

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TERORI**

#### **2.1 Angin Sebagai Sumber Daya Energi**

##### **2.2.1 Definisi Angin**

Angin merupakan energi yang terjadi dikarenakan adanya perbedaan suhu antara udara dingin dan panas yang mengalir. (Kadir, 1995) Angin adalah udara yang bergerak sehingga memiliki kecepatan, tenaga, dan arah. Penyebab dari pergerakan ini adalah pemanasan bumi oleh radiasi matahari. Pergerakan angin ini memiliki energi kinetik, oleh karena itu energi angin dapat dikonversi menjadi energi lainnya seperti energi listrik dengan menggunakan kincir angin atau turbin angin.

Angin seperti fluida yang lain pada umumnya mempunyai profil geseran atau profil kecepatan ketika mengalir melewati benda padat, misalnya permukaan bumi. Pada tepat di 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*) (Y. Daryanto, 2007).

##### **2.2.2 Proses Terjadinya Angin**

Terjadinya angin dikarenakan adanya perbedaan tekanan udara atau perbedaan suhu udara pada suatu daerah. Hal ini berkaitan dengan besarnya energi panas matahari yang diterima oleh permukaan bumi. Pada suatu daerah yang menerima energi panas matahari lebih besar akan mempunyai suhu udara yang lebih panas dan tekanan udara yang cenderung lebih rendah. Sehingga akan

terjadinya perbedaan suhu dan tekanan udara antara daerah yang menerima energi panas lebih rendah dengan yang menerima energi panas yang besar, akibatnya akan terjadinya aliran udara pada daerah tersebut yang menghasilkan angin. Kondisi aliran angin dipengaruhi oleh permukaan bumi yang dilalui oleh aliran dan perbedaan temperatur permukaan bumi.

### **2.2.3 Angin Menurut Jenisnya**

Angin terbagi menjadi dua jenis, yaitu angin musim dan angin lokal. Angin darat, laut, lembah dan jatuh merupakan beberapa jenis angin lokal.

#### **a. Angin Gunung dan Angin Lembah**

Perbedaan pemanasan suhu juga terjadi dikawasan pegunungan dengan kawasan lembah, berikut penjelasannya:

Ketika matahari terbit merupakan waktu dimana angin lembah terjadi, daerah pertama kali yang mendapatkan energi panas adalah puncak gunung dan proses tersebut berlangsung sepanjang hari, lembah mendapatkan energi panas lebih rendah dibandingkan lereng gunung. Sehingga terjadi perbedaan suhu antara lembah dan lereng gunung. Udara dingin dari lembah menggantikan udara panas pada lereng gunung yang naik, akibatnya terjadi aliran udara dari lembah menuju gunung yang dinamakan dengan angin lembah. Sedangkan pada sore hari puncak gunung yang mendingin akan mengalirkan udara ke lembah dan lembah akan melepas energi panas. Aliran udara tersebut dinamakan angin gunung.

#### **b. Angin Ribut atau Angin Puyuh**

Angin ribut atau angin puyuh biasa juga disebut sebagai angin puting beliung, yaitu angin kencang yang datang secara tiba – tiba, mempunyai pusat gerak seperti spiral hingga menyentuh permukaan bumi dan hilang dalam waktu singkat (3 – 5 menit). Dengan kecepatan angin rata – rata berkisar antara 30 – 40 knots. Angin ini berasal dari awan Cumulonimbus (CB) yaitu awan yang bergumpal berwarna abu-abu gelap

dan menjulang tinggi. Namun, tidak semua awan *Cumulonimbus* menyebabkan angin puting beliung. Puting beliung dapat terjadi dimana saja, di darat maupun di laut, dan jika terjadi di laut durasinya lebih lama daripada di darat. Angin ini lebih sering terjadi pada siang atau sore hari, terkadang pada malam hari dan lebih sering terjadi pada peralihan musim (pancaroba).

c. Angin Fohn

Angin Fohn adalah angin bersifat kering dan panas yang turun dari lereng pegunungan. Angin ini terjadi karena turunnya kelembaban udara yang mendapatkan pemanasan secara dinamis. Sehingga udara panas dan keringlah yang mengalir ke daratan. Selain itu jenis angin selain angin lokal merupakan angin yang bertiup dengan kawasan yang lebih luas seperti angin musim atau angin monsoon. Ada dua jenis angin monsoon yang terjadi di Indonesia, yaitu monsoon barat dan monsoon timur. Angin monsoon disebabkan oleh perbedaan tekanan udara pada benua yang mengapit Indonesia, yaitu Benua Australia dengan udara kering dan Benua Asia dengan udara yang relatif lembab.

d. Angin Monsun Barat

Pada bulan Oktober hingga April merupakan bulan dimana angin monsoon barat terjadi. Pada bulan tersebut belahan bumi bagian selatan tepat berada di bawah matahari, yang mengakibatkan suhu pada belahan bumi bagian selatan lebih tinggi dibandingkan dengan suhu bumi bagian utara, sehingga angin bertiup ke bumi bagian selatan.

e. Angin Monsun Timur

Pada bulan April hingga Oktober merupakan bulan dimana angin monsoon timur terjadi. Pada saat itu bumi bagian utara berkedudukan tepat dibawah matahari. Menyebabkan benua Australia mengalami musim dingin sehingga bertekanan tinggi. Sedangkan benua Asia lebih panas, sehingga tekanannya rendah.

f. Angin Laut dan Angin Darat

Angin darat merupakan angin yang bertiup mengalir dari darat ke lautan, sedangkan angin laut merupakan angin yang bertiup dari laut ke daratan. Adanya perbedaan sifat antara lautan dan daratan mengakibatkan terjadinya angin darat dan angin laut. Lautan menyerap dan melepas energi panas lebih lama daripada daratan. Proses terjadinya angin darat dan angin laut :

- 1) Pada malam hari merupakan waktu terjadinya angin darat, dikarenakan daratan melepas energi panas yang diserap dari permukaan bumi lebih cepat yang mengakibatkan suhu udara menjadi dingin. Sedangkan energi panas di lautan sedang mengalami proses pelepasan energi ke udara. Udara yang naik dari lautan ke atas digantikan oleh udara dingin yang bergerak dari daratan, sehingga hal ini merupakan penyebab terjadinya aliran udara dari daratan menuju ke lautan. Pada malam hari hingga dini hari merupakan waktu terjadinya angin darat.
- 2) Pada waktu pagi hingga sore merupakan waktu terjadinya angin laut, karena energi panas yang ada di daratan diserap lebih cepat daripada energi panas yang diserap di lautan, sehingga udara lebih panas terjadi di daratan daripada di lautan. Udara dingin dari lautan akan naik dan menggantikan udara panas di daratan.

## **2.2 Kecepatan Angin**

Syarat dan kondisi kecepatan angin dapat diukur dengan alat pengukur kecepatan dan arah angin. Selain dengan alat pengukur dapat juga diukur atau diperkirakan menggunakan tabel Skala Beaufort. Berikut tingkatan kecepatan angin menurut table Skala Beaufort.

Tabel 2.1 Tingkat kecepatan angin menurut Beaufort

| Skala Beaufort | Kategori           | Satuan dalam km/jam | Satuan dalam knots | Keadaan di daratan   | Keadaan di lautan  |
|----------------|--------------------|---------------------|--------------------|--|--|
| 0              | Udara Tenang       | 0                   | 0                  | Asap bergerak secara vertikal  | Permukaan laut seperti kaca  |
| 1~3            | Angin lemah        | $\leq 19$           | $\leq 10$          | Angin terasa di wajah; daun-daun berdesir; kincir angin bergerak oleh angin        | riuk kecil terbentuk namun tidak pecah; permukaan tetap seperti kaca   |
| 4              | Angin sedang       | 20~29               | 11~16              | mengangkat debu dan menerbangkan kertas; cabang pohon kecil bergerak               | Ombak kecil mulai memanjang; garis-garis buih sering terbentuk   |
| 5              | Angin segar        | 30~39               | 17~21              | pohon kecil berayun; gelombang kecil terbentuk di perairan di darat                | Ombak ukuran sedang; buih berarak-arak   |
| 6              | Angin kuat         | 40~ 50              | 22~ 27             | cabang besar bergerak; siulan terdengar pada kabel telepon; payung sulit digunakan | Ombak besar mulai terbentuk, buih tipis melebar dari puncaknya, kadang-kadang timbul percikan  |
| 7              | Angin rebut        | 51~ 62              | 28 ~33             | pohon-pohon bergerak; terasa sulit berjalan melawan arah angin                     | Laut mulai bergolak, buih putih mulai terbawa angin dan membentuk alur-alur sesuai arah angin  |
| 8              | Angin ribut sedang | 63~ 75              | 34~ 40             | ranting-ranting patah; semakin sulit bergerak maju                                 | Gelombang agak tinggi dan lebih panjang; puncak gelombang yang pecah mulai bergulung; buih yang terbesar anginnya semakin jelas alur-alurnya |

Tabel 2.1 Tingkat kecepatan angin menurut Beaufort

| Skala Beaufort | Kategori         | Satuan dalam km/jam | Satuan dalam knots | Keadaan di daratan   | Keadaan di lautan   |
|----------------|------------------|---------------------|--------------------|--|---|
| 9              | Angin ribut kuat | 76~ 87              | 41~ 47             | kerusakan bangunan mulai muncul; atap rumah lepas; cabang yang lebih besar patah     | Gelombang tinggi terbentuk buih tebal berlajur-lajur; puncak gelombang roboh bergulung-gulung; percik-percik air mulai mengganggu penglihatan   |
| 10             | Badai            | 88~ 102             | 48~ 55             | jarang terjadi di daratan; pohon-pohon tercabut; kerusakan bangunan yang cukup parah | Gelombang sangat tinggi dengan puncak memayungi; buih yang ditimbulkan membentuk tampal-tampal buih raksasa yang didorong angin, seluruh permukaan laut memutih; gulungan ombak menjadi dahsyat; penglihatan terganggu                            |
| 11             | Badai kuat       | 103 ~117            | 56~ 63             | sangat jarang terjadi- kerusakan yang menyebar luas                                  | Gelombang amat sangat tinggi (kapal-kapal kecil dan sedang terganggu pandangan karenanya), permukaan laut tertutup penuh tampal -tampal putih buih karena seluruh puncak gelombang menghamburkan buih yang terdorong angin; penglihatan terganggu |
| 12+            | Topan            | ≥118                | ≥64                | sangat jarang terjadi- kerusakan yang menyebar luas                                  | Udara tertutup penuh oleh buih dan percik air; permukaan laut memutih penuh oleh percik-percik air yang terhanyut angin; penglihatan amat sangat terganggu  |

### 2.3 Energi Alternatif dan Terbarukan

Energi alternatif merupakan pengganti dari energi yang berbahan konvensional. Energi terbarukan merupakan energi yang tidak dikhawatirkan jumlahnya karena energi ini berasal dari alam yang berkelanjutan. Semakin berkurangnya bahan bakar konvensional di masa kini tentu saja energi terbarukan dan energi alternatif sangat diperlukan. Sementara itu meningkatnya kebutuhan energi semakin melonjak. Semakin berkurangnya jumlah bahan bakar yang berasal dari minyak ataupun batu bara dan muncul berbagai alternatif sebagai substitusi dari energi minyak ataupun batu bara tersebut. Energi alternatif meliputi energi surya, energi air, energi panas bumi, energi ombak, dan energi angin.

Walaupun pemanfaatan energi angin dapat dilakukan di mana saja, daerah-daerah yang memiliki potensi energi angin yang tinggi tetap perlu diidentifikasi agar pemanfaatan energi angin ini lebih kompetitif dibandingkan dengan energi alternatif lainnya. Oleh karena itu studi potensi pemanfaatan energi angin ini sangat tepat dilakukan guna mengidentifikasi daerah-daerah berpotensi. Angin selama ini dipandang sebagai proses alam biasa yang kurang memiliki nilai ekonomis bagi kegiatan produktif masyarakat (Y. Daryanto, 2007).

Berdasarkan topik tugas akhir yang berkaitan diambil terdapat beberapa referensi penelitian-penelitian yang berkaitan dengan skripsi ini, berikut adalah sebagian contoh penunjang tulisan skripsi:

- a. Arnold Thamrin Halomoan, 2016 “Studi Kelayakan Potensi Energi Angin di Wilayah Surakarta, Indonesia” Skripsi, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Sebelas Maret, menjelaskan tentang energi angin yang berada di wilayah Surakarta apakah memenuhi persyaratan atau kelayakan sebagai sumber daya pembangkit listrik tenaga angin sebagai energi terbarukan di wilayah Surakarta.
- b. Zulkifli, 2015 “Analisis Potensi Angin di Kecamatan Batudaa Pantai Kabupaten Gorontalo Provinsi Gorontalo” Skripsi, Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Gorontalo, menjelaskan tentang potensi sumber daya angin pada sekitar pesisir pantai

untuk dianalisa sebagai energi alternative yang dapat dimanfaatkan sebagai pasokan listrik warga sekitar.

- c. Cahya Adijana Nugraha 2015, “Analisa Potensi Daya Angin Sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) di Pantai Congot, Kulonprogo” Skripsi, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, menjelaskan tentang analisa pembangkit listrik tenaga bayu dengan memanfaatkan energi angin di Pantai Congot sebagai energi alternatif penunjang pasokan listrik warga sekitar yang memiliki potensi angin cukup besar.
- d. Akbar Rachman, 2012 “Analisis dan Pemetaan Potensi Angin di Indonesia” Skripsi, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia, menjelaskan tentang analisa potensi sumber daya angin yang ada di Indonesia dan pemetaan potensi yang dapat dioptimalkan sumber daya angin sebagai pembangkit listrik.
- e. Danang Dwi Anggoro, 2016 “Analisis Potensi Pembangkit Listrik Tenaga Angin Dalam Penyediaan Industri Mikro” Skripsi, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, menjelaskan tentang kelayakan Pembangkit Listrik Tenaga Angin sebagai penyuplai energi listrik alternatif industri mikro di pesisir Pantai Setro Jenar, Kecamatan Bulus Pesantren, Kabupaten Kebumen.
- f. Fachreza Noor Bagaskara, 2017 “Analisis Potensi Sumber Daya Angin Sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Bayu dan Energi Alternatif Dalam Penyediaan Energi di Pantai Samas Bantul” Skripsi, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, menjelaskan tentang kelayakan Pembangkit Listrik Tenaga Angin sebagai penyuplai energi listrik alternatif industri mikro di pesisir Pantai Samas, Kabupaten Bantul.

## **2.4 Potensi Energi Angin**

Indonesia merupakan negara yang memiliki potensi energi listrik alami yang begitu besar, salah satunya adalah angin. Potensi angin dapat dimanfaatkan menjadi sumber energi, mempunyai kecepatan diatas 5m/detik dan berada pada 120 lokasi yang tersebar di wilayah Nusa Tenggara Timur, Nusa Tenggara Barat, Sulawesi Selatan, dan Pantai Selatan Jawa (Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional, 2006).

Menurut Kepala Penelitian dan Pengembangan Daerah Jawa Barat “Neni Sri Utami, 2012” Kecepatan angin di Indonesia kurang dari 5,9 per meter detik tapi bukan tidak bias dimanfaatkan. Indramayu memiliki 40 kincir angin yang hanya 3 meter per detik dapat memompa air 2,7 meter kubik perjamnya dan hanya memerlukan biaya 500 ribu untuk biaya perawatan setiap tahunnya. Pemanfaatan potensi angin seperti ini diharapkan mampu membantu masyarakat untuk menekan biaya perawatan yang mulai sangat mahal di era globalisasi.

Peranan pemerintah juga sangat dibutuhkan untuk mendukung adanya suatu energi terbarukan di wilayah yang memiliki potensi tinggi seperti potensi angin. Di desa salah satu tempat yang memiliki potensi angin, dengan letak di pinggir pantai kawasan ini merupakan wilayah dengan potensi angin yang bagus sebagai penggerak blade turbin angin. Termasuk peranan pemerintah yang mengesahkan akan dibangunnya turbin angin di pinggir pantai samas sejak tahun 2015 namun belum terealisasi. Sehingga saya ingin menganalisa potensi angin disana untuk mengetahui apakah daerah tersebut berpotensi membangkitkan energi listrik sebagai energi alternatif.

Tabel 2.2 Potensi Energi Angin dan Lokasi Potensi (LAPAN, 2006)

| Kelas          | Kec. Angin (m/s) | Daya Spesifik (W/m <sup>2</sup> ) | Kapasitas (kW) | Lokasi (Wilayah)                       |
|----------------|------------------|-----------------------------------|----------------|--|
| Skala Kecil    | 2,5-4,0          | <75                               | s/d 10         | Jawa,NTT,NTB,Maluku,Sulawesi           |
| Skala Menengah | 4,0-5,0          | 75-100                            | 10-100         | NTT,NTB,Sultra                         |
| Skala Besar    | >5,0             | >150                              | >100           | Sulsel,NTB,NTT dan Pantai Selatan Jawa |

#### 2.4.1 Distribusi Kecepatan Angin Relatif dan Komulatif

Suatu nilai frekuensi dari kecepatan angin rata-rata dapat dihitung dan dianalisis menggunakan fungsi distribusi relatif dan komulatif. Fungsi distribusi yang digunakan adalah fungsi distribusi probabilitas dan distribusi Rayleigh

- Distribusi probabilitas
  - a. Fungsi Distribusi Relatif

$$0 \leq p(x) \leq 1, \sum p(x) = 1$$

- b. Fungsi Distribusi Komulatif

$$F(x) = P(X \leq x) \sum p(\xi)$$

$$F(x) = 1 - \sum p(\xi)$$

- Distribusi Rayleigh
  - a. Fungsi Distribusi Relatif

$$p(U) = \frac{\pi}{2} \left( \frac{U}{U^2} \right) \exp \left[ -\frac{\pi}{4} \left( \frac{U}{U} \right)^4 \right]$$

b. Fungsi Distribusi Kumulatif

$$F(U) = 1 - \exp \left[ -\frac{\pi}{4} \left( \frac{U}{U} \right)^4 \right]$$

### 2.4.2 Kecepatan Angin Rata-rata

Kecepatan rata – rata angin dapat dihitung menggunakan rumus :

$$\bar{v} = \frac{\sum_{i=1}^n v_i \cdot t_i}{\sum_{i=1}^n t_i}$$

V = kecepatan angin rata-rata (m/s)

V<sub>i</sub> = kecepatan angin yang terukur (m/s)

t<sub>i</sub> = lama angin bertiup dengan kecepatan V<sub>i</sub>

n = banyak data pengukuran

Kecepatan angin rata-rata untuk tiap satu jam, misalnya kecepatan angin rata-rata untuk jam 00.00 sampai 01.00, kecepatan angin ini menggunakan variasi kecepatan harian. Dengan mengetahui variasi harian dari kecepatan angin, dapat diketahui saat-saat dimana angin bertiup kencang dalam satu hari, sehingga dapat digunakan untuk menentukan berapa jam dalam sehari semalam energi angin di daerah tersebut dapat menggunakan penggerak turbin angin. Kecepatan angin disuatu tempat dapat dipengaruhi oleh ketinggian terhadap tanah, makin dekat dengan permukaan tanah, kecepatan angin makin kecil (Cahya Adijana Nugraha, 2015).

### 2.4.3 Keluaran Daya Turbin Angin

Menurut Djodjodiharjo dan Jans Peter pada tahun 1983, daya suatu angin yang dihasilkan pada wilayah tertentu dipengaruhi oleh karakteristik angin di wilayah tersebut dan karakteristik dari turbin angin yang dipasang, selain itu karakteristik lanskap suatu wilayah juga dapat berpengaruh. Turbin angin yang dipasang harus memperhatikan karakteristik berikut ini:

- a) Kecepatan *cut in*
- b) Kecepatan nominal
- c) Kecepatan *shutdown*

Turbin angin mulai mampu menghasilkan daya listrik dengan kecepatan awal yang ditentukan merupakan kecepatan *cut in*. Turbin angin tidak akan menghasilkan daya listrik jika kecepatan angin tidak dapat mencapai ketentuan nilai kecepatan *cut in* yang dibutuhkan. Suatu nilai kecepatan yang dapat diterima oleh turbin angin telah melampaui batas dari nilai kecepatan *cut in* adalah kecepatan nominal. Kecepatan angin dimana kecepatan tersebut menjadi lebih besar dari kecepatan nominal yang dapat diterima pada rotor turbin angin merupakan kecepatan *shutdown*, sehingga mekanisme *shutdown* dilaksanakan guna mencegah terjadinya kerusakan pada turbin angin.

Menurut referensi dari *Wind Energy System*, parameter – parameter untuk menentukan karakteristik kecepatan turbin angin adalah sebagai berikut:

- a) Kecepatan *cut in* = 0,7 . Vrata-rata
- b) Kecepatan nominal = 1,5 . Vrata-rata hingga 2 . Vrata-rata
- c) Kecepatan *shutdown* = 3 . Vrata-rata dan lebih

#### **2.4.4 Daya Spesifik**

Menurut Douglas C. Giancoli tahun 1998 Energi angin merupakan energi dengan suatu yang bergerak dengan kecepatan dan memiliki massa. Angin yang bergerak memiliki massa dan energi yang sebanding, serta kecepatan. Persamaan berikut dapat digunakan sebagai penentuan nilai potensi energi angin, yaitu:

$$E = 0,5 . m . V^2$$

E = energi potensial angin (*Joule*)

$m$  = massa udara (kg)

$V$  = kecepatan angin (m/s)

Douglas C. Giancoli tahun 1998 juga menyatakan bahwa nilai massa yang terkandung didalam volum udara dapat ditentukan nilainya dengan persamaan sebagai berikut:

$$m = \rho \cdot v$$

$m$  = massa udara (kg)

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

$v$  = volum udara (m<sup>3</sup>)

Nilai volum udara dapat diukur dan ditentukan dengan perkalian antara panjang lintasan yang ditempuh oleh udara dan penampang luas turbin, dengan suatu persamaan berikut ini:

$$v = A \cdot x$$

$A$  = luas penampang bidang turbin (m<sup>2</sup>)

$x$  = lintasan yang ditempuh angin dalam satu waktu (m)

Dengan persamaan kedua dapat disubstitusikan menjadi :

$$m = \rho \cdot A \cdot x$$

Dengan persamaan pertama dapat disubstitusikan menjadi :

$$E = 0,5 \cdot \rho \cdot A \cdot x \cdot V^2$$

$$p = \frac{dE}{dt} = 0,5 \cdot \rho \cdot A \cdot x \cdot V^2 \frac{dx}{dt}$$

$$p = 0,5 \cdot \rho \cdot A \cdot x \cdot V^3$$

Nilai suatu daya spesifik dalam satuan luas bidang turbin dapat ditentukan oleh persamaan berikut ini:

$$P = \frac{p}{A} = 0,5 \cdot \rho \cdot V^3$$

Energi kinetik yang dihasilkan oleh suatu turbin disebabkan oleh angin yang bertiup pada menimpa bilah turbin dan menggerakkan bilah turbin memutar, sehingga terjadi per hambatan. Sehingga kecepatan angin sebelum dan sesudah melewati bilah pada turbin tidaklah memiliki nilai yang sama. Persamaan berikut mampu menentukan perubahan momentum yang terjadi pada udara:

$$\Delta M = m(V - V_2)$$

$$P = m(V_1 - V_2)V$$

$V$  = kecepatan angin masuk (m/s)

$$0,5 \cdot m \cdot (V_1^2 - V_2^2)$$

$$0,5 \cdot m \cdot (V_1^2 - V_2^2) = m(V_1 - V_2)$$

$$V = 0,5 \cdot (V_1 + V_2)$$

$$P = \rho \cdot A \cdot V \cdot (V_1 - V_2)V$$

$$P = \rho \cdot A \left( \frac{V_1 + V_2}{2} \right)^2 (V_1 - V_2)$$

$$P = \rho \cdot A \cdot V_1^3 \cdot [(1 + \alpha)(1 - \alpha^2)]/4$$

$$\alpha = \frac{V_2}{V_1}$$

$$\frac{dP}{d\alpha} = 1 + \alpha - \alpha^2 - \alpha^3 = 0$$

$$\alpha = 1/3$$

Energi maksimum yang dapat diambil oleh turbin adalah :

$$P_{\max} = \frac{8}{27} \cdot \rho \cdot A \cdot V_I^3$$

Daya maksimal persatuan luas :

$$P_{\max} = \frac{8}{27} \cdot \rho \cdot V_I^3$$

Daya per satuan luas yang terdapat di angin :

$$P = 0,5 \cdot \rho \cdot V_I^3$$

Efisiensi maksimum turbin angin :

$$\eta = C_p = \frac{P_{\max}}{P} = 0,59$$

Daya spesifik yang dapat diambil oleh turbin angin :

$$P = 0,59 \cdot C_p \cdot \rho \cdot V_I^3$$

## **2.5 Prinsip Kerja LEAP dalam Pemodelan Sistem Energi**

Prinsip kerja LEAP pada bab ini merujuk pada LEAP Indonesia Guide dan Kajian Pengembangan LEAP dalam Mendukung Perencanaan Energi.

### **2.5.1 Pengenalan LEAP**

*The Long-range Energy Alternatives Planning* atau kemudian disingkat menjadi LEAP adalah sebuah perangkat lunak yang dapat digunakan sebagai alat bantu dalam perencanaan/pemodelan energi-lingkungan. LEAP bekerja berdasarkan asumsi skenario yang pengguna inginkan, skenario tersebut didasarkan pada perhitungan dari proses pengkonversian bahan bakar menjadi energi hingga

proses energi tersebut dikonsumsi oleh masyarakat. LEAP merupakan model yang mempertimbangkan penggunaan akhir energi (*end-use*), sehingga memiliki kemampuan untuk memasukkan berbagai macam teknologi dalam penggunaan energi. Keunggulan LEAP dibanding perangkat lunak perencanaan/pemodelan energi-lingkungan yang lain adalah tersedianya sistem antarmuka (*interface*) yang menarik dan memberikan kemudahan dalam penggunaannya serta tersedia secara cuma-cuma (*freeware*) bagi masyarakat negara berkembang.

### **2.5.2 Struktur LEAP**

Pendekatan yang digunakan oleh LEAP adalah struktur pemodelan dengan pendekatan *accounting framework*. Struktur ini dapat digunakan untuk membuat model sistem energi dengan variabel-variabel tentang diskripsi fisik sistem energi, biaya, dan dampak lingkungan. Lebih dari sekedar mensimulasikan kebijakan di sisi permintaan dan penyediaan energi, LEAP dapat digunakan untuk menganalisis dampak implementasi kebijakan-kebijakan tentang energi. Dengan demikian, *accounting framework* digunakan sebagai alat untuk menganalisis implikasi dari penerapan beberapa skenario permintaan atau penyediaan energi untuk mencapai target-target yang telah ditentukan. Selain itu, LEAP dengan pendekatan *accounting framework* juga dapat digunakan untuk melakukan eksplorasi sumber energi primer, dampak lingkungan, dan biaya sosial yang ditimbulkan dari beberapa skenario alternatif.

*Accounting framework* memiliki beberapa kelebihan sebagai berikut:

- a. Sederhana, transparan dan fleksibel, dan memerlukan data dasar yang sangat sederhana,
- b. Simulasi tidak dilakukan dengan asumsi kompetisi yang ideal,
- c. Dapat digunakan untuk menganalisis pemilihan teknologi atau biaya dalam pengembangan sistem energi, dan
- d. Sangat berguna dalam aplikasi *capacity building*.

Di lain pihak, *Accounting framework* memiliki beberapa kekurangan, antara lain:

- a. Tidak secara otomatis dapat mengidentifikasi sistem least-cost, yaitu tidak sesuai untuk sistem yang sangat kompleks dimana perhitungan least-cost dibutuhkan.
- b. Tidak dapat menghasilkan perhitungan biaya yang konsisten, yaitu proyeksi permintaan energi dapat tidak konsisten dengan proyeksi konfigurasi penyediaan energi.

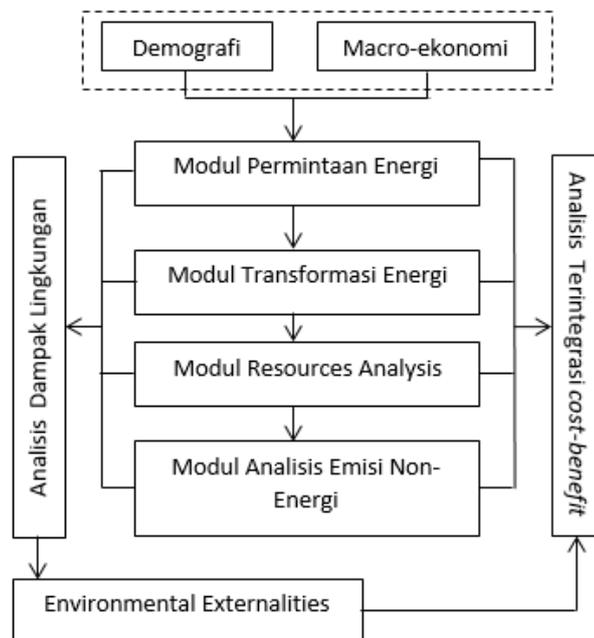
Dalam perkembangannya, LEAP sudah dapat dianggap sebagai model hybrid yang menggabungkan antara optimasi, simulasi, dan accounting. Untuk dapat berfungsi sebagai model hybrid, LEAP beroperasi pada dua tahapan, yaitu relasi dasar accounting sebagai fasilitas built-in dan pengguna LEAP dapat menambahkan model simulasi dari hasil yang diperoleh LEAP. Fasilitas perhitungan optimasi saat ini masih dikembangkan di dalam LEAP. Perhitungan optimasi sudah dapat dilakukan untuk menentukan sistem *least-cost*. LEAP tidak secara langsung digunakan untuk menentukan sistem least-cost, tetapi keluaran dari LEAP yang berupa teks digunakan sebagai masukan modul optimasi dari *Open Source energi Modeling System* (OSeMOSYS). Hasil perhitungan optimasi OSeMOSYS dimasukkan kembali ke LEAP untuk ditampilkan sebagai hasil dari sistem least-cost.

### **2.5.3 Kapabilitas Pemodelan dengan LEAP**

LEAP terdiri dari 5 buah modul utama, yaitu modul variabel penggerak, modul analisis permintaan energi, modul transformasi energi, modul analisis sumber daya, dan modul teknologi dan dampak lingkungan. Diagram alir perhitungan yang dilakukan oleh LEAP ditunjukkan dalam Gambar 2.5 Modul variabel penggerak terdiri dari variabel demografi dan makro-ekonomi. Variabel penggerak ini yang akan menentukan permintaan energi di dalam sistem energi yang dimodelkan dengan LEAP. Di dalam modul analisis permintaan energi, besar permintaan energi ditentukan oleh aktivitas penggunaan energi. Aktivitas ini direpresentasikan oleh variabel yang didefinisikan di dalam variabel penggerak. Modul transformasi energi digunakan untuk mensimulasikan proses penyediaan energi. Modul transformasi energi ini dapat terdiri dari proses yang menggabungkan

antara sumber energi dengan pengguna energi dan proses konversi energi primer menjadi energi sekunder atau final. Modul analisis sumber daya digunakan untuk mensimulasikan ketersediaan atau cadangan energi primer. Modul ini juga dapat digunakan untuk mensimulasikan aktivitas ekspor dan impor dari suatu wilayah ke wilayah lainnya. Analisis ekspor dan impor sumber daya energi primer dapat dilakukan dengan menggunakan fasilitas region yang ada di dalam LEAP.

Modul analisis dampak lingkungan terdiri dari modul teknologi di dalam modul permintaan energi dan modul transformasi energi serta modul analisis dampak lingkungan dari sektor non-energi. Dari sisi permintaan energi, setiap jenis teknologi pengguna energi dapat disimulasikan setiap jenis emisi yang dihasilkan. Demikian juga di sisi penyediaan energi, emisi yang dihasilkan dapat disimulasikan melalui proses-proses penyediaan energi. Setiap proses penyediaan energi yang berbeda akan menghasilkan emisi-emisi yang berbeda pula. Dengan demikian, analisis dampak lingkungan dapat dilakukan secara terintegrasi baik dari sisi permintaan energi maupun dari sisi penyediaan energi.



Gambar 2.1 Diagram Alir Perhitungan di Dalam LEAP

Sumber : LEAP Indonesia guide, Oetomo Tri Winarno 1997

Analisis *cost-benefit* dilakukan dengan memanfaatkan fasilitas *modul cost* di dalam LEAP. Analisis ini dapat dilakukan baik dari sisi permintaan energi maupun sisi penyediaan energi. Dari sisi permintaan energi, analisis ini dapat dilakukan untuk setiap jenis teknologi pengguna energi untuk jenis-jenis biaya kapital, operasi dan pemeliharaan, dan biaya *replacement*. Di sisi penyediaan energi, analisis yang dapat dilakukan adalah analisis biaya yang terdiri dari biaya kapital, biaya operasi dan pemeliharaan, biaya bahan bakar, dan biaya modul penyediaan energi yang tidak dipengaruhi oleh yang bersifat variabel. Dari sisi penyediaan energi, LEAP menyediakan fasilitas perhitungan biaya yang disebabkan oleh emisi-emisi yang dihasilkan. Analisis ini dilakukan melalui modul *environment externality*. Melalui modul ini, setiap biaya yang dikeluarkan untuk setiap jenis emisi yang dihasilkan dapat disimulasikan sebagai bagian dari analisis *cost-benefit* yang terintegrasi.

Secara ringkas, kapabilitas pemodelan sistem energi dengan menggunakan LEAP adalah:

1. Permintaan Energi:
  - A. Pemodelan permintaan energi secara terstruktur,
  - B. Pemodelan permintaan energi berdasarkan perubahan penggunaan jenis energi,
2. Konversi Energi:
  - A. Simulasi jenis-jenis konversi energi (pembangkit listrik, transmisi dan distribusi energi listrik, kilang minyak, proses pembuatan arang kayu, penambangan batubara, ekstraksi minyak bumi, produksi ethanol, dan lain sebagainya),
  - B. Sistem dispatch pembangkit listrik berdasarkan LDC,
  - C. Pemodelan ekspansi kapasitas dengan metode exogenous dan endogenous.
3. Sumber Daya Energi:
  - A. Kebutuhan, produksi, dan ekspor dan impor energi primer,

- B. perhitungan berdasarkan luar-wilayah untuk sumber energi biomasa dan energi terbarukan,
4. Biaya :
- A. Semua biaya yang diperlukan di dalam sistem energi yang terdiri dari biaya kapital, operasi dan pemeliharaan, bahan bakar, efisiensi energi, dan dampak lingkungan, dan
5. Dampak Lingkungan:
- A. Semua emisi dan dampak langsung dari sistem energi,
  - B. Sumber-sumber sektor non-energi.

#### **2.5.4 Metode-Metode dalam LEAP**

LEAP merupakan perangkat lunak yang digunakan untuk mensimulasikan sistem energi berdasarkan skenario-skenario yang didefinisikan oleh pengguna LEAP. Skenario ini merupakan alur yang konsisten dengan tujuan untuk menggambarkan bagaimana suatu sistem energi berkembang dalam kurun waktu tertentu. LEAP dirancang untuk dapat mensimulasikan beberapa skenario baik secara terpisah maupun terintegrasi. Suatu skenario yang disusun dapat mengacu pada skenario lainnya. Dan setiap skenario akan mengacu pada kondisi yang dideskripsikan pada tahun dasar sebagai current account. Dengan demikian, perhitungan yang dilakukan di dalam LEAP tidak bersifat prediktif atau proyektif.

Analisis permintaan energi di dalam LEAP bertujuan untuk menentukan permintaan energi dan biaya-biaya yang berhubungan langsung dengan konsumsi energi di dalam suatu model sistem energi. Permintaan energi dimodelkan dengan struktur hirarki yang fleksibel. Permintaan energi dapat dikategorikan berdasarkan sector pengguna energi, sub-sektor pengguna energi, maupun jenis teknologi pengguna energi. Analisis permintaan energi dapat dilakukan dengan beberapa metode, yaitu analisis end-use energi, econometric forecast, dan model stock-turnover.

Di sisi penyediaan energi listrik, simulasi yang dilakukan oleh LEAP didasarkan pada 2 hal, yaitu ekspansi kapasitas pembangkit listrik dan dispatch rule

pembangkit listrik. Ekspansi kapasitas pembangkit listrik bertujuan untuk menentukan tambahan kapasitas pembangkit dan jenisnya serta waktu penambahan tersebut untuk memenuhi permintaan energi listrik. Sedangkan *dispatch* bertujuan untuk menentukan bagaimana pembangkit listrik beroperasi setelah dibangun. Penentuan ekspansi kapasitas pembangkit listrik di dalam LEAP dapat dilakukan dengan 2 cara, yaitu secara *exogenous* dan secara *endogenous*. Ekspansi kapasitas pembangkit listrik secara *exogenous* dilakukan secara manual dengan memasukkan nilai kapasitas dan waktu penambahan kapasitas maupun jadwal *retirement* pembangkit listrik. Sedangkan ekspansi kapasitas pembangkit listrik secara *endogenous* dilakukan secara otomatis oleh LEAP. LEAP akan menentukan besar kapasitas dan waktu penambahan kapasitas tersebut sesuai dengan jenis pembangkit listrik yang telah ditentukan sebelumnya. Dalam menentukan kapasitas secara *endogenous*, kapasitas yang dihasilkan oleh LEAP bertujuan untuk mempertahankan *reserve margin* yang telah ditentukan.

Terdapat dua metode *dispatch* sistem pembangkit listrik di dalam LEAP, yaitu berdasarkan pembangkitan energi listrik secara historis dan berdasarkan *dispatch rule* sistem pembangkit listrik. Metode *dispatch rule* yang ada di dalam LEAP mulai dari yang paling sederhana dengan menggunakan persentase dari pembangkitan energi listrik sampai metode merit order dan running cost. LEAP juga dapat mensimulasikan berbagai jenis sistem pembangkit dengan metode *dispatch* yang berbeda-beda. Sebagai contoh, jenis pembangkit listrik dengan energi primer dari energi terbarukan menggunakan *dispatch* berdasarkan presentase pembangkitan energi listrik sedangkan jenis pembangkit listrik lainnya menggunakan metode *dispatch* berdasarkan *merit order*.

Untuk perhitungan biaya sistem pembangkit listrik, LEAP melakukan perhitungan *cost-benefit* dari sudut pandang *social-cost* dengan metode menghitung semua biaya yang berhubungan dengan sistem energi yang dimodelkan dan kemudian membandingkan hasil perhitungan biaya dari beberapa skenario yang dirancang. LEAP melakukan perhitungan elemen-elemen biaya yang terdiri dari:

- a. Biaya dari sisi permintaan energi yang dapat dinyatakan dalam biaya total, biaya per-aktivitas, atau biaya efisiensi energi relative terhadap suatu skenario,
- b. Biaya kapital transformasi energi,
- c. Biaya tetap dan variabel operasi dan pemeliharaan,
- d. Biaya sumber daya energi primer (biaya bahan bakar),
- e. Biaya sumber daya energi primer yang diimpor,
- f. Keuntungan biaya dari aktivitas ekspor sumber daya energi primer,
- g. Biaya externality polusi dari sektor transformasi energi, dan
- h. Biaya-biaya lainnya yang dapat didefinisikan seperti biaya program efisiensi energi.

Perhitungan biaya kapital di dalam LEAP merupakan biaya kapital selama periode lifetime dari suatu sistem pembangkit listrik. Metode yang digunakan dalam perhitungan biaya ini menggunakan standard mortgage seperti pada persamaan 2.1, 2.2 dan 2.3. Dalam persamaan 2.2 dan 2.3,  $i$  merupakan interest rate,  $n$  lifetime sistem pembangkit listrik, dan CRF adalah capital recovery factor.

$$\text{Annualized cost} = \text{Total Cost} \times \text{CRF} \quad (2.1)$$

$$\text{CRF} = \frac{i \cdot k}{k-1} \quad (2.2)$$

$$k = (1 + i)^n \quad (2.3)$$

### 2.5.5 Perhitungan Permintaan Energi

Di dalam LEAP, perhitungan permintaan energi dilakukan menggunakan dua metode, yaitu metode energi final dan energi useful. Di dalam analisis permintaan energi final, permintaan energi dihitung sebagai perkalian antara level aktivitas dan intensitas energi. Level aktivitas merupakan ukuran aktivitas sosial dan ekonomi yang mempengaruhi permintaan energi. Sedangkan intensitas energi adalah rata-rata konsumsi energi per teknologi pengguna energi atau per satuan

level aktivitas. Selanjutnya, permintaan energi dihitung untuk tahun dasar dan periode simulasi LEAP dengan menggunakan persamaan 2.4:

$$D_{b,s,t} = TA_{b,s,t} \times EL_{b,s,t} \quad (2.4)$$

Di mana :

TA : Level aktifitas,

El : intensitas energi,

B : cabang yang didefinisikan didalam LEAP,

s : skenario,

t : tahun dari 0 [tahun dasar] sampai dengan akhir tahun simulasi

### 2.5.6 Perhitungan Kapasitas Pembangkit Listrik

Kapasitas pembangkit listrik dapat dihitung secara *endogenous* untuk mempertahankan nilai *planning reserve margin* (PRM) yang telah ditentukan. Perhitungan kapasitas pembangkit diawali dengan menghitung nilai kapasitas yang ada dengan persamaan 2.5.

$$C_{BA} = (C_{EX} + C_{EN}) \times C_{value} \quad (2.5)$$

Di mana :

$C_{BA}$  : kapasitas awal (MW),

$C_{EX}$  : kapasitas exogenous (MW),

$C_{EN}$  : kapasitas endogenous yang telah ditambahkan (MW),

$C_{value}$  : persentase nilai kapasitas aktual (MW).

Sedangkan kapasitas yang dibutuhkan untuk memenuhi beban puncak dihitung dengan menggunakan persamaan 2.6:

$$C_{peak} = \frac{D}{LF \times 8760 [\text{jam} / \text{tahun}]} \quad (2.6)$$

Di mana:

$C_{peak}$  : kapasitas untuk memenuhi beban puncak (MW),

D : permintaan energi listrik (MWh),

LF : faktor beban sistem.

PRM sebelum ada penambahan kapasitas secara *endogenous* dihitung berdasarkan persamaan 2.7,

$$PRM_{BA} = (C_{BA} - C_{peak}) / C_{peak} \quad (2.7)$$

Dimana  $PRM_{BA}$  adalah PRM sebelum ada penambahan kapasitas. Selanjutnya, kapasitas pembangkit listrik yang diperlukan secara *endogenous* ditentukan dengan persamaan 2.8,

$$C_{ENA} = (PRM - PRM_{BA}) \times C_{peak} \quad (2.8)$$

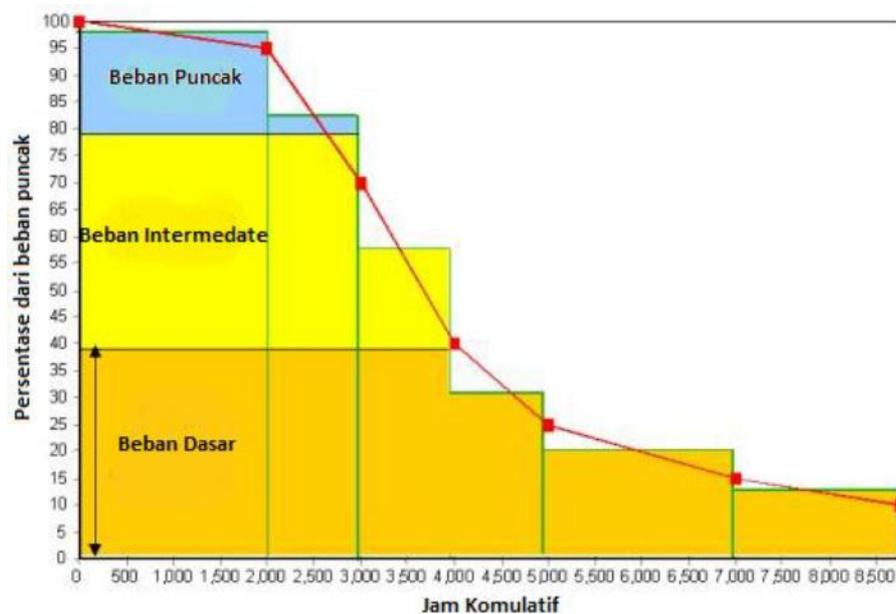
Dimana  $C_{ENA}$  adalah kapasitas pembangkit listrik yang harus ditambahkan untuk mempertahankan PRM pada nilai yang sudah ditentukan. Pada akhirnya, LEAP menghitung kapasitas pembangkit listrik yang diperlukan untuk setiap proses pembangkit listrik.

### 2.5.7 Proses Dispatch Pembangkit Listrik

Dalam perhitungan optimasi, pembangkit listrik di dispatch berdasarkan *runningcost*. Dengan metode dispatch ini, modul pembangkit listrik harus mengikutsertakan *load duration curve* (LDC). Selanjutnya, LEAP akan mensimulasikan dispatch setiap jenis proses pembangkit listrik baik untuk memenuhi kebutuhan energi listrik yang ditentukan oleh LDC maupun kebutuhan energi listrik secara keseluruhan. *Running cost* ditentukan dengan persamaan 2.9.

$$RunningCost_i = VariableOMCost_i + \frac{FuelCost_i}{Efficiency_i} \quad (2.9)$$

Untuk mensimulasikan proses dispatch pembangkit listrik, LEAP pertama-tama mengurutkan proses pembangkit listrik berdasarkan merit order yang telah ditentukan. Informasi dari proses pengurutan ini digunakan untuk menentukan kapasitas yang tersedia untuk setiap kelompok merit order. Dengan demikian setiap kelompok dengan merit order yang sama akan didispatch secara bersamaan. Selanjutnya, LEAP akan melakukan pendekatan diskrit terhadap LDC yang telah ditentukan dan dibagi kedalam interval time slice seperti pada gambar 2.5.7.1



Gambar 2.2 Komulatif LDC

Sumber : LEAP Indonesiaguide, Oetomo Tri Winarno 1997

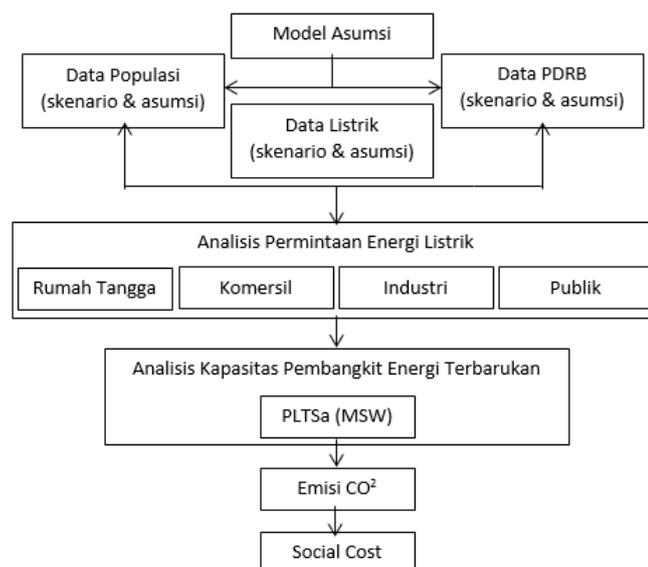
Di dalam gambar 2.5.7.1, tinggi setiap interval beban puncak sistem yang diperlukan dikalikan dengan rata-rata persentase beban puncak dari dua titik yang berdekatan pada kurva LDC yang telah ditentukan. Sedangkan lebar setiap interval adalah perbedaan jumlah jam untuk dua buah titik yang berdekatan. Kapasitas untuk memenuhi kebutuhan beban puncak sistem secara keseluruhan ditentukan dengan menggunakan persamaan 2.6.

Selanjutnya, setiap proses pembangkit listrik didispatch berdasarkan interval vertikal untuk memenuhi kebutuhan energi listrik di bawah kurva LDC. Pembangkit listrik untuk memenuhi beban dasar didispatch pertama kali, diikuti

dengan pembangkit berikutnya yang digunakan untuk memenuhi beban intermedate dan beban puncak. Untuk merepresentasikan ketersediaan teknis rata-rata setiap pembangkit listrik, ketinggian maksimum setiap interval adalah kapasitas yang tersedia (yaitu penjumlahan kapasitas dikalikan dengan ketersediaan maksimum) untuk setiap kelompok proses pembangkit listrik. Setiap kelompok pembangkit didispatch sampai daerah di bawah kurva LDC tersisi penuh. Pada saat kapasitas yang tersedia melampaui jumlah yang diperlukan, kapasitas aktual untuk setiap proses yang didispatch dikurangi sedemikian hingga setiap proses didispatch secara proporsional terhadap kapasitas yang tersedia.

### 2.5.8 Diagram Alir Pemodelan LEAP

Model yang digunakan dalam penyusunan tugas akhir adalah Long-range Energi Alternatives Planning system (LEAP) dengan diagram alir sebagaimana pada gambar 2.3. LEAP adalah alat pemodelan dengan skenario terpadu berbasis lingkungan dan energi. LEAP menggabungkan analisis terhadap konsumsi energi, transformasi dan produksi dalam suatu sistem energi dengan menggunakan indikator demografi, pembangunan ekonomi, teknologi, harga, kebijakan dan regulasi.



Gambar 2.3 Diagram Alir Pemodelan LEAP

### **2.5.9 Simulasi LEAP**

Untuk melakukan simulasi menggunakan LEAP, perlu melihat kembali data yang dimiliki. Hal ini dimungkinkan karena algoritma LEAP yang memiliki fleksibilitas tinggi yang memberi keluasaan bagi pengguna dalam melakukan simulasi. LEAP dapat diatur sesuai data yang dimiliki. Apabila data yang dimiliki sangat lengkap seperti emisi buang, teknologi pembangkitan, hingga peralatan elektronik dan penerangan dalam bangunan mampu diakomodasi oleh LEAP. Demikian juga apabila data yang dimiliki sangat terbatas seperti simulasi pada penelitian ini dimana hanya memiliki data yang berkaitan dengan konsumsi energi listrik pun dapat digunakan.

Langkah pertama dalam simulasi adalah mengatur dan menentukan parameter dasar simulasi. Di dalam parameter dasar, lingkup kerja ditentukan yaitu hanya pada analisis permintaan (demand). Kemudian menentukan tahun dasar simulasi. Dalam penelitian ini yang digunakan sebagai tahun dasar adalah tahun 2014, setelah itu menentukan batas akhir periode simulasi yaitu tahun 2024. Yang terakhir adalah menentukan unit satuan yang digunakan seperti unit energi, unit panjang, massa dan mata uang.

Proses analisis data dengan menggunakan software LEAP disediakan empat modul utama dan tiga modul tambahan. Modul utama adalah modul-modul standar yang umum digunakan dalam pemodelan energi, yaitu :

#### **A. Modul Key Assumption**

Modul Key Assumption adalah untuk menampung parameter-parameter umum yang dapat digunakan pada Modul Demand maupun Modul Transformation. Parameter umum ini misalnya adalah jumlah penduduk, PDB (Produk Domestik Bruto) dan sebagainya. Modul Key Assumption ini sifatnya komplemen terhadap modul lainnya.

## B. Modul Demand

Modul Demand adalah menghitung permintaan energi-energi. Pembagian sektor pemakai energi sepenuhnya dapat dilakukan sesuai kebutuhan pemodel, permintaan energi didefinisikan sebagai perkalian antara aktifitas pemakaian energi (misalnya jumlah penduduk, jumlah kendaraan, volume nilai tambah, dan sebagainya) dan intensitas pemakaian energi yang bersangkutan.

## C. Modul Transformation

Modul Transformation adalah menghitung pemasokan energi, pemasokan energi dapat terdiri atas produksi energi primer (gas bumi, minyak bumi, batu bara dan sebagainya) dan energi sekunder (listrik, bahan bakar minyak, LPG, briket, batubara, arang dan sebagainya). Dalam modul Transformation susunan cabang sudah ditentukan strukturnya, dimana kegiatan transformasi energi terdiri dari proses dan output.

## D. Modul Resources

Modul Resources terdiri atas primer dan sekunder secara default. Cabang-cabang tersebut ada dengan sendirinya sesuai dengan jenis energi yang dimodelkan pada modul Transformation. Namun ada beberapa parameter yang perlu diisikan, seperti jumlah cadangan (batubara, gas bumi, minyak bumi dan sebagainya) dan potensi energi (tenaga air, panas bumi, tenaga angin, biomasa, dan sebagainya).

Dan modul tambahan adalah pelengkap terhadap modul utama jika diperlukan yaitu :

### A. Modul *Statistical Differences*

Modul *Statistical Differences* adalah menuliskan asumsi-asumsi selisih data antara data demand dan supply karena perbedaan dalam pendekatan perhitungan demand dan perhitungan supply energi. Pada modul *Statistical Differences* cabang-cabang akan muncul dengan sendirinya, sesuai dengan jenis energi yang dimodelkan pada modul Demand. Umumnya *Statistical Differences* pada pemodelan nol.

## B. Modul Stock Changes

Modul *Stock Changes* dapat digunakan untuk menuliskan asumsi cadangan energi atau perubahan stok di awal tahun tertentu dengan awal tahun selanjutnya. Cabang-cabang pada *modul Stock Changes* muncul dengan sendirinya sesuai dengan jenis energi yang telah dimodulkan pada modul Transformation. Secara umum perubahan pemodelan dianggap nol.

## C. Modul *Non-Energy Sector Effect*

Modul *Non-Energy Sector Effect* dapat digunakan untuk menempatkan variabel-variabel dampak negatif pada kegiatan sektor energi, seperti penurunan kesehatan, tingkat kecelakaan, terganggunya ekosistem dan sebagainya. Susunan modul diatas sudah baku. Simulasi pada software LEAP berdasarkan susunan dari atas ke bawah. Simulasi pada software LEAP bersifat *straight forward* atau tidak ada *feedback* antara *Supply Energy* dengan *Demand*. Permintaan energi selalu dianggap terpenuhi oleh pasokan energi yang berasal dari transformasi energi domestik maupun impor energi.

## 2.6 Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB)

### 2.6.1 Turbin Angin di Indonesia

Menurut Akbar Rachman, 2012 bahwa pada saat ini permintaan energi bersih pada sistem energi terbarukan semakin meningkat. Ancaman bagi kehidupan mendatang jika penggunaan pada bahan bakar dieksploitasi habis berdampak pada kondisi lingkungan yang mengalami pemanasan global. Hal sama terjadi di Indonesia. Teknologi yang belum berkembang cukup baik untuk mengolah energi terbarukan menjadi masalah di Indonesia, padahal pada sisi lain energi terbarukan di Indonesia berjumlah banyak.

Dalam beberapa tahun ini banyak insinyur yang mengatasi situasi tersebut. Di Indonesia energi terbarukan semakin dikembangkan, seperti biodiesel, energi solar, energi panas bumi, energi air, bahkan energi biomassa.

Energi angin sendiri berkembang secara pesat dalam industry energi terbarukan. Angin dengan kecepatan 3 m/s, atau 12 km/jam, atau 6.7 knot/jam cukup untuk turbin angin berskala kecil.

Sementara itu sebagai salah satu kebijakan diverifikasi Ditjen Energi Baru Terbarukan dan Konversi Energi (DJEBTKE) Kementrian Sumber Daya Mineral (ESDM) bersama UPC Asia WindLimited telah menandatangani kontrak kesepahaman (MoU) dalam sebuah proyek berskala besar yang rencananya akan dibangun dipesisir Pantai Samas, Kecamatan Sanden, Kabupaten Bantul, Daerah Istimewa Yogyakarta. PLTB ini ditargetkan memiliki kapasitas 50MW yang meliputi pembangunan 33 turbin dengan kapasitas setiap turbin 1.5MW (Nanang Wijayanto, 2012).

### **2.6.2 Keluaran Daya Turbin Angin**

Menurut Djodjodiharjo dan Jans Peter pada tahun 1983, daya suatu angin yang dihasilkan pada wilayah tertentu dipengaruhi oleh karakteristik angin di wilayah tersebut dan karakteristik dari turbin angin yang dipasang, selain itu karakteristik lanskap suatu wilayah juga dapat berpengaruh. Turbin angin yang dipasang harus memperhatikan karakteristik berikut ini:

- a. Kecepatan *cut in*
- b. Kecepatan nominal
- c. Kecepatan *shutdown*

Turbin angin mulai mampu menghasilkan daya listrik dengan kecepatan awal yang ditentukan merupakan kecepatan *cut in*. Turbin angin tidak akan menghasilkan daya listrik jika kecepatan angin tidak dapat mencapai ketentuan nilai kecepatan *cut in* yang dibutuhkan. Suatu nilai kecepatan yang dapat diterima oleh turbin angin telah melampaui batas dari nilai kecepatan *cut in* adalah kecepatan nominal. Kecepatan angin dimana kecepatan tersebut menjadi lebih besar dari kecepatan nominal yang dapat diterima pada rotor turbin angin merupakan kecepatan *shutdown*, sehingga mekanisme *shutdown* dilaksanakan guna mencegah terjadinya kerusakan pada turbin angin.

Menurut referensi dari *Wind Energy System*, parameter – parameter untuk menentukan karakteristik kecepatan turbin angin adalah sebagai berikut:

- a. Kecepatan *cut in* =  $0,7 \cdot V_{rata-rata}$
- b. Kecepatan nominal =  $1,5 \cdot V_{rata-rata}$  hingga  $2 \cdot V_{rata-rata}$
- c. Kecepatan *shutdown* =  $3 \cdot V_{rata-rata}$  dan lebih

## 2.7 Turbin Angin

### 2.7.1 Turbin Angin

James Manwell menyatakan pada tahun 2009 bahwa pada awalnya turbin angin merupakan alat bantu yang digunakan dalam bidang pertanian. Teknologi tenaga angin, sumber daya energi yang paling cepat berkembang di dunia, sepiantas terlihat sederhana. Selain untuk pembangkitan listrik, turbin angin sangat cocok untuk mendukung kegiatan pertanian dan perikanan, seperti untuk keperluan irigasi, aerasi tambak ikan, dan sebagainya. Tenaga ditransfer melalui baling-baling kadang dioperasikan pada variabel kecepatan, lalu ke generator dan menghasilkan energi listrik untuk digunakan (Syamsul Bahari, 2015).

Menurut James Manwell tahun 2009 pengetahuan tentang energi angin telah lama dipelajari dan digunakan, sehingga teknologi energi angin bukanlah teknologi yang baru ditemukan. Pada 200 tahun lalu sebelum masehi bangsa Persia telah menggunakan teknologi kincir angin. Kincir angin sumbu vertikal merupakan kincir angin pertama yang tercatat dalam sejarah, pada abad ke – 7 kincir angin ini dibangun pada perbatasan antara Iran-Afganistan-Pakistan. Bangsa Persia dulunya menggunakan teknologi energi angin untuk menggiling/menumbuk gandum dan biji-bijian lainnya, dan juga mereka memanfaatkannya untuk memompa air. Perkembangan yang paling maju terjadi di Belanda dimana mulai banyak dikembangkannya bentuk dari kincir angin. Pada tahun 1920 di Amerika, teknologi tersebut mulai digunakan untuk membangkitkan listrik, yang dimana kincir angin untuk membangkitkan listrik dikenal dengan nama turbin angin. Kini turbin angin

mulai banyak digunakan untuk mengakomodasikan kebutuhan listrik, dengan menggunakan konversi energi dan menggunakan sumber daya alam yang dapat diperbarui yaitu angin. Walaupun untuk saat ini pembangunan turbin angin belum mampu untuk menyaingi pembangkit energi konvensional (PLLTU, PLTD, dll). Turbin angin dikembangkan oleh ilmuwan karena dalam waktu dekat akan terjadi kekurangan sumber daya alam yang tidak dapat diperbarui seperti batu bara dan minyak bumi sebagai bahan utama pembangkit listrik saat ini. Umumnya daya efektif yang dapat diterima oleh turbin angin hanya sebesar 20%-30%. Oleh karenanya, pengembangan efisiensi turbin angin dengan menyempurnakan beberapa aspek di bawah ini (Ary Triwibowo, 2013) :

a. Baling – baling

Baling – baling berukuran panjang bias menangkap atau mengumpulkan lebih banyak energi dibandingkan dengan yang berukuran pendek. Kelemahannya adalah baling-baling panjang cenderung lebih berat dan lebih mudah rusak. Fokus penelitian adalah untuk tetap mempertahankan panjang, kekuatan, ketebalan, namun dengan berat yang ringan.

b. Kontrol

Jika angin semakin kencang, semakin besar pula energi yang dihasilkan. Memang benar tapi tidak semudah itu. Karena baling-baling direncanakan akan berbobot ringan, angin kencang dapat dengan mudah menghancurkannya. Jika tidak ada mekanisme rem atau penurunan kecepatan baling-baling, angin dapat merusak konstruksi baling-baling, bahkan menerbangkannya dengan mudah. Rem merupakan faktor penting dalam pengendalian kecepatan putaran baling-baling itu yang masih terus dipelajari.

### **2.7.2 Mekanisme Turbin Angin**

Sebuah pembangkit listrik tenaga angin dapat dibuat dengan menggabungkan beberapa turbin angina sehingga menghasilkan listrik ke

unit penyalur listrik. Listrik dialirkan melalui kabel transmisi dan didistribusikan ke rumah-rumah, kantor, sekolah dan sebagainya. Turbin angin dapat memiliki tiga buah bilah turbin. Jenis lain yang umum adalah jenis turbin dua bilah. Turbin angin dulunya digunakan untuk membantu usaha pertanian dan perikanan, digunakan para petani untuk irigasi, penggilingan gandum, aerasi tambak ikan dan sebagainya. Kini turbin angin digunakan untuk membangkitkan listrik dengan mengonversikan energi mekanis angin menjadi energi putar pada turbin, lalu putaran turbin digunakan untuk memutar generator, kemudian dapat menghasilkan listrik.

Terdapat jenis-jenis turbin angin, turbin angin yang digunakan untuk pemakaian umum biasanya berukuran 50-750kW. Turbin angin skala kecil biasanya berkapasitas 50kW yang digunakan untuk perumahan atau pompa air. Sedangkan kapasitas skala industry adalah antara 1-4mW. Berikut adalah jenis-jenis dari turbin angin:

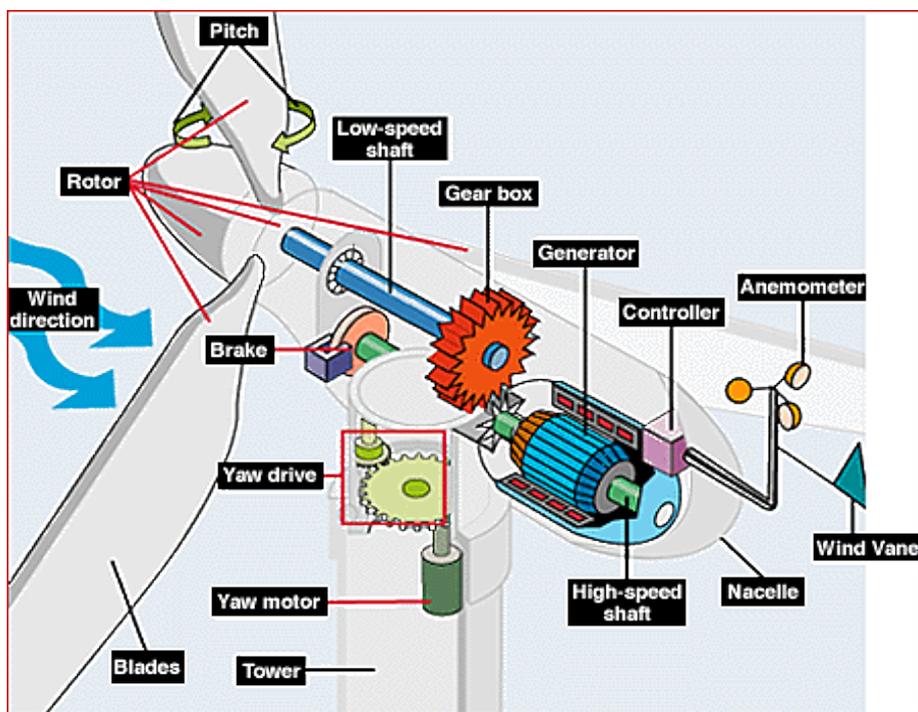
- a. Turbin angin propeler adalah jenis turbin angin dengan poros horizontal seperti baling-baling pesawat terbang pada umumnya. Turbin angin ini harus diarahkan sesuai arah angin yang paling tinggi kecepatannya.
- b. Turbin angin darrieus merupakan suatu sistem konversi energi angin yang digolongkan dalam jenis turbin angin berporos tegak. Keuntungan dari turbin angin jenis darrieus adalah tidak memerlukannya mekanisme orientasi pada arah angin seperti turbin angin propeller.

### **2.7.3 Desain Turbin Angin**

Turbin angin didesain untuk menangkap energi kinetik angin dan mengeksploitasi energi angin yang mengalir pada bilah turbin tersebut. Untuk membuat turbin angin digunakan yang aerodinamis dengan menentukan tinggi menara atau tower yang optimal, menentukan sistem kontrol, menentukan berapa jumlah dan bentuk bilah dari turbin, serta menentukan bentuk atau desain secara keseluruhan.

Energi angin dapat dikonversi oleh turbin angin menjadi energi listrik. Tiga komponen utama pada sebuah turbin angin sumbu horizontal sebagai berikut:

- Komponen rotor
- Komponen generator
- Komponen structural



Gambar 2.4 Desain Turbin Angin

(sumber: [www.berpendidikan.com](http://www.berpendidikan.com))

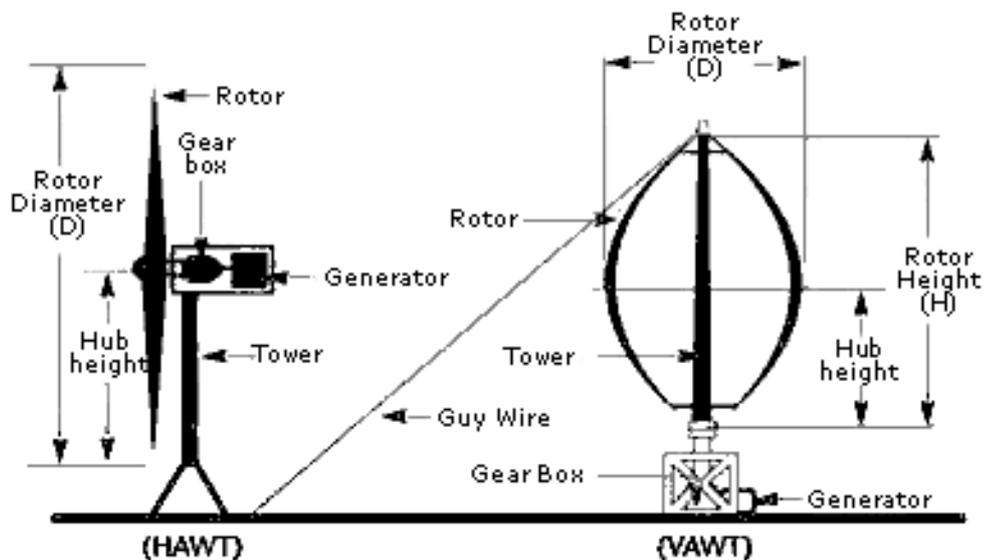
Sebuah turbin angin memiliki desain dan komponen didalamnya seperti pada gambar diatas. Turbin angin memiliki komponen penting untuk mendukung kinerjanya dalam mengonversi energi kinetik angin menjadi energi listrik. Berikut merupakan komponen yang terdapat pada turbin angin dan fungsinya masing-masing.

**Rotor** adalah hub turbin dan bilah turbin. **Pitch** berfungsi sebagai pengendali kecepatan rotor dan mempertahankan rotor dari perubahan arah putar karena fluktuasi pada kecepatan dan arah angin. **Brake** adalah cakram

yang dapat digunakan secara mekanik, dengan listrik, maupun hidrolis, untuk menghentikan rotor pada keadaan darurat. **High & Low Speed Shaft** berfungsi untuk mendistribusikan gerakan rotasi dari bilah turbin yang berputar dalam generator. **Gear box** merupakan penghubung shaft antara kecepatan rendah, dengan yang berkecepatan tinggi yang berfungsi sebagai peningkat kecepatan hingga generator dapat menghasilkan daya listrik. **Yaw drive** berfungsi untuk mempertahankan posisi rotor agar tetap menghadap arah angin. **Blades** atau bilah pada turbin angin berfungsi untuk memberikan gerak rotasi dari angin yang bertiup melalui turbin ke generator. **Generator** berfungsi untuk mengonversi kecepatan putar menjadi energi listrik. **Yaw motor** merupakan rotor yang memberi tenaga pada *yaw drive*. **Controller** berfungsi untuk menjalankan mesin pada kecepatan tertentu, misal 16mil/jam akan menyala, dan akan mematikan mesin ketika kecepatan melebihi 55mil/jam. **Anemometer** merupakan alat pengukur kecepatan angin serta sebagai penyimpan data kecepatan angin ke sistem controller. **Nacelle** merupakan body dari turbin angin, yang melindungi atau membungkus komponen-komponen lain. **Wind vane** berfungsi untuk menentukan arah angin, dan berkomunikasi oleh *yaw drive* untuk menentukan orientasi turbin angin. **Tower** adalah bagian dari turbin angin yang memiliki fungsi sebagai penopang utama, tower terbuat dari baja atau beton untuk menopang keseluruhan komponen turbin angin.

#### **2.7.4 Tipe-tipe turbin angin**

Turbin angin memiliki tipe yang berbeda-beda, ada dua jenis turbin angin yaitu turbin angin dengan sumbu horizontal dan turbin angin dengan sumbu vertikal. Turbin angin horizontal memiliki shaft rotor utama dan generator pada puncak dari menara, dan diarahkan pada arah angin. Sedangkan turbin angin vertikal memiliki shaft rotor yang dipasang secara vertikal. Untuk perbedaan lebih jelas lihat pada gambar berikut:



Gambar 2.5 Tipe Turbin Angin

Secara umum turbin angin sumbu horizontal terbagi menjadi upwind dan downwind. Sementara turbin angin sumbu vertikal terbagi menjadi Darrieus dan Savonius.

Turbin angin jenis upwind memiliki rotor yang menghadap ke arah angin. Keunggulan dari desain ini adalah rotor tidak terkena wind shade dari bagian belakang menara. Kerugian dari desain ini adalah rotor menjadi lebih tidak fleksibel, dan diletakkan dengan jarak tertentu dari puncak menara. Desain ini juga memerlukan mekanisme *yaw* agar rotor terus menghadap arah angin.

Turbin angin jenis *downwind* memiliki rotor yang tidak menghadap arah angin. Keunggulannya adalah desain tidak memerlukan mekanisme mekanisme *yaw*. Rotor juga dapat dibuat lebih fleksibel, dan beratnya menjadi lebih ringan secara keseluruhan. Kerugiannya adalah fluktuasi dari energi angin yang terjadi dapat memberikan lebih pada menara.

Turbin angin jenis *Darrieus* ditemukan oleh George Darrieus dari Prancis, yang banyak mendapat hak paten dari desain tersebut pada tahun

1931. Karakteristik desainnya adalah berbentuk C pada bilah rotor, hingga bentuknya seperti telur. Biasanya dibuat pada konsep dua bilah atau tiga buah bilah rotor.

Turbin angin jenis *Savonius* ditemukan oleh Sigurd Savonius dari Finlandia, dan dipatenkan pada tahun 1922. Karakteristik desainnya berbentuk S pada bilah rotornya, dan memiliki 2-3 atau lebih cekungan untuk menangkap angin. Desain turbin ini tidak dapat berputar lebih cepat dari kecepatan angin. Keuntungannya adalah desain ini memiliki sumbu vertikal dan dapat bekerja secara efektif bahkan ketika arah angin berubah. Desainnya juga dapat bekerja dengan baik pada kecepatan angin rendah, dan tidak diperlukan lokasi tinggi untuk meletakkannya. Kerugiannya adalah sistem cekungan pada bilah rotor tidak se-efisien dengan penggunaan bilah rotor konvensional, sehingga menghasilkan energi yang lebih sedikit.