33</sup>. Seperti diasumsikan gambar berikut:



Gambar 2.10 Asumsi Kecepatan Angin Melewati Penampang Kincir (Dutta, 2006)

Daya mekanik kincir adalah:

$$\begin{aligned} P_{Kincir} &= \frac{1}{2} (\rho A_1)(v_1^3) - \frac{1}{2} (\rho A_2)(v_2^3) \\ &= \frac{1}{2} \rho (A_1 v_1^3 - A_2 v_2^3) \end{aligned} \quad (2.13)$$

Dari persamaan (2.9) diperoleh,

$$P_{Kincir} = \frac{1}{2} \rho A v (v_1^2 - v_2^2) \quad (2.14)$$

Dengan menstubsitusi persamaan (2.9) ke persamaan (2.14) menjadi:

$$P_{Kincir} = \frac{1}{2} m (v_1^2 - v_2^2) \quad (2.15)$$

Dari persamaan di atas dapat disimpulkan bahwa untuk mendapat daya mekanik maksimum  $v_2$  harus bernilai nol tetapi pada kenyataannya tidaklah

<sup>33</sup> Marizka Lustia Dewi, *Analisis Kinerja Kincir*, h. 5

mungkin. Jika  $v_2 = 0$  maka  $v_1 = 0$  dengan kata tidak terjadi aliran fluida. Jika fluida tidak mengalir maka tidak ada daya yang dihasilkan. Sehingga untuk mendapatkan daya maksimum diperlukan suatu nilai perbandingan antara  $v_1$  dengan  $v_2$ .

Gaya yang bekerja pada kincir

$$F_{Kincir} = m(v_1 - v_2) \quad (2.16)$$

Maka daya kincir

$$\begin{aligned} P_{Kincir} &= F_{Kincir} v \\ &= m(v_1 - v_2) \cdot v \end{aligned} \quad (2.17)$$

Persamaan (2,11) dan (2,13)

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} m(v_1^2 - v_2^2) &= m(v_1 - v_2) \cdot v \\ \frac{1}{2} m(v_1 + v_2)(v_1 - v_2) &= m(v_1 - v_2) \cdot v \\ v &= \frac{\frac{1}{2} m(v_1 + v_2)(v_1 - v_2)}{m(v_1 - v_2)} \\ &= \frac{1}{2} (v_1 + v_2) \end{aligned} \quad (2.18)$$

Maka nilai  $v_1$  dan  $v_2$  sebanding dengan kecepatan aliran fluida pada kincir.

Sehingga massa udara menjadi

$$\begin{aligned} m &= \rho A v \\ &= \frac{1}{2} \rho A (v_1 + v_2) \end{aligned} \quad (2.19)$$

Daya mekanik kincir dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} P_{Kincir} &= \frac{1}{2} m(v_1^2 - v_2^2) \\ &= \frac{1}{2} [\frac{1}{2} \rho A (v_1 + v_2)] (v_1^2 - v_2^2) \\ &= \frac{1}{4} \rho A (v_1 + v_2) (v_1^2 - v_2^2) \end{aligned} \quad (2.20)$$

Perbandingan daya mekanik kincir dan daya keluaran teoritik kincir disebut sebagai faktor daya ( $C_p$ ) adalah:

$$C_p = \frac{P_{Kincir}}{P_{Angin}} = \frac{\frac{1}{4} \rho A (v_1 + v_2) (v_1^2 - v_2^2)}{\frac{1}{2} \rho A v_1^3} \quad (2.21)$$

$C_p$  maksimum diperoleh jika perbandingan  $v_2$  dengan  $v_1$  adalah  $\frac{1}{3}$  maka  $C_p$  yang dapat dihasilkan adalah 0,593. Koefisien daya tersebut dapat diartikan bahwa kincir angin hanya dapat mengubah energi angin menjadi energi mekanik kurang dari 60%. Nilai ini disebut dengan faktor betz.<sup>34</sup>

### I. *Tip Speed Ratio* (TSR)

*Tip Speed Ratio* adalah rasio kecepatan ujung rotor terhadap kecepatan angin bebas. Untuk kecepatan angin nominal yang tertentu, *tip speed ratio* akan berpengaruh pada kecepatan putar rotor. Kincir angin tipe *lift* akan memiliki *tip speed ratio* yang relatif lebih besar dibandingkan dengan kincir angin tipe *drag*. *Tip speed ratio* dihitung dengan persamaan:

$$\lambda = \frac{\omega R}{v_w} \quad (2.22)$$

Dengan:  $\lambda$  = *tip speed ratio*

$\omega$  = kecepatan sudut kincir (rad/s)

$R$  = diameter rotor (m)

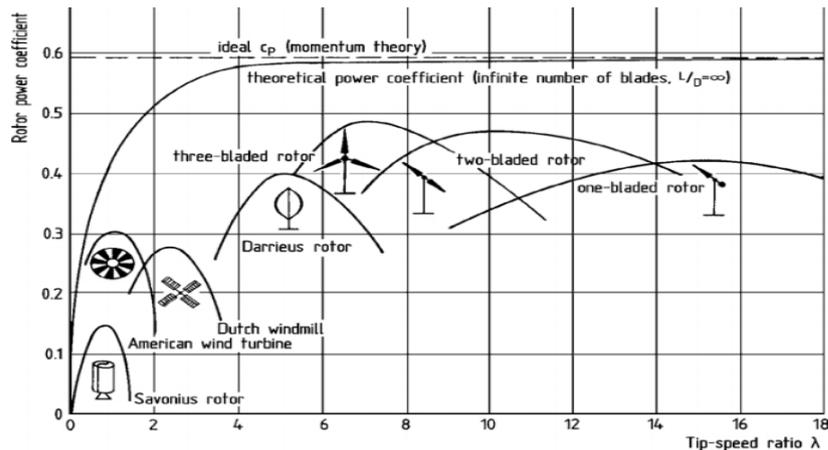
$v_w$  = kecepatan angin (m/s)

---

<sup>34</sup> Farel.H.Napitupulu dan Fritz Mauritz, *Uji Eksperimental dan Analisis*. h.4

Karena setiap tipe kincir angin memiliki karakteristik yang berbeda-beda, maka faktor daya sebagai fungsi dari TSR juga berbeda.<sup>35</sup>

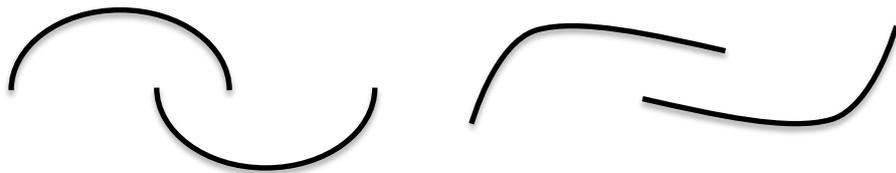
Grafik berikut menunjukkan variasi nilai *tip speed ratio* dan koefisien daya  $C_p$  untuk berbagai macam kincir angin.<sup>36</sup>



Gambar 2.11 Variasi *TSR* dan Koefisien Daya  $C_p$  Pada Berbagai Jenis Kincir Angin (Sumber : Hau, 2006)

### J. Kincir Angin Savonius

Salah satu jenis kincir angin sumbu vertikal yang dapat digunakan pada angin dengan kecepatan rendah adalah kincir angin Savonius. Kincir ini ditemukan oleh sarjana Finlandia bernama Sigurd J. Savonius pada tahun 1922. Konstruksi kincir sangat sederhana, tersusun dari dua buah sudu setengah silinder. Pada perkembangannya kincir Savonius ini banyak mengalami perubahan bentuk rotor, seperti desain rotor yang berbentuk huruf L.



<sup>35</sup> Marizka Lustia dewi, *Analisis Kinerja Turbin*. h. 8

<sup>36</sup> Adityo Putranto, *Rancang Bangun Kincir Angin*, h.25

(a) Tipe U

(b) Tipe L

Gambar 2.12 Tipe Rotor Savonius (Soelaiman, 2006)

Pada rotor Savonius, angin yang berhembus salah satu bilah rotor diharapkan lebih banyak mengalir ke bilah rotor lainnya melalui celah di sekitar poros sehingga menyediakan daya dorong tambahan pada bilah rotor ini, akibatnya rotor dapat berputar lebih cepat.

Dari paten pengembangan rotor Savonius L oleh Sadaaki seperti ditunjukkan oleh Gambar 2.11 terlihat bahwa pada bentuk rotor Savonius setengah lingkaran (Savonius U), aliran udara di kedua sisi bilah sama besar, sementara pada rancangan kedua (Savonius L) aliran udara pada sisi bilah yang lurus lebih besar dibandingkan pada sisi bilah lengkung setengah lingkaran.<sup>37</sup>



Gambar 2.13 (a) Rotor Savonius U, dan (b) Rotor Savonius L (Soelaiman, 2006)

### K. Aerodinamika *Drag* pada Kincir Angin Sumbu Vertikal

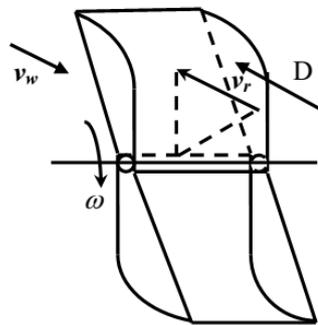
Untuk sistem konversi energi angin, daya yang dihasilkan dapat berasal dari gaya *drag* atau gaya *lift*. Pada kincir yang memanfaatkan gaya *drag* (lihat Gambar 2.12), udara dengan kecepatan  $v_w$  akan menerpa permukaan rotor dengan luas  $A$ . Daya yang diperoleh dari gaya *drag* dengan

<sup>37</sup> Marizka Lustia Dewi, *Analisis Kinerja Kincir Angin*. h. 13

kecepatan  $v$  adalah  $P = Dv_r$  dengan  $v_r = v_w - v$  yang menunjukkan kecepatan efektif pada area *drag*. Gaya *drag* ( $D$ ) dapat dirumuskan dengan:

$$D = \frac{1}{2} \rho C_D (v_w - v_r)^2 A \quad (2.23)$$

Dengan  $C_D$  merupakan koefisien hambat (tanpa dimensi). Gaya ini bekerja pada permukaan rotor. Komponen gaya aerodinamiknya sejajar dan searah dengan arah angin.<sup>38</sup>



Gambar 2.14 Profil Kecepatan untuk Rotor Tipe *Drag* (Rosidin, 2007)

## L. Benda Tegar

Benda tegar merupakan suatu system benda yang terdiri dari banyak partikel di mana jarak antar partikel-partikel penyusunnya tidak pernah berubah meskipun kepada benda itu dikenakan gaya, torka ( momen gaya) ataupun mengalami gerakan. Jadi selama gerakannya, bentuk benda tegar tersebut tidak pernah berubah.

Gerak pada sebuah benda tegar pada prinsipnya dibedakan menjadi 2 (dua) macam, yaitu translasi ( pergeseran) dan rotasi ( perputaran). Suatu benda dikatakan mengalami gerak translasi bila tempat kedudukan semua partikel membentuk lintasan lurus yang sejajar, sehingga garis hubung dua partikel sembarang pada benda itu tetap sejajar terhadap posisi sebelumnya.

<sup>38</sup> Marizka Lustia Dewi, *Analisis Kinerja Kincir Angin*. h. 14

Sedangkan suatu benda dikatakan mengalami gerak rotasi bila semua partikel mengelilingi sebuah sumbu dan tempat kedudukan masing-masing partikel membentuk lintasan lingkaran yang pusatnya terletak pada sumbu tadi.

Dalam kehidupan sehari-hari, gerakan suatu benda tegar pada umumnya merupakan kombinasi dari gerak translasi dan gerak rotasi. Misalnya gerakan roda pada sebuah kendaraan. Poros roda mengalami gerak rotasi sekaligus gerak translasi. Terhadap poros roda, partikel-partikel tersebut berotasi.<sup>39</sup>

#### 1. Rotasi Benda Tegar

Sebuah benda dikatakan melakukan gerakan rotasi jika semua titik pada benda bergerak mengitari poros benda tersebut, seperti gerakan kipas angin atau gerakan *compact disc*. Dalam dunia nyata, benda yang dikenai sebuah gaya dapat mengakibatkan benda tersebut berubah bentuk, dapat membuat benda meregang, ataupun memuntir. Selanjutnya, untuk benda-benda yang berputar pada sumbunya akan dianggap sebagai benda tegar. Benda tegar dapat didefinisikan sebagai benda yang memiliki bentuk dan ukuran yang definit dan tidak berubah.

Dalam gerak rotasi, benda mengalami pergeseran, kecepatan dan percepatan sudut, ini analogi dengan pergeseran, kecepatan dan percepatan linier pada gerak translasi. Titik-titik yang berbeda pada suatu benda tegar yang berotasi bergerak dengan jarak yang berbeda dalam selang waktu tertentu, tergantung dari seberapa jauh titik tersebut terhadap sumbu rotasi.

---

<sup>39</sup> Yosaphat Sumardi, dkk, *Mekanika*, Jakarta: Universitas Terbuka, 2007, h. 71

Tetapi karena benda itu tegar, semua titik berotasi melalui sudut yang sama pada waktu yang sama. Kecepatan sudut akan positif jika benda berotasi ke arah penambahan sudut  $\theta$  (berlawanan dengan arah jarum jam) dan negatif jika benda berotasi ke arah mengurangi sudut  $\theta$  (searah dengan jarum jam).

Kecepatan sudut ( $\omega$ ) merupakan limit dari kecepatan sudut rata-rata ( $\omega_{rt}$ ) saat  $\Delta t$  mendekati nol. Kecepatan sudut rata-rata didefinisikan sebagai rasio perpindahan sudut  $\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1$  terhadap  $\Delta t$  :

$$\omega_{rt} = \frac{\theta_2 - \theta_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta\theta}{\Delta t}$$

$$\omega = \lim_{\Delta \rightarrow 0} \frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{d\theta}{dt} \quad (2.24)$$

Dan ketika kecepatan suatu benda tegar mengalami perubahan, maka benda tersebut memiliki percepatan sudut ( $\alpha$ ):

$$\alpha = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{d\omega}{dt} \quad (2.25)$$

Jika sudut  $\theta$  dalam radian, satuan kecepatan sudut adalah radian per sekon (rad/s). Satuan lain yang juga sering digunakan adalah putaran (revolusi) per menit (rev/menit atau rpm). Terdapat dua konversi yang berguna yang menghubungkan rpm dengan rad/s.<sup>40</sup>

Karena 1 putaran =  $2\pi$  rad, maka:

$$1 \text{ rev/s} = 2\pi \text{ rad/s, dan } 1 \text{ rev/menit} = 1 \text{ rpm} = 2\pi / 60 \text{ rad/s} \quad (2.26)$$

## 2. Momen Inersia (Kelembaman)

---

<sup>40</sup> Marizka Lustia Dewi, *Analisis Kinerja Kincir Angin*. h. 20

Benda yang dalam keadaan diam cenderung mempertahankan keadaan diamnya. Benda dalam keadaan bergerak lurus (beraturan) cenderung mempertahankan gerakannya. Sifat yang cenderung mempertahankan keadaan gerak tersebut disebabkan karena benda memiliki massa dan sifat itu dikenal dengan istilah kelembaman (inersia). Suatu benda yang berotasi juga memiliki kecenderungan untuk mempertahankan keadaan rotasinya. Seberapa besar benda itu dapat mempertahankan rotasinya tergantung dari massa dan letak sumbu rotasi. Selanjutnya sifat yang cenderung mempertahankan keadaan gerak rotasi itu dikenal sebagai momen inersia.<sup>41</sup>

Pada gerak rotasi besaran yang analog dengan massa adalah momen inersia. Dengan demikian, momen inersia merupakan ukuran kelembaman benda yang berotasi/berputar terhadap sumbu putarnya.

Momen inersia ( $I$ ) dari sebuah partikel bermassa  $m$  didefinisikan sebagai hasil kali massa partikel ( $m$ ) dengan kuadrat jarak benda dari titik poros atau sumbu putar ( $r^2$ ).<sup>42</sup>

Secara matematis, momen inersia partikel dirumuskan sebagai berikut :

$$I = mr^2 \quad (2.27)$$

dengan :  $I$  = momen inersia (N)

$m$  = massa partikel ( kg)

$r$  = jarak partikel dari sumbu rotasi (m)

---

<sup>41</sup> Ibid. h. 7.31

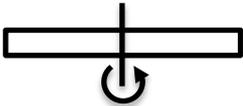
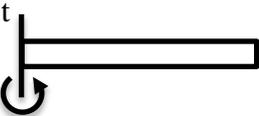
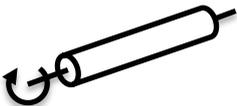
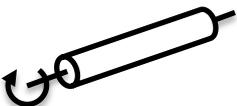
<sup>42</sup> Ibid,h.146

Dari persamaan di atas dapat dikatakan bahwa momen inersia sebuah partikel sebanding dengan massa partikel itu, dan sebanding dengan kuadrat jarak partikel ke sumbu putarnya.

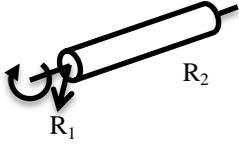
Sebuah benda tegar disusun oleh banyak partikel-partikel terpisah. Karena itu momen inersia sebuah benda terhadap suatu sumbu putar dapat dipandang sebagai jumlah aljabar momen-momen inersia partikel-partikel penyusunnya. Jika massa partikel-partikel penyusun itu adalah  $m_1, m_2, m_3 \dots$  dan jarak masing-masing partikel terhadap sumbu putarnya adalah  $r_1, r_2, r_3 \dots$  momen inersia benda terhadap sumbu tersebut adalah

$$I = \sum m_i r_i^2 = m_1 r_1^2 + m_2 r_2^2 + m_3 r_3^2 + \dots \quad (2.28)$$

Tabel 2.2 Momen Inersia Beberapa Benda<sup>43</sup>

Bentuk benda	Momen inersia	Nama benda
	$I = \frac{1}{12} m l^2$	Batang homogeny sumbu putar pada tengah-tengah batang
	$I = \frac{1}{3} m l^2$	Batang homogeny sumbu putar pada ujung batang.
	$I = mR^2$	Roda sumbu putar melalui titik pusat roda tegak lurus bidang roda.
	$I = \frac{1}{2} mR^2$	Silinder pejal (padat) sumbu melalui titik pusat.
	$I = mR^2$	Silinder berongga sumbu melalui pusat.

<sup>43</sup> Ahmad Zaelani, dkk, 1700 Bank soal, h. 147

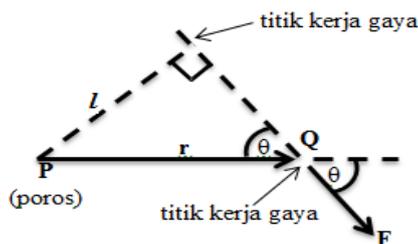
	$I = \frac{1}{2} m(R_1^2 + R_2^2)$	Silinder tebal dengan: $R_1$ = jari-jari dalam $R_2$ = Jari-jari luar
---	------------------------------------	---

Sumber: Ahmad Zaelani.dkk. 1700 Bank soal

### 3. Momen Gaya ( Torsi )

Pada gerak rotasi, sebuah benda hanya dapat berubah gerakannya dari diam menjadi berputar jika pada benda itu diterapkan sebuah gaya. Perubahan gerak pada gerak rotasi berupa perubahan kecepatan sudut.

Perubahan gerak rotasi terjadi karena adanya “ gaya pemutar” yang dikenal dengan nama *momen gaya*.



Gambar 2.15 Sketsa Momen Gaya yang Bekerja pada Benda

Misalkan  $F$  bekerja pada benda dengan poros di  $P$ .  $Q$  adalah titik kerja gaya  $F$  yaitu titik tempat gaya  $F$  bekerja,  $r$  adalah vektor posisi  $Q$  terhadap poros  $P$  dan sudut antara  $r$  dan  $F$  adalah  $\theta$  ( $r$  dan  $F$  adalah vektor). Momen gaya  $F$  ( $\tau$ ) didefinisikan sebagai perkalian silang (*cross product*) antara vektor posisi  $r$  dan vektor gaya  $F$ , yaitu

$$\tau = r.F \quad (2.29)$$

Dengan demikian besar momen gaya adalah

$$\tau = r F \sin \theta \quad (2.30)$$

Pada gambar tampak bahwa

$$r \sin \theta = \ell \quad (2.31)$$

Dengan  $\ell$  adalah lengan momen, yaitu panjang garis yang ditarik dari titik poros sampai memotong tegak lurus garis kerja gaya. Garis kerja gaya adalah garis yang dibuat melalui vektor gaya yang bekerja.

Dengan demikian besar momen gaya ( $\tau$ ) merupakan hasil kali lengan momen dan besar gaya.

$$\tau = \ell.F \quad (2.32)$$

dengan:  $\tau$  = momen gaya (Nm)

$\ell$  = lengan momen ( m)

F = gaya (N)

Momen gaya positif jika arah putarannya searah dengan arah perputaran jarum jam dan momen gaya negative jika arah putarannya berlawanan dengan arah perputaran jarum jam.<sup>44</sup>Momen gaya total yang berkerja pada suatu benda tegar, menentukan percepatan sudutnya dapat dihubungkan dengan persamaan:

$$\tau = I \alpha \quad \text{dengan} \quad \alpha = \frac{d\omega}{dt} \quad (2.33)$$

Momen gaya pada masing-masing partikel disebabkan oleh gaya total yang berkerja pada partikel tersebut. Selain persamaan di atas torsi juga dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

---

<sup>44</sup> Ahmad Zaelani, dkk, 1700 Bank soal bimbingan pemantapan fisika SMA, Bandung: Yrama Widya, 2006, h. 145

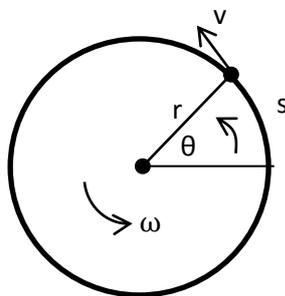
$$\tau = v^2 R^2 / \lambda \quad (2.34)$$

Pada kincir, besar momen gaya bergantung pada kecepatan angin dan sudut kincir. Momen gaya dengan kecepatan sudut memiliki hubungan dengan daya kincir yang dirumuskan sebagai berikut:<sup>45</sup>

$$P_{kincir} = \tau \omega \quad (2.35)$$

#### 4. Energi Kinetik Rotasi

$EK = \frac{1}{2} mv^2$  merupakan energi kinetik benda yang mengalami gerak translasi. Benda yang berotasi pada sebuah sumbu dikatakan mengalami energi kinetik rotasi. Dengan analogi terhadap energi kinetik translasi, kita mengharapkan besaran ini dinyatakan dengan  $\frac{1}{2} I\omega^2$  dimana  $I$  adalah momen inersia benda dan  $\omega$  adalah kecepatan sudutnya.<sup>46</sup>



Gambar 2.16 Benda Bergerak Melingkar<sup>47</sup>

Untuk kasus benda tegar yang berotasi terhadap sebuah sumbu dengan kecepatan sudut  $\omega$ , kecepatan setiap partikel adalah,

$$v_i = \bar{\omega} \times \bar{r}_i \quad (2.36)$$

Dan besar kelajuannya adalah,

$$v_i = \omega \cdot R_i \quad (2.37)$$

<sup>45</sup> Marizka Lustia Dewi, *Analisis kinerja Kincir*. h. 21

<sup>46</sup> Douglas C. Giancoli, *Fisika Edisi Kelima Jilid 1*, alih bahasa Yuhilza Hanum, Jakarta: Erlangga, 2001, h. 265

<sup>47</sup> Supiyanto, *Fisika kelas X*, Jakarta: Phibeta, 2006, h. 60

Dimana  $R_i$  adalah jarak dari partikel ke sumbu rotasi ( kita ingat bahwa benda tegar merupakan system dengan banyak partikel yang jarak antar partikel penyusunnya konstan) sehingga energi kinetik partikel menjadi,

$$E_k = \sum \frac{1}{2} m_i (\omega \times r) \cdot (\omega \times r) \quad (2.38)$$

Atau besarnya dapat ditulis sebagai berikut,

$$E_k = \sum \frac{1}{2} m_i \left| \omega \times r \right|^2 \quad (2.39)$$

Jika  $v_i = \omega R_i$

$$E_k = \sum \frac{1}{2} m_i (\omega R_i)^2 \quad (2.40)$$

$$E_k = \frac{1}{2} (\sum m_i R_i^2) \omega^2 \quad (2.41)$$

dengan mengingat momen inersia pada persamaan (2.21) diperoleh,

$$E_k = \frac{1}{2} I \omega^2 \quad (2.42)$$

Energi kinetik total dari benda secara keseluruhan akan sama dengan jumlah energi kinetik semua partikelnya.<sup>48</sup>

### M. Brake Horse Power ( BHP)

*Brake Horse Power* adalah daya dari kincir yang diukur setelah mengalami pembebanan yang disebabkan oleh generator, gearbox dan perangkat tambahan lainnya. *Brake* yang dimaksud adalah suatu peralatan yang digunakan untuk memberikan beban pada kincir. Dalam percobaan BHP diukur dengan menggunakan Generator. Dengan mengukur besarnya tegangan yang dihasilkan, dapat diketahui besarnya daya generator, seperti persamaan berikut:

$$P_{\text{generator}} = V \times I \quad (2.43)$$

---

<sup>48</sup> Yosaphat Sumardi, dkk, *Mekanika*, h.8.3

Dari persamaan di atas dimana daya generator dilambangkan  $P_{\text{generator}}$  dengan satuan watt,  $V$  merupakan tegangan listrik yang dihasilkan oleh generator dengan satuan volt dan  $I$  merupakan besarnya arus listrik dengan satuan ampere.<sup>49</sup> Besarnya BHP dapat dihitung setelah didapat harga  $P_{\text{generator}}$  sebagai berikut:

$$\text{BHP} = \frac{P_{\text{generator}}}{\eta_{\text{generator}}} \quad (2.44)$$

Dimana  $\eta_{\text{generator}}$  merupakan efisiensi generator dengan satuan ( % )

#### N. Efisiensi ( $\eta$ )

Untuk menyatakan performa suatu mesin biasanya dinyatakan dalam efisiensi yang merupakan perbandingan antara efek manfaat yang digunakan dengan pengorbanan yang dilakukan mesin. Persamaan efisiensi adalah sebagai berikut :

$$\eta = \frac{\text{BHP}}{P_{\text{input}}} 100 \% \quad (2.45)$$

dimana  $\eta$  merupakan efisiensi yang dinyatakan dengan persen (%), BHP merupakan daya kincir setelah mengalami pembebanan dengan satuan Watt, sedangkan  $P_{\text{input}}$  merupakan daya angin yang mengenai sudu dengan satuan Watt.<sup>50</sup>

---

<sup>49</sup> Andreas Andi Setiawan, “Pengaruh Jarak Celah Sudu Terhadap Unjuk Kerja Kincir Angin Poros Vertikal Savonius”, Malang: Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, h. 2, t.d

<sup>50</sup> *Ibid*, h. 3