

BAB 2 PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA HIBRIDA

2.1 Prinsip Dasar

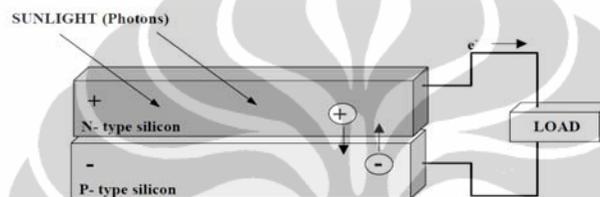
Pembangkit listrik tenaga hibrida (PLTH) adalah gabungan atau integrasi antara beberapa jenis pembangkit listrik berbasis BBM dengan pembangkit listrik berbasis energi terbarukan umumnya sistem pembangkit yang banyak digunakan untuk PLTH adalah generator diesel, pembangkit listrik tenaga surya (PLTS), mikrohidro, pembangkit listrik tenaga bayu (PLTB). Dalam studi ini, PLTH terdiri dari PLTD, PLTB dan PLTS. Ketiga jenis pembangkit ini dioperasikan bersamaan dan dihubungkan pada satu rel (busbar) untuk memikul beban.

Kontribusi daya masing-masing jenis pembangkit setiap saat tidak tetap, mengingat PLTB dan PLTS sangat tergantung dari kondisi alam. Pada siang hari, ketika cuaca cerah, PLTS dapat beroperasi maksimum dan pada malam hari PLTS sama sekali tidak beroperasi, tetapi digantikan oleh baterai yang menyimpan energi listrik dari PLTS sepanjang siang hari. Sedangkan PLTB dapat beroperasi selama 24 jam penuh setiap hari, namun PLTB tergantung tergantung dari kecepatan angin, sehingga daya yang dibangkitkan pun berubah setiap saat. Pembangkit berikutnya, PLTD adalah pembangkit instan yang dapat beroperasi penuh selama 24 jam. Namun sesuai dengan tujuan pengoperasian PLTH, yaitu menghemat BBM dan mengurangi emisi CO₂, maka pengoperasian PLTD merupakan variabel terakhir yang mengikuti perubahan suplai daya PLTB dan PLTS, sehingga kontribusi dayanya pun tergantung dari suplai daya kedua pembangkit listrik tersebut. Dengan pengoperasian PLTB dan PLTS yang terintegrasi pada PLTH, maka pemakaian BBM dan emisi CO₂ dapat dikurangi.

Pada prinsipnya peninjauan kontribusi daya dari masing-masing pembangkit listrik dalam PLTH ditinjau setiap saat, namun peninjauan pengoperasian jenis-jenis pembangkit listrik, khususnya PLTD, dapat pula ditinjau berdasarkan biaya bahan bakar minyak (BBM) dan komponen biaya pengoperasian lainnya serta biaya pemeliharaan yang harus dikerjakan. Dalam penelitian ini, peninjauan akan lebih ditekankan pada variabel harga BBM dan perubahan kecepatan angin (*windspeed*).

2.2 Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) adalah suatu teknologi pembangkit listrik yang mengkonversi energi foton dari surya menjadi energi listrik. Konversi ini dilakukan pada panel surya yang terdiri dari sel – sel fotovoltaik. Sel – sel ini merupakan lapisan – lapisan tipis dari silikon (Si) murni atau bahan semikonduktor lainnya yang diproses sedemikian rupa, sehingga apabila bahan tersebut mendapat energi foton akan mengeksitasi elektron dari ikatan atomnya menjadi elektron yang bergerak bebas, dan pada akhirnya akan mengeluarkan tegangan listrik arus searah.^[1]



Gambar 2.1 Proses Konversi Energi Listrik Pada Panel Surya

Sumber : <http://science.howstuffworks.com/solar-cell.htm>

PLTS memanfaatkan cahaya matahari untuk menghasilkan listrik DC (*direct current*), yang dapat diubah menjadi listrik AC (*alternating current*) apabila diperlukan. Oleh karena itu meskipun cuaca mendung, selama masih terdapat cahaya, maka PLTS tetap dapat menghasilkan listrik. PLTS pada dasarnya adalah pecatu daya (alat yang menyediakan daya), dan dapat dirancang untuk mencatu kebutuhan listrik yang kecil sampai dengan besar, baik secara mandiri, maupun dengan hybrid, baik dengan metoda desentralisasi (satu rumah satu pembangkit) maupun dengan metoda sentralisasi (listrik didistribusikan dengan jaringan kabel).



(a)



(b)

Gambar 2.2 (a) PLTS *stand alone* (mandiri), desentralisasi. (b) PLTS *Hybrid* dengan genset sentralisasi

Sumber : Informasi umum PLTS – PT. Azet Surya Lestari

2.2.1 Komponen PLTS

PLTS terdiri dari tiga komponen utama:

- **Modul Surya**

Modul surya berfungsi merubah cahaya matahari menjadi listrik arus searah (*Direct Current, DC*), tenaga listrik yang dihasilkan tersebut harus mempunyai besar tegangan tertentu yang sesuai dengan tegangan yang diperlukan inverter kemudian inverter dapat dengan mudah merubahnya menjadi listrik arus bolak balik (*Alternating Current, AC*) apabila diperlukan. Bentuk moduler dari modul surya memberikan kemudahan pemenuhan kebutuhan listrik untuk berbagai skala kebutuhan. Kebutuhan kecil dapat dicukupi dengan satu modul atau dua modul, dan kebutuhan besar dapat dicatu oleh bahkan ribuan modul surya yang dirangkai menjadi satu.

- **Alat Pengatur**

Alat pengatur merupakan perangkat elektronik yang mengatur aliran listrik dari modul surya ke baterai dan aliran listrik dari baterai ke peralatan listrik seperti lampu, TV atau radio/tape. *Charge-Discharge* pengontrol melindungi baterai dari pengisian berlebihan dan melindungi dari korsleting atau pengiriman muatan arus berlebih ke input terminal. Alat ini juga mempunyai beberapa indikator yang akan memberikan kemudahan kepada pengguna PLTS dengan memberikan informasi mengenai kondisi baterai sehingga pengguna PLTS dapat mengendalikan konsumsi energi menurut ketersediaan listrik yang terdapat didalam baterai. Selain itu terdapat 3 indikator lainnya yang menginformasikan status pengisian, adanya muatan berlebih dan pengisian otomatis pada saat baterai kosong.

- **Baterai / Accu**

Baterai berfungsi menyimpan arus listrik yang dihasilkan oleh modul surya sebelum dimanfaatkan untuk menggerakkan beban. Beban dapat berupa lampu penerangan atau peralatan elektronik dan peralatan lainnya yang membutuhkan listrik. Ukuran baterai yang dipakai sangat tergantung pada ukuran genset, ukuran solar panel, dan load pattern. Ukuran baterai yang terlalu besar baik untuk efisiensi operasi tetapi mengakibatkan kebutuhan investasi yang terlalu besar, sebaliknya ukuran baterai terlalu kecil dapat mengakibatkan tidak tertampungnya daya berlebih.

2.2.2 Perhitungan Penentuan Jumlah Modul Surya

Rangkaian dari sel – sel yang disusun seri dan paralel tersebut dinamakan modul. Biasanya setiap modul terdiri dari 10 – 36 unit sel. Apabila tegangan, arus dan daya dari suatu modul tidak mencukupi untuk beban yang digunakan, maka modul – modul tersebut dapat dirangkai seri, paralel ataupun kombinasi keduanya untuk menghasilkan besar tegangan dan daya sesuai kebutuhan. Rangkaian modul yang dihubungkan seri tersebut dinamakan rangkaian cabang (*branch circuit*) dan modul – modul total yang terpasang disebut dengan susunan modul (array) yang terdiri dari kumpulan paralel rangkaian cabang.

Untuk memperoleh besar tegangan dan daya yang sesuai dengan kebutuhan, sel-sel fotovoltaik tersebut harus dikombinasikan secara seri dan paralel, dengan aturan sebagai berikut ^[1]:

- untuk memperoleh tegangan keluaran yang dua kali lebih besar dari tegangan keluaran sel fotovoltaik, maka dua buah sel fotovoltaik harus dihubungkan secara seri.
- untuk memperoleh arus keluaran yang dua kali lebih besar dari arus keluaran sel fotovoltaik, maka dua buah sel fotovoltaik harus dihubungkan secara paralel.
- Untuk memperoleh daya keluaran yang dua kali lebih besar dari daya keluaran sel fotovoltaik dengan tegangan yang konstan, maka dua buah sel fotovoltaik harus dihubungkan secara seri dan paralel.

2.2.2.1 Menentukan Jumlah Hubungan Seri Modul Surya

Daya generator modul surya yang telah dihitung diatas harus dinyatakan terlebih dahulu sebagai hasil perhitungan sementara. Generator modul surya merupakan bentuk kombinasi hubungan seri dan paralel modul – modul surya. Langkah penting berikutnya adalah menentukan jumlah modul surya yang harus dihubungkan seri dan paralel.

Jumlah modul yang harus dihubungkan seri ditentukan oleh tegangan masukan inverter, dengan rumus dibawah ini^[2] :

$$J_s = \frac{V_{INV}}{V_{MF}} \quad (2.1)$$

Dengan :

- J_s = jumlah seri modul surya
 V_{INV} = tegangan masukan inverter (volt)
 V_{MF} = tegangan maksimum modul surya (volt)

Bilangan J_s harus merupakan bilangan bulat (integer). Bila didapatkan bilangan pecahan, maka bilangan tersebut harus dibulatkan, sehingga diperoleh ^[2] :

$$V_{GPV} = J_s \cdot V_{MF} \quad (2.2)$$

Dengan V_{GPV} adalah tegangan generator modul surya dalam Volt.

2.2.2.2 Menentukan Jumlah Modul Surya Dalam Hubungan Paralel

Suatu string terdiri dari J_s modul surya dalam hubungan seri. Untuk memperoleh daya total generator fotovoltaik sebesar P_{GPV} , maka dibutuhkan jumlah string, sebagai berikut ^[2] :

$$J_p = \frac{P'_{GPV}}{V_{GPV} \cdot I_{MF}} \quad (2.3)$$

Bila diperoleh bilangan pecahan, J_p dibulatkan keatas, arus nominal generator fotovoltaik (I_{GPV}) dapat dihitung kemudian dengan rumus sebagai berikut :

$$I_{GPV} = J_p \cdot I_{MF} \quad (2.4)$$

Setelah ditentukan J_s dan J_p , maka daya generator fotovoltaik terpasang dihitung kembali menggunakan persamaan ^[2] :

$$P_{GPV} = V_{GPV} \cdot I_{GPV} \quad (\text{watt peak}) \quad (2.5)$$

Sedangkan jumlah susunan modul fotovoltaik (N) yang terpasang adalah :

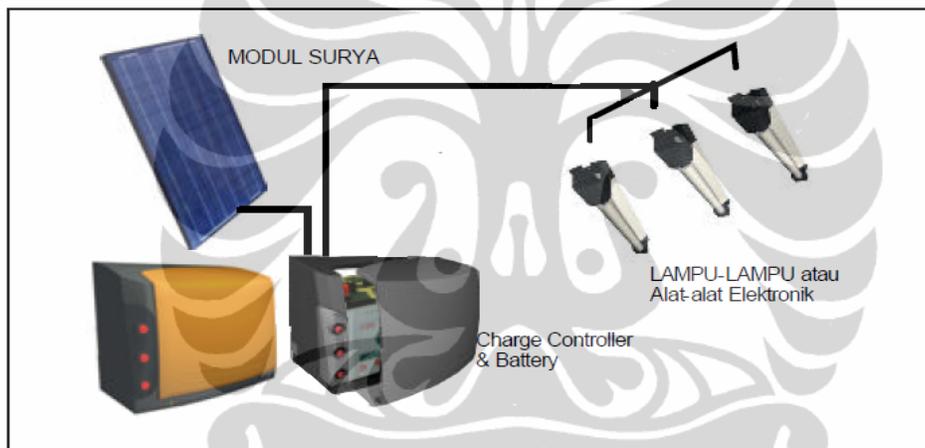
$$N = J_p \cdot J_s \quad (2.6)$$

Dengan :

- J_p = jumlah string modul fotovoltaik
 P'_{GPV} = daya generator fotovoltaik (watt)
 V_{GPV} = tegangan generator fotovoltaik (volt)
 I_{MF} = arus maksimum modul fotovoltaik (ampere)

2.2.3 Prinsip Kerja PLTS

Pada siang hari modul surya menerima cahaya matahari yang kemudian diubah menjadi listrik melalui proses fotovoltaik. Listrik yang dihasilkan oleh modul dapat langsung disalurkan ke beban ataupun disimpan dalam baterai sebelum digunakan ke beban: lampu, radio, dll. Pada malam hari, dimana modul surya tidak menghasilkan listrik, beban sepenuhnya dicatu oleh battery. Demikian pula apabila hari mendung, dimana modul surya menghasilkan listrik lebih rendah dibandingkan pada saat matahari benderang. Modul surya dengan kapasitas tertentu dapat menghasilkan jumlah listrik yang berbeda-beda apabila ditempatkan pada daerah yang berlainan. Secara skematis sistem PLTS dapat digambarkan sebagai berikut:



Gambar 2.3 Skema sistem PLTS

Sumber : Informasi umum PLTS – PT. Azet Surya Lestari

2.2.4 Keunggulan dan Kelemahan PLTS

Keunggulan-keunggulan PLTS :

- Tidak memerlukan bahan bakar, karena menggunakan sumber energi matahari yang dapat diperoleh dimana saja secara cuma-cuma sepanjang tahun, sehingga hampir tidak memerlukan biaya operasi.
- Tidak memerlukan konstruksi yang berat dan menetap, sehingga dapat dipasang dimana saja dan dapat dipindahkan bilamana dibutuhkan.
- Dapat diterapkan secara sentralisasi (PLTS ditempatkan di suatu area dan listrik yang dihasilkan disalurkan melalui jaringan distribusi ke tempat-tempat yang membutuhkan) maupun desentralisasi (sistem PLTS dipasang pada setiap rumah, dengan demikian tidak diperlukan jaringan distribusi).

- Pada pola desentralisasi, gangguan pada satu sistem tidak akan mempengaruhi sistem yang lain dan tidak banyak energi yang terbuang pada jaringan distribusi.
- Bersifat moduler; kapasitas listrik yang dihasilkan dapat disesuaikan dengan kebutuhan dengan cara merangkai modul secara seri dan paralel.
- Dapat dioperasikan secara otomatis (*unattendable*) maupun menggunakan operator (*attendable*).
- Ramah lingkungan. Tidak menimbulkan polusi suara maupun polusi asap.
- Tidak ada bagian yang bergerak, sehingga hampir tidak memerlukan biaya pemeliharaan, yang diperlukan hanya membersihkan modul apabila kotor dan menambah air accu (*aquades*).
- Umur pakai (*life time*) lebih dari 25 tahun

Kelemahan – kelemahan PLTS :

- Modul surya memiliki efisiensi konversi yang rendah dibandingkan jenis pembangkit lainnya.
- Untuk bekerja dengan baik, modul surya harus cukup mendapatkan penyinaran matahari (tergantung pada musim).
- Memerlukan area yang luas untuk pemasangan modul surya untuk mendapatkan daya keluaran yang tinggi.
- Harga modul surya (skala kecil) masih mahal sehingga biaya pembangkitan yang dihasilkan juga mahal.

2.3 Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB)

Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) adalah suatu teknologi pembangkit listrik yang merubah potensi energi angin menjadi energi listrik. Angin adalah udara yang bergerak/mengalir, sehingga memiliki kecepatan, tenaga dan arah. Penyebab dari pergerakan ini adalah pemanasan bumi oleh radiasi matahari. Udara di atas permukaan bumi selain dipanaskan oleh matahari secara langsung, juga mendapat pemanasan oleh radiasi matahari bumi tidak homogen, maka jumlah energi matahari yang diserap dan dipancarkan kembali oleh bumi berdasarkan tempat dan waktu adalah bervariasi. Hal ini menyebabkan perbedaan temperatur pada atmosfer, yang menyebabkan perbedaan kerapatan dan tekanan atmosfer. Udara memiliki sifat untuk selalu mencapai kesetimbangan tekanan, karena itu perbedaan kecepatan dan tekanan

atmosfer ini menyebabkan udara bergerak dari daerah yang bertekanan tinggi ke daerah bertekanan rendah.

Pada daerah yang relatif panas, partikel udara mendapat energi sehingga udara memuai. Akibat dari pemuaian ini, tekanan udara di daerah itu naik, namun kerapatan udara menjadi berkurang, sehingga berat jenis udara di tempat itu menjadi relatif kecil, akibatnya udara berekspansi ke atas dan menyebabkan terjadinya penurunan tekanan di daerah yang ditinggalkannya. Daerah ini lalu diisi oleh udara dari daerah sekelilingnya yang memiliki tekanan udara dan massa jenis lebih tinggi. Udara yang berekspansi ke atas lalu mengalami penurunan suhu, sehingga terjadi penyusutan dan massa jenisnya kembali naik. Udara ini akan turun kembali di tempat lain yang memiliki tekanan yang lebih rendah. Hal ini berlangsung terus menerus sepanjang waktu, sehingga pergerakan udara terus berlangsung.

2.3.1 Potensi Tenaga Angin

Angin adalah udara yang memiliki massa dan bergerak dengan kecepatan tertentu. Akibat pergerakan ini, angin memiliki daya yang sebanding dengan massanya dan berbanding lurus dengan kuadrat kecepatannya. Secara ideal kecepatan angin yang menggerakkan kincir angin ada tiga, yaitu kecepatan aliran angin masuk (V_i) atau kecepatan aliran angin menuju *blade*, kecepatan aliran angin saat mengenai *blade* (V_a) dan kecepatan aliran angin ketika meninggalkan *blade* (V_e), yaitu :

Angin mempunyai tenaga yang sama besarnya dengan energi kinetik dari aliran angin tersebut, yaitu^[2] :

$$P_{tot} = m \cdot KE_i = m \cdot \frac{V_i^2}{2 \cdot g_c} (W) \quad (2.7)$$

Dengan :

P_{tot} = daya total angin (W)

m = aliran massa angin $\left(\frac{kg}{det} \right)$

V_i = kecepatan angin masuk $\left(\frac{m}{det} \right)$

G_c = faktor konversi = 1 $\left(\frac{kg \cdot m}{N \cdot det} \right)$

2.3.2 Kecepatan Angin Rata – Rata

Langkah awal dalam menghitung energi angin adalah mengetahui kecepatan angin rata – rata. ^[2] Kecepatan angin rata – rata tersebut dapat dihitung dengan rumus :

$$\bar{V} = \frac{\sum_{i=1}^n V_i t_i}{\sum_{i=1}^n t_i} \quad (2.8)$$

Dengan :

- \bar{V} = kecepatan angin rata – rata (m/s).
- V_i = kecepatan angin yang terukur (m/s)
- T_i = lamanya angin bertiup dengan kecepatan V_i (m/s)
- N = banyaknya data pengukuran

Kecepatan angin rata – rata untuk tiap satu jam digunakan untuk mengetahui 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 dipergunakan untuk menggerakkan turbin.

2.3.3 Komponen – Komponen PLTB

Komponen-komponen PLTB dari ukuran besar, pada umumnya dapat terlihat dalam gambar 2.4 berikut ; sedangkan untuk ukuran kecil biasanya tidak semua komponen ada seperti yang terlihat dalam gambar ^[3].

- **Anemometer**

Mengukur kecepatan angin, dan mengirim data angin ini ke alat pengontrol.

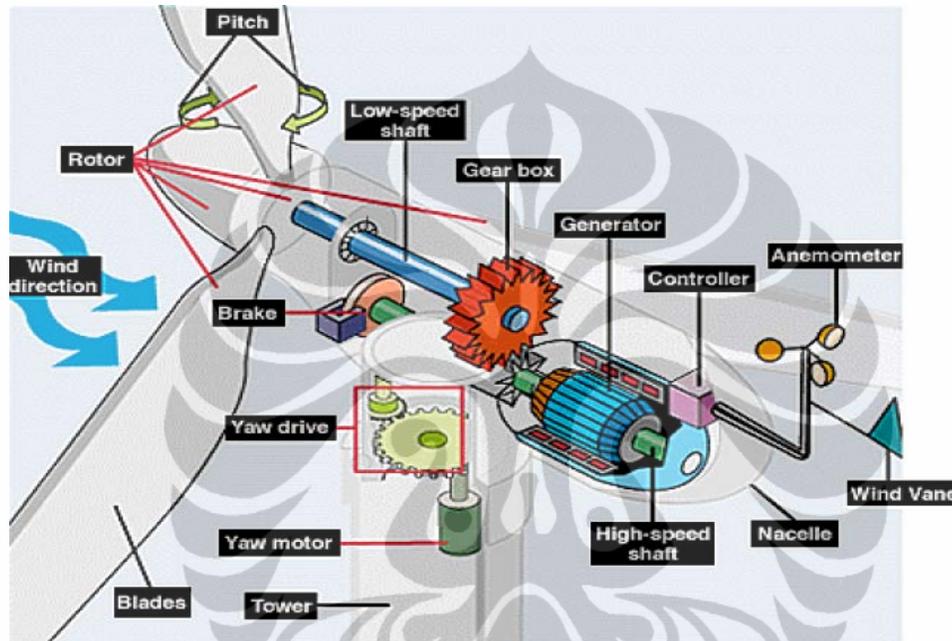
- **Blades (Bilah Kipas)**

Kebanyakan turbin angin mempunyai 2 atau 3 bilah kipas. Angin yang menghembus menyebabkan turbin tersebut berputar.

- **Brake (Rem)**

Suatu rem cakram yang dapat digerakkan secara mekanis, dengan tenaga listrik atau hidrolik untuk menghentikan rotor atau saat keadaan darurat. Digunakan untuk menjaga putaran pada poros setelah gearbox agar bekerja pada titik aman saat terdapat angin yang besar. Alat ini perlu dipasang karena generator memiliki titik kerja aman dalam pengoperasiannya. Generator ini akan menghasilkan energi listrik maksimal

pada saat bekerja pada titik kerja yang telah ditentukan. Kehadiran angin diluar digunakan akan menyebabkan putaran yang cukup cepat pada poros generator, sehingga jika tidak diatasi maka putaran ini dapat merusak generator. Dampak dari kerusakan akibat putaran berlebih diantaranya : overheat, rotor breakdown, kawat pada generator putus, karena tidak dapat menahan arus yang cukup besar.



Gambar 2.4 Potongan Turbin Angin
Sumber : DOE / NREL

- **Controller (Alat Pengontrol)**

Alat Pengontrol ini menstart turbin pada kecepatan angin kira-kira 12-25 km/jam, dan mematikannya pada kecepatan 90 km/jam. Turbin tidak beroperasi di atas 90 km/jam, karena angin terlalu kencang dapat merusakkannya.

- **Gear box (Roda Gigi)**

Alat ini berfungsi untuk mengubah putaran rendah pada kincir menjadi putaran tinggi. Biasanya Gearbox yang digunakan sekitar 1:60. Roda gigi menaikkan putaran dari 30-60 rpm menjadi kira-kira 1000-1800 rpm yaitu putaran yang biasanya disyaratkan untuk memutar generator listrik.

- **High-speed shaft (Poros Putaran Tinggi)**

Berfungsi untuk menggerakkan generator.

- **Low-speed shaft (Poros Putaran Rendah)**

Poros turbin yang berputar kira-kira 30-60 rpm.

- **Generator**

Generator pembangkit listrik, biasanya sekarang alternator arus bolak-balik. Ini adalah salah satu komponen terpenting dalam pembuatan sistem turbin angin. Generator ini dapat mengubah energi gerak menjadi energi listrik. Prinsip kerjanya dapat dipelajari dengan menggunakan teori medan elektromagnetik. Singkatnya, (mengacu pada salah satu cara kerja generator) poros pada generator dipasang dengan material ferromagnetik permanen. Setelah itu disekeliling poros terdapat stator yang bentuk fisiknya adalah kumparan-kumparan kawat yang membentuk *loop*. Ketika poros generator mulai berputar maka akan terjadi perubahan fluks pada stator yang akhirnya karena terjadi perubahan fluks ini akan dihasilkan tegangan dan arus listrik tertentu. Tegangan dan arus listrik yang dihasilkan ini disalurkan melalui kabel jaringan listrik untuk akhirnya digunakan oleh masyarakat. Tegangan dan arus listrik yang dihasilkan oleh generator ini berupa AC (*alternating current*) yang memiliki bentuk gelombang kurang lebih sinusoidal.

- ***Nacelle* (Rumah Mesin)**

Rumah mesin ini terletak di atas menara . Di dalamnya berisi gear-box, poros putaran tinggi / rendah, generator, alat pengontrol, dan alat pengereman.

- ***Pitch* (Sudut Bilah Kipas):**

Bilah kipas bisa diatur sudutnya untuk mengatur kecepatan rotor yang dikehendaki, tergantung angin terlalu rendah atau terlalu kencang.

- ***Rotor***

Bilah kipas bersama porosnya dinamakan rotor.

- ***Tower* (Menara)**

Menara bisa dibuat dari pipa baja, beton, rangka besi. Karena kencangnya angin bertambah dengan ketinggian, maka makin tinggi menara makin besar tenaga yang didapat.

- ***Wind direction* (Arah Angin)**

Gambar diatas adalah turbin yang menghadap angin, desain turbin lain ada yang mendapat hembusan angin dari belakang.

- ***Wind vane* (Tebeng Angin)**

Mengukur arah angin, berhubungan dengan penggerak arah yang memutar arah turbin disesuaikan dengan arah angin.

- ***Yaw drive (Penggerak Arah)***

Penggerak arah memutar turbin ke arah angin untuk desain turbin yang menghadap angin. Untuk desain turbin yang mendapat hembusan angin dari belakang tak memerlukan alat ini.

- ***Yaw motor (Motor Penggerak Arah)***

Motor listrik yang menggerakkan penggerak arah.

2.3.4 Jenis – Jenis Turbin Angin

Jenis-jenis turbin angin berdasarkan arah / poros perputarannya dibedakan menjadi dua jenis yaitu turbin angin sumbu horizontal dan turbin angin sumbu vertikal.^[4]

2.3.4.1 Turbin Angin Sumbu Horizontal

Turbin angin sumbu horizontal (TASH) memiliki poros rotor utama dan generator listrik di puncak menara. Turbin berukuran kecil diarahkan oleh sebuah baling-baling angin (baling-baling cuaca) yang sederhana, sedangkan turbin berukuran besar pada umumnya menggunakan sebuah sensor angin yang digandengkan ke sebuah servo motor. Sebagian besar memiliki sebuah gearbox yang mengubah perputaran kincir yang pelan menjadi lebih cepat berputar.



Gambar 2.5 Turbin Angin Sumbu Horizontal

Source: DOE/NREL

Karena sebuah menara menghasilkan turbulensi di belakangnya, turbin biasanya diarahkan melawan arah anginnya menara. Bilah-bilah turbin dibuat kaku agar mereka tidak terdorong menuju menara oleh angin berkecepatan tinggi. Sebagai tambahan,

bilah-bilah itu diletakkan di depan menara pada jarak tertentu dan sedikit dimiringkan. Karena turbulensi menyebabkan kerusakan struktur menara, dan realibilitas begitu penting, sebagian besar TASH merupakan mesin upwind (melawan arah angin). Meski memiliki permasalahan turbulensi, mesin downwind (menurut jurusan angin) dibuat karena tidak memerlukan mekanisme tambahan agar mereka tetap sejalan dengan angin, dan karena di saat angin berhembus sangat kencang, bilah-bilahnya bisa ditekuk sehingga mengurangi wilayah tiupan mereka dan dengan demikian juga mengurangi resintensi angin dari bilah-bilah itu.

2.3.4.2 Turbin Angin Sumbu Vertikal

Turbin angin sumbu vertikal/tegak (atau TASV) memiliki poros/sumbu rotor utama yang disusun tegak lurus. Kelebihan utama susunan ini adalah turbin tidak harus diarahkan ke angin agar menjadi efektif. Kelebihan ini sangat berguna di tempat-tempat yang arah anginnya sangat bervariasi. TASV mampu mendayagunakan angin dari berbagai arah.

Dengan sumbu yang vertikal, generator serta gearbox bisa ditempatkan di dekat tanah, jadi menara tidak perlu menyokongnya dan lebih mudah diakses untuk keperluan perawatan. Tapi ini menyebabkan sejumlah desain menghasilkan tenaga putaran yang berdenyut. *Drag* (gaya yang menahan pergerakan sebuah benda padat melalui fluida (zat cair atau gas) bisa saja tercipta saat kincir berputar.



Gambar 2.6 Turbin Angin Sumbu Vertikal
Source: AWI (www.awi-bremerhaven.de)^[5]

Karena sulit dipasang di atas menara, turbin sumbu tegak sering dipasang lebih dekat ke dasar tempat ia diletakkan, seperti tanah atau puncak atap sebuah bangunan. Kecepatan angin lebih pelan pada ketinggian yang rendah, sehingga yang tersedia adalah energi angin yang sedikit. Aliran udara di dekat tanah dan obyek yang lain mampu menciptakan aliran yang bergolak, yang bisa menyebabkan berbagai permasalahan yang berkaitan dengan getaran, diantaranya kebisingan dan *bearing wear* yang akan meningkatkan biaya pemeliharaan atau mempersingkat umur turbin angin. Jika tinggi puncak atap yang dipasangi menara turbin kira-kira 50% dari tinggi bangunan, ini merupakan titik optimal bagi energi angin yang maksimal dan turbulensi angin yang minimal.

2.3.5 Keunggulan dan Kelemahan Turbin Angin

Masing-masing jenis turbin angin yang telah diuraikan diatas memiliki keunggulan dan kekurangan.^[4]

2.3.5.1 Keunggulan dan Kelemahan Turbin Angin Sumbu Horizontal (TASH)

Keunggulan TASH

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

Kelemahan TASH

- Menara yang tinggi serta bilah yang panjangnya bisa mencapai 90 meter sulit diangkut. Diperkirakan besar biaya transportasi bisa mencapai 20% dari seluruh biaya peralatan turbin angin.
- TASH yang tinggi sulit dipasang, membutuhkan derek yang sangat tinggi dan mahal serta para operator yang tampil.
- Konstruksi menara yang besar dibutuhkan untuk menyangga bilah-bilah yang berat, gearbox, dan generator.
- TASH yang tinggi bisa mempengaruhi radar airport.
- Ukurannya yang tinggi merintangi jangkauan pandangan dan mengganggu penampilan pemandangan.

- Berbagai varian *downwind* menderita kerusakan struktur yang disebabkan oleh turbulensi.
- TASH membutuhkan mekanisme kontrol yaw tambahan untuk membelokkan kincir ke arah angin.

2.3.5.2 Keunggulan dan Kelemahan Turbin Angin Sumbu Vertikal (TASV)

Keunggulan TASV

- Tidak membutuhkan struktur menara yang besar.
- Karena bilah-bilah rotornya vertikal, tidak dibutuhkan mekanisme yaw.
- Sebuah TASV bisa diletakkan lebih dekat ke tanah, membuat pemeliharaan bagian-bagiannya yang bergerak jadi lebih mudah.
- TASV memiliki sudut *airfoil* (bentuk bilah sebuah baling-baling yang terlihat secara melintang) yang lebih tinggi, memberikan keaerodinamisan yang tinggi sembari mengurangi drag pada tekanan yang rendah dan tinggi.
- Desain TASV berbilah lurus dengan potongan melintang berbentuk kotak atau empat persegi panjang memiliki wilayah tiupan yang lebih besar untuk diameter tertentu daripada wilayah tiupan berbentuk lingkarannya TASH.
- TASV memiliki kecepatan awal angin yang lebih rendah daripada TASH. Biasanya TASV mulai menghasilkan listrik pada 10km/jam (6 m.p.h.)
- TASV biasanya memiliki tip speed ratio (perbandingan antara kecepatan putaran dari ujung sebuah bilah dengan laju sebenarnya angin) yang lebih rendah sehingga lebih kecil kemungkinannya rusak di saat angin berhembus sangat kencang.
- TASV bisa didirikan pada lokasi-lokasi dimana struktur yang lebih tinggi dilarang dibangun.
- TASV yang ditempatkan di dekat tanah bisa mengambil keuntungan dari berbagai lokasi yang menyalurkan angin serta meningkatkan laju angin (seperti gunung atau bukit yang puncaknya datar dan puncak bukit),
- TASV tidak harus diubah posisinya jika arah angin berubah.
- Kincir pada TASV mudah dilihat dan dihindari burung.

Kelemahan TASV

- Kebanyakan TASV memproduksi energi hanya 50% dari efisiensi TASH karena drag tambahan yang dimilikinya saat kincir berputar.

- TASV tidak mengambil keuntungan dari angin yang melaju lebih kencang di elevasi yang lebih tinggi.
- Kebanyakan TASV mempunyai torsi awal yang rendah, dan membutuhkan energi untuk mulai berputar.
- Sebuah TASV yang menggunakan kabel untuk menyanggahnya memberi tekanan pada bantalan dasar karena semua berat rotor dibebankan pada bantalan. Kabel yang dikaitkan ke puncak bantalan meningkatkan daya dorong ke bawah saat angin bertiup.

2.4 Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD)

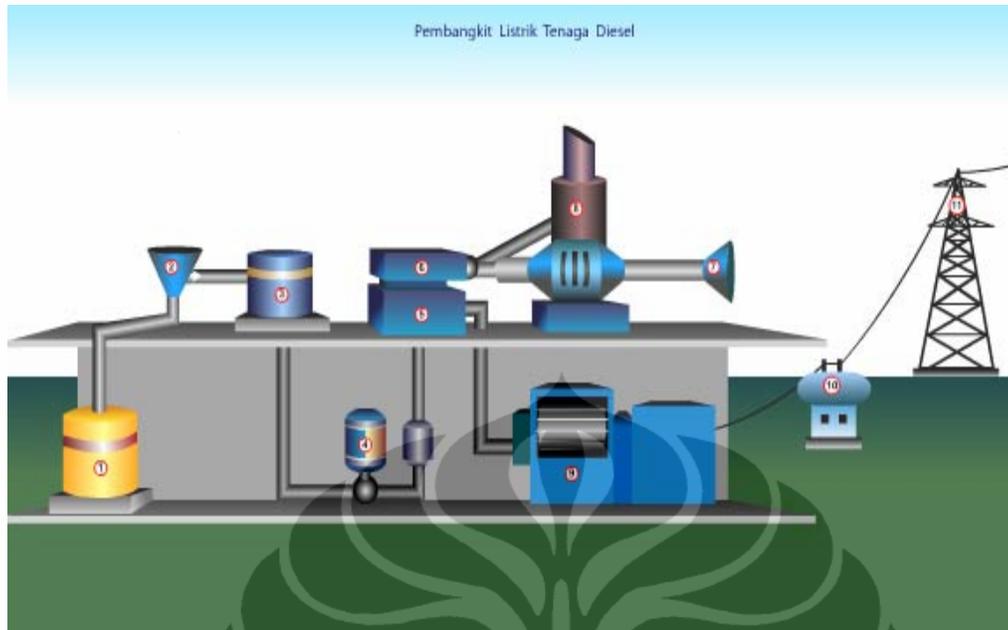
Pusat Listrik Tenaga Diesel (PLTD) sesuai untuk diimplementasikan pada lokasi dimana pengeluaran bahan bakar rendah, persediaan air terbatas, minyak sangat murah dibandingkan dengan batubara dan semua beban dasarnya adalah seperti yang dapat ditangani oleh mesin pembangkit dalam kapasitas kecil, serta dapat berfungsi dalam waktu yang singkat. Kegunaan utama PLTD adalah penyedia daya listrik yang dapat berfungsi untuk pusat pembangkit, cadangan (*stand by plant*), beban puncak dan cadangan untuk keadaan darurat (*emergency*)^[6].

Faktor-faktor yang merupakan pertimbangan pilihan yang sesuai untuk PLTD antara lain :

- Jarak dari beban dekat
- Persediaan areal tanah dan air
- Pondasi, tidak diperlukan untuk PLTD jenis mobile
- Pengangkutan bahan bakar
- Kebisingan dan kesulitan lingkungan

2.4.1 Prinsip Kerja dan Komponen – Komponen PLTD

Bagian-bagian utama pada PLTD adalah mesin (motor) diesel dan generator. Mesin diesel adalah motor bakar berfungsi menghasilkan tenaga mekanis yang dipergunakan untuk memutar rotor generator. Mesin diesel menggunakan bahan bakar minyak diesel dengan kecepatan tinggi, bekerja dengan prinsip pembakaran kompresi dan menggunakan dua langkah putaran dalam operasi, ini digunakan bilamana mesin berkapasitas tinggi.



Gambar 2.7 skema Pembangkit Listrik Tenaga Diesel

Sumber : <http://www.pln.co.id/InfoUmum/ElectricityEvocation>

Komponen – Komponen PLTD (Keterangan gambar) [7]:

1. *Fuel Tank*
2. *Fuel oil separator*
3. *Daily tank*
4. *Fuel oil booster*
5. *Diesel motor* : menghidupkan mesin diesel untuk mempunyai energi untuk bekerja
6. *Turbo charger* : menaikkan efisiensi udara yang dicampur dengan bahan bakar dan menaikkan tekanan serta temperturnya.
7. *Air intake filter* : Perangkat untuk mengalirkan udara
8. *Exhaust gas silincer* : Peredam dari sisa gas yang digunakan
9. *Generator* : Menghasilkan energi listrik
10. *Pengubah utama* : Alat pengubah utama untuk menjadi energi listrik
11. *Jalur transmisi* : Penyaluran energi listrik ke konsumen

Daya yang dihasilkan oleh kerja mesin diesel ditentukan faktor-faktor sebagai berikut^[5] :

$$P = \frac{P_{e.v.i.n}}{450000.a} \quad (2.9)$$

Dengan :

- Pe adalah tekanan efektif yang bekerja
 v adalah volume langkah silinder yang dapat dicapai
 i adalah jumlah silinder
 n adalah putaran permenit atau kecepatan putar mesin
 a bernilai 2 untuk tipe mesin 4 langkah
 bernilai 1 untuk tipe mesin 2 langkah

Untuk jenis 2 langkah daya keluarannya adalah 2 kali jenis 4 langkah, tetapi jenis 4 langkah banyak dipilih karena efisiensi bahan bakar yang digunakan lebih besar. Mesin diesel adalah motor bakar dimana daya yang dihasilkan diperoleh dari pembakaran bahan bakar. Adapun daya yang dihasilkan akan berubah menjadi ^[6] :

- Daya manfaat 40%
- Panas yang hilang untuk pendingin 30%
- Panas yang hilang untuk pembuangan gas 24%
- Panas yang hilang dalam pergeseran, radiasi dan sebagainya 6%

2.4.2 Keunggulan dan Kelemahan PLTD

PLTD sebagai pembangkit tenaga listrik yang instan, saat ini paling banyak digunakan sebagai sumber pembangkitan tenaga listrik. Berikut ini adalah beberapa keunggulan dan kelemahan apabila menggunakan PLTD sebagai sumber pembangkitan tenaga listrik. ^[8]

Keunggulan jika menggunakan PLTD

- Daya listrik tersedia sesuai dengan kebutuhan
- Secara teknis handal
- Layanan purna jual relatif mudah diperoleh
- Biaya investasi (Rp/kW) relatif murah.

Kelemahan jika menggunakan PLTD

- Biaya operasi dan pemeliharaan mahal
- Memerlukan transportasi penyediaan dan penyimpanan BBM
- Menimbulkan polusi udara, kebisingan, dan bau,
- Memerlukan pemeliharaan rutin
- Sistem operasi tidak efisien (boros) pada kondisi beban rendah.

2.5 Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Hibrida (PLTH)

2.5.1 Prinsip Kerja PLTH

PLTH adalah suatu sistem pembangkit listrik (PL) yang memadukan beberapa jenis PL, pada umumnya antara PL berbasis BBM dengan PL berbasis EBT. Merupakan solusi untuk mengatasi krisis BBM dan ketiadaan listrik di daerah terpencil, pulau-pulau kecil dan pada daerah perkotaan. Umumnya terdiri atas : modul surya, turbin angin, generator diesel, baterai, dan peralatan kontrol yang terintegrasi. Tujuan PLTH adalah mengkombinasikan keunggulan dari setiap pembangkit sekaligus menutupi kelemahan masing-masing pembangkit untuk kondisi-kondisi tertentu, sehingga secara keseluruhan sistem dapat beroperasi lebih ekonomis dan efisien. Mampu menghasilkan daya listrik secara efisien pada berbagai kondisi pembebanan^[8]

Untuk mengetahui unjuk kerja sistem pembangkit hibrida ini, hal – hal yang perlu dipertimbangkan antara lain : karakteristik beban pemakaian dan karakteristik pembangkitan daya khususnya dengan memperhatikan potensi energi alam yang ingin dikembangkan berikut karakteristik kondisi alam itu sendiri, seperti pergantian siang malam, musim dan sebagainya.

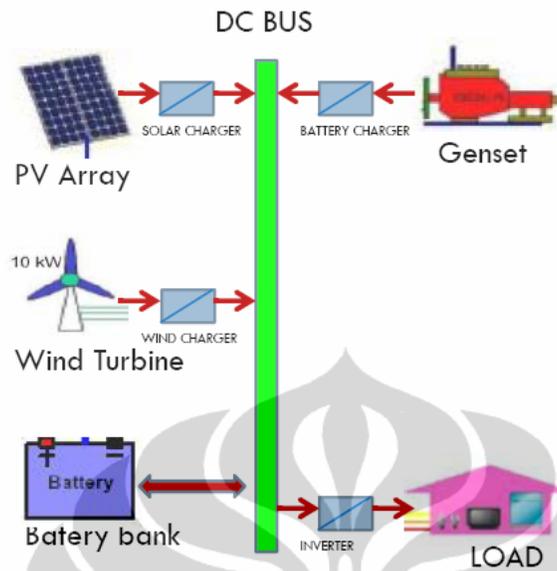
2.5.2 Sistem Operasi PLTH

Sistem operasi pada PLTH dibedakan menjadi tiga jenis, yaitu sistem serial, sistem tersaklar, dan sistem paralel^[8].

2.5.2.1 PLTH Sistem Serial

Prinsip Kerja PLTH Sistem Serial

Semua pembangkit daya mensuplai daya DC ke dalam baterai, setiap komponen harus dilengkapi dengan charge controller sendiri, untuk menjamin operasi yang handal sistem ini, generator dan inverter harus didisain agar dapat melayani beban puncak. Pada sistem ini sejumlah besar energi yang dibangkitkan dilewatkan melalui baterai, siklus baterai bank menjadi naik dan mengurangi efisiensi sistem, daya listrik dari genset di DC kan dan diubah kembali menjadi AC sebelum disuplai ke beban sehingga terjadi rugi-rugi yang signifikan.



Gambar 2.8 PLTH Sistem Serial

Sumber : Rosyid, A., (2008) PLTH Wini. Balai Besar Teknologi Energi – BPPT. Tangerang

Keunggulan – Keunggulan PLTH Sistem Serial

PLTH sistem serial ini memiliki beberapa keunggulan antara lain :

- Genset dapat didisain untuk dapat dibebani secara optimal, sewaktu mensuplai beban juga mengisi baterai hingga mencapai *State of Charge* (SOC) 70-80%,
- Tidak diperlukan saklar AC diantara sumber energi, menyederhanakan komponen antar muka keluaran, daya yang disuplai ke beban tidak terinterupsi ketika genset di start.

Kelemahan – Kelemahan PLTH Sistem Serial

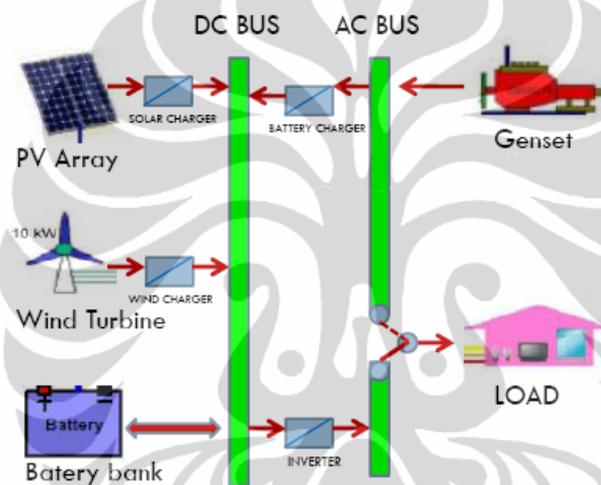
Kelemahan atau kerugian apabila menggunakan sistem ini adalah :

- Inverter tak dapat beroperasi paralel dengan genset, sehingga inverter harus didisain untuk mensuplai beban puncak,
- siklus baterai menjadi tinggi, sehingga mengurangi umur baterai, profil siklus membutuhkan baterai bank yang besar, untuk membatasi DOD (Depth of Discharge)
- Efisiensi total rendah, karena genset tak dapat mensuplai beban secara langsung, kerusakan inverter akan mengakibatkan kehilangan daya total ke beban, kecuali beban dapat disuplai dengan genset emergency.

2.5.2.2 PLTH Sistem Tersaklar (*Switched*)

Prinsip Kerja PLTH Sistem Tersaklar

Pada sistem PLTH tersaklar (*switched*), genset dan inverter dapat beroperasi sebagai sumber AC, pada sistem yang tidak memiliki operasi paralel, genset dan sumber energi terbarukan dapat mengisi (*charging*) baterai. Pada sistem ini beban dapat langsung disuplai genset sehingga meningkatkan efisiensi total, kelebihan daya dari genset dapat digunakan untuk mengisi baterai, ketika beban rendah, genset dimatikan, beban disuplai dari ET bersama energi yang tersimpan.



Gambar 2.9 PLTH Sistem Tersaklar (*Switched*)

Sumber : Rosyid, A., (2008) PLTH Wini. Balai Besar Teknologi Energi – BPPT. Tangerang

Keunggulan – Keunggulan PLTH Sistem Tersaklar

Keunggulan yang dapat diperoleh jika menggunakan sistem ini adalah :

- Inverter dapat membangkitkan gelombang sinus, kotak termodifikasi atau kotak tergantung pada aplikasi
- genset dapat mensuplai beban secara langsung, sehingga meningkatkan efisiensi sistem total dan mengurangi konsumsi BBM.

Kelemahan – Kelemahan PLTH Sistem Tersaklar

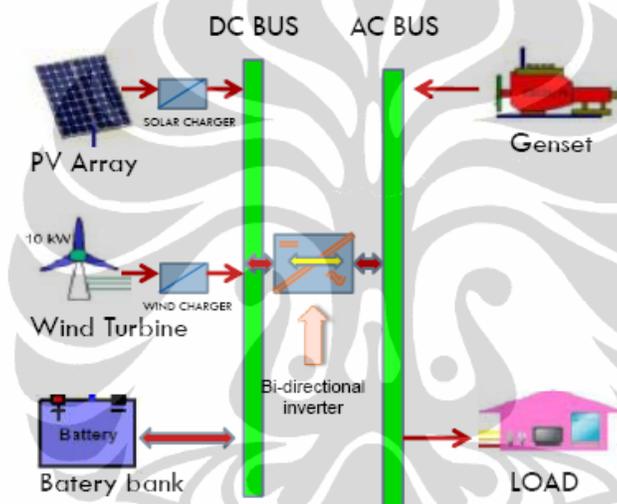
Sedangkan kelemahannya adalah :

- daya ke beban terinterupsi sesaat ketika terjadi pemindahan sumber listrik AC,
- genset dan inverter didisain untuk dapat mensuplai beban puncak, berakibat menurunnya efisiensi pada sebagian operasi beban.

2.5.2.3 PLTH Sistem Paralel

Prinsip Kerja PLTH Sistem Paralel

Pada PLTH yang menggunakan sistem ini, beban dapat disuplai baik dari genset maupun inverter secara paralel. *Bi-directional inverter* (BDI) digunakan untuk menjembatani antara baterai dan sumber AC, BDI dapat mengisi baterai dari genset (*AC-DC converter*) maupun sumber energi terbarukan, juga dapat beraksi sebagai *DC-AC converter*, sumber ET dihubungkan pada sisi DC, sistem ini terbagi lagi menjadi dua jenis yaitu sistem paralel *AC Coupling* dan sistem paralel *DC Coupling*.



Gambar 2.10 PLTH Sistem Paralel

Sumber : Rosyid, A., (2008) PLTH Wini. Balai Besar Teknologi Energi – BPPT. Tangerang