

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Kebutuhan dan penyediaan energi listrik dengan mengimplementasikan sumber energi baru terbarukan sangat perlu dikembangkan. Salah satu faktor yang melatarbelakangi pengembangan energi baru terbarukan adalah faktor lingkungan. Sehingga penggunaan energi fosil untuk energi listrik bisa dikurangi dengan mengarahkan pada pembangkitan energi listrik dengan *green technology*.

Penelitian mengenai prakiraan kebutuhan energi listrik dimasa depan dengan pengoptimalan pemanfaatan energi baru terbarukan sudah pernah dibuat dengan studi kasus beberapa kota di Indonesia. Berikut akan dipaparkan beberapa penelitian yang berkaitan dan dijadikan sebagai sumber referensi dalam tugas akhir ini:

Rahmat Adiprasetya Al Hasibi (2012) dengan judul penelitian Analisis Skenario dan Permintaan Energi Listrik Sistem Inter Koneksi Jawa-Madura-Bali. Dalam penelitian ini, analisis terhadap skenario permintaan energi listrik dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak LEAP. Di dalam model LEAP yang dikembangkan, skenario disusun baik dari sisi permintaan maupun penyediaan energi listrik. Skenario referensi disusun sebagai gambaran permintaan dan penyediaan energi listrik tanpa intervensi kebijakan yang berbeda dengan tahun dasar. Dari sisi permintaan energi listrik, skenario terdiri dari skenario referensi dan konservasi. Di dalam skenario konservasi, strategi dan kebijakan tentang konservasi energi disimulasikan untuk memperoleh dampak dari kegiatan konservasi energi terhadap permintaan energi listrik.

Agus Sofyan F. Rajagukguk (2015) dengan judul penelitian Kajian Perencanaan Kebutuhan dan Pemenuhan Energi Listrik di Kota Manado. Dalam penelitian ini dilakukan proyeksi konsumsi energi listrik, jumlah pelanggan listrik, produksi energi listrik dan beban puncak di Kota Manado tahun 2014 sampai 2023 menggunakan perangkat lunak *Long-range Energy Alternatives Planning System* (LEAP). Selain itu, dilakukan juga perencanaan pengembangan pembangkit yang sesuai untuk memenuhi kebutuhan energi listrik Kota Manado.

Dani Wahyudin (2016) dengan judul penelitian Pemanfaatan Biomassa Limbah Industri Kelapa Sawit Dalam Perencanaan Pengembangan Kapasitas Pembangkit Listrik Di Wilayah Jambi. Objek penelitian yaitu limbah industri kelapa sawit di Wilayah Jambi. Metode penelitian ini adalah studi kepustakaan. Data diperoleh dari penelitian-penelitian sebelumnya maupun pedoman energi terbarukan yang dikeluarkan oleh ESDM (Energi dan Sumber Daya Mineral). Alat penelitian menggunakan *Long-range Energy Alternatives Planning* (LEAP). Data yang diperoleh dianalisis secara deskriptif kuantitatif. Proyeksi permintaan energi di Jambi tahun 2024 mencapai 1.928,7 GWh dan proyeksi pembangkit yang dikembangkan menghasilkan energi sebesar 2.242,4 GWh, terdapat selisih 313,7 GWh yang dapat dimanfaatkan lebih lanjut oleh pemerintah Jambi maupun digunakan oleh wilayah lain melalui jaringan interkoneksi. Pertumbuhan emisi diprediksi tumbuh 6,7% pertahun bila tanpa energi terbarukan dan menjadi 6,2% pertahun bila digunakan energi terbarukan, sehingga tingkat pertumbuhan emisi turun sebesar 0,5%.

Andreas Hari Murti (2016) dengan judul penelitian Potensi Dan Peran Energi Terbarukan Dalam Memenuhi Kebutuhan Energi Listrik Dan Menurunkan Emisi Gas Rumah Kaca Di Provinsi Lampung. Prediksi atau ramalan sangat dibutuhkan untuk memperkirakan dengan tepat seberapa besar daya listrik yang dibutuhkan untuk melayani beban dan kebutuhan energi dalam distribusi energi listrik. Karena selain faktor teknis, faktor ekonomi juga merupakan faktor terpenting yang perlu diperhitungkan. Selain itu eksploitasi sumber-sumber energi terbarukan yang ada juga dapat dimanfaatkan seoptimal mungkin dan dapat dikembangkan. Karena sumber energi terbarukan bersifat ramah terhadap lingkungan serta pengembangan energi terbarukan dapat digunakan untuk mengurangi ketergantungan terhadap energi listrik yang berasal dari pembangkit listrik dengan bahan bakar fosil, seperti minyak diesel dan minyak bakar. Sehingga sumber energi terbarukan diharapkan memiliki peran aktif dalam skenario diversifikasi energi dimasa yang akan datang.

Muhammad Irfan Alfarisi (2016) dengan judul penelitian Perencanaan Penyediaan dan Kebutuhan Energi Listrik Selama 10 Tahun Dengan

Mengoptimalkan Sumber Energi Terbarukan. Dalam sistem kelistrikan proyeksi atau ramalan sangat dibutuhkan untuk memperkirakan dengan tepat seberapa besar daya listrik yang dibutuhkan untuk melayani beban dan kebutuhan energi dalam distribusi energi listrik. Karena selain faktor teknik, faktor ekonomi juga merupakan faktor penting yang perlu diperhitungkan. Selain itu pengoptimalan potensi-potensi sumber energi ini bersifat ramah terhadap lingkungan dan memiliki cadangan yang tidak pernah habis serta pengembangan energin terbarukan dapat digunakan untuk mengurangi ketergantungan terhadap energi listrik yang bersal dari pembangkit listrik dengan bahan bakar fosil, seperti minyak diesel dan minyak bakar. Sehingga sumber energi terbarukan diharapkan memiliki peran aktif dalam skenario diversifikasi energi dimasa yang akan datang.

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Energi Baru Terbarukan (EBT)

Secara sederhana, energi terbarukan didefinisikan sebagai energi yang dapat diperoleh ulang (terbarukan) seperti sinar matahari dan angin. Sumber energi terbarukan adalah sumber energi ramah lingkungan yang tidak mencemari lingkungan dan tidak memberikan kontribusi terhadap perubahan iklim dan pemanasan global seperti pada sumber-sumber tradisional lain. Ini adalah alasan utama mengapa energi terbarukan sangat terkait dengan masalah lingkungan dan ekologi di mata banyak orang.

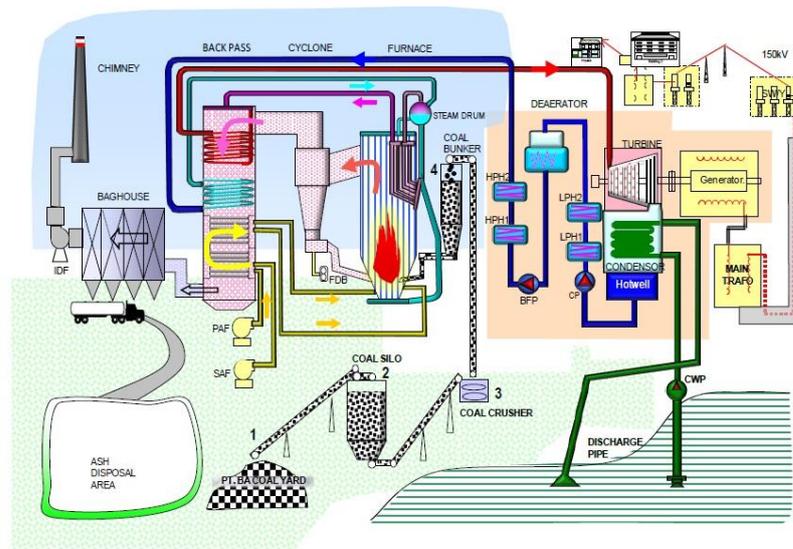
Energi terbarukan di Indonesia terdiri dari energi surya, energi angin, biomassa, energi air, dan panas bumi. Energi surya di Indonesia menggunakan Solar PV yang memanfaatkan komponen cahaya matahari secara langsung untuk membangkitkan listrik. Kecepatan angin di Indonesia memiliki potensi yang besar terutama di daerah pesisir. Biomassa merupakan energi yang diperoleh dari sumber biologis sebagai contoh kotoran hewan dan sisa tumbuhan. Potensi ini khususnya berasal dari industri gula, minyak kelapa sawit, dan kayu. Energi air juga memiliki potensi yang besar namun debit air yang fluktuatif menyebabkan listrik yang dihasilkan tidak stabil. Potensi panas bumi Indonesia mencapai 29 GW (terbesar di dunia) namun kapasitas yang terpasang masih sebesar 1.341 W (4,6%). Potensi besar ini karena Indonesia merupakan jalur gunung api (*ring of fire*). Jika

pemanfaatan energi baru terbarukan ini optimal, rasio elektrifikasi nasional bisa mencapai 100%.

2.2.2 Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU)

Pembangkit listrik tenaga uap adalah sebuah pembangkit yang memanfaatkan energi panas yang kemudian dikonversikan menjadi uap yang nantinya digunakan untuk memutar turbin dan menggerakkan generator untuk mengkonversi energi kinetik menjadi energi listrik. PLTU pada umumnya menggunakan bahan bakar primer seperti batubara, gas, bbm, dan bahan bakar primer lainnya. Dimana bahan bakar ini diubah menjadi energi panas melalui reaksi antara bahan bakar, udara, dan panas, atau biasa disebut proses pembakaran. Energi panas ini kemudian digunakan untuk memanaskan air yang ada pada pipa boiler sehingga boiler akan menghasilkan uap air yang memiliki tekanan.

Uap bertekanan ini akan disalurkan menuju turbin uap yang nantinya akan memutar turbin, karena poros turbin dihubungkan dengan generator maka generator ikut berputar sesuai dengan putaran turbin. Generator nantinya akan mengkonversi energi kinetik yang dihasilkan turbin menjadi energi listrik, yang kemudian disalurkan menuju jalur transmisi dan menuju sumber-sumber beban atau pelanggan energi listrik. Dapat dilihat pada gambar 2.1 dimana proses konversi energi pada PLTU.



Gambar 2.1 Proses Konversi Energi PLTU

Sumber: Badan Pengkajian Dan Penerapan Teknologi (BPPT)

Sistem kerja dari PLTU yaitu dimana boiler diisi air hingga penuh hingga seluruh permukaan pemindah panas, kemudian boiler dipanaskan oleh energi panas dari hasil pembakaran bahan bakar. Sehingga dari hasil pemanasan tersebut dihasilkan uap air hasil produksi pemanasan boiler, dimana uap ini memiliki tekanan yang nantinya disalurkan menuju turbin uap sehingga turbin akan berputar dan menghasilkan energi kinetik. Generator nantinya dikopel dengan poros turbin sehingga generator akan ikut berputar dan menghasilkan energi listrik, hal ini disebabkan oleh perputaran medan magnet dalam kumparan. Sehingga bila generator berputar maka medan magnet didalam generator ikut berputar dan menghasilkan energi listrik dan dialirkan menuju terminal output generator. Uap yang tadinya digunakan untuk memutar turbin akan dialirkan menuju kondensor untuk dilakukan proses pendinginan dengan air pendingin dan air akan berubah menjadi air seperti semula atau biasa disebut air kondensat. Kemudian air kondensat ini nantinya akan kembali digunakan untuk mengisi boiler dan dipanaskan kembali. Demikian seterusnya sehingga siklus tersebut terus berlangsung dan berulang.

Dalam siklus pemanasan oleh pembakaran bahan bakar ada beberapa tahapan yang akan dilalui air sehingga menjadi uap dan kembali lagi menjadi air. Adapun langkah yang akan dilewati adalah sebagai berikut:

1. Air akan dipompa pada tekanan rendah menuju ketekanan tinggi. Ini adalah langkah *kompresi isentropis*, dan hal ini terjadi pada pompa air pengisi.
2. Air yang memiliki tekanan kemudian dipanaskan untuk dinaikkan temperaturnya hingga mencapai titik didih air, hal ini terjadi pada LP heater, HP heater, dan Economiser.
3. Dari hasil pemanasan tersebut air berubah menjadi uap jenuh, atau biasa disebut sebagai langkah *vapourising* (penguapan) dengan proses *isobar sithermis*, hal ini terjadi pada boiler yaitu pada *wall tube (riser)* dan *steam drum*.
4. Kemudian uap jenuh ini dipanaskan kembali lebih lanjut hingga temperatur uap menjadi temperatur kerjanya dan menjadi uap panas

lanjut atau biasa disebut (*superheated vapour*). Hal ini terjadi pada *superheater boiler* dengan proses *isobar*.

5. Kemudian uap panas lanjut dialirkan menuju turbin sehingga tekanan dan temperatur uap menjadi turun. Langkah ini biasa disebut sebagai langkah *ekspansi isentropis*.
6. Uap penggerak turbin ini kemudian dialirkan menuju kondensor untuk dilakukan pendinginan sehingga air menjadi air kondensat. Langkah ini biasa disebut sebagai *isobar isothermis*.

PLTU memiliki bagian-bagian utama yang secara keseluruhan berfungsi untuk mendukung pembangkit listrik tenaga uap diantaranya adalah:

1. Boiler

Boiler berfungsi untuk menampung air yang nantinya akan dinaikkan temperaturnya menjadi uap panas lanjut (*superheated steam*) yang nantinya uap akan dialirkan menuju turbin untuk memutar turbin.

2. Turbin Uap

Turbin uap berfungsi untuk menerima tekanan uap panas yang nantinya akan dikonversikan menjadi energi putar (energi kinetik). Turbin juga akan dikopel atau disambungkan porosnya dengan generator sehingga bila turbin berputar maka generator akan ikut berputar.

3. Kondensor

Uap panas yang digunakan memutar turbin akan disalurkan menuju kondensor untuk dilakukan pendinginan sehingga kondensor berfungsi sebagai pengkondensasi uap bekas dari turbin sehingga menjadi air kondensat.

4. Generator

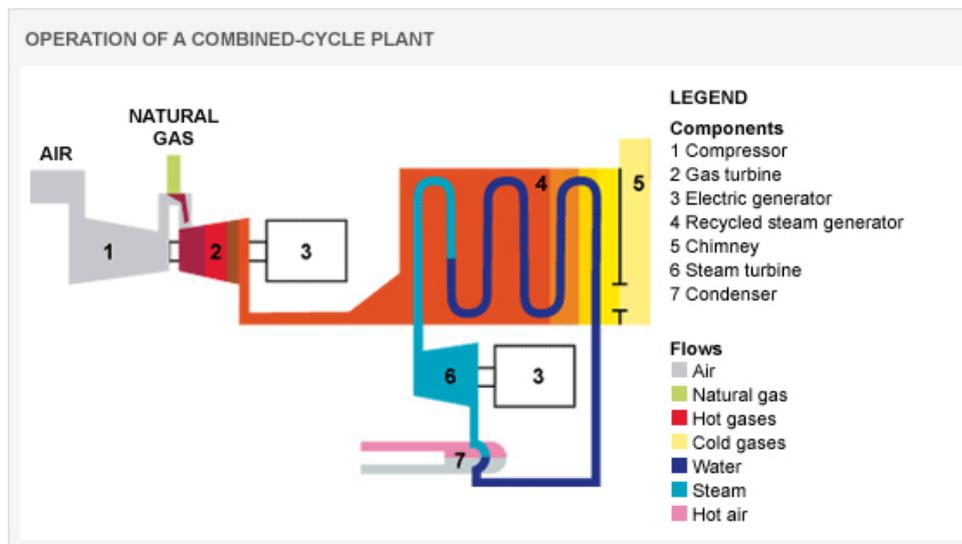
Putaran turbin nantinya akan disalurkan menuju generator dengan mengopel poros turbin dengan generator sehingga generator akan ikut berputar dan mengkonversikan energi kinetik dari turbin menjadi energi listrik.

Kebanyakan PLTU dibangun didekat laut di mana air yang digunakan untuk mengisi boiler adalah air laut, sehingga dibutuhkan alat penunjang seperti

destilation plant yang berfungsi mengubah air laut menjadi air tawar atau biasa disebut sebagai destilasi, dengan metode penyulingan. Hal ini dilakukan karena air laut memiliki sifat korosif sehingga apabila digunakan secara langsung maka akan merusak unit PLTU. Untuk PLTU yang menggunakan air tanah digunakan alat penunjang *Pre Treatment*, berfungsi untuk menghilangkan endapan, kotoran, dan mineral yang terkandung di dalam air tanah atau air sungai yang nantinya dapat merusak unit PLTU. Ada beberapa alat penunjang lainnya yaitu *Reverse Osmosis* (RO) fungsinya untuk destilasi, *Demineralizer Plant* berfungsi untuk menghilangkan kadar mineral (ion) air, *Hidrogen Plant* berfungsi untuk pendingin generator, *Chlorination Plant* berfungsi untuk melehkan mikro organisme laut pada area *water intake*, *Auxiliary Boiler* berfungsi untuk boiler bahan bakar minyak, *Coal Handling* yaitu unit yang melayani pengolahan batubara, dan yang terakhir *Ash Handling* adalah unit yang melayani pengolahan abu.

2.2.3 Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG)

Pembangkit listrik tenaga gas (PLTG) yaitu pembangkit yang memanfaatkan gas atau udara untuk memutar turbin gas. Sebelum dialirkan menuju turbin, gas atau udara diubah menjadi bertekanan tinggi dan dinaikkan temperaturnya sehingga dapat menggerakkan turbin. Turbin yang dialiri oleh gas yang bertekanan tinggi dan memiliki temperatur ini akan menghasilkan putaran atau energi kinetik, kemudian energi kinetik disalurkan menuju generator dan akan dikonversi menjadi energi listrik. PLTG memiliki beberapa komponen utama sebagai pembangkitan listrik diantaranya adalah kompresor, ruang bakar, dan turbin gas. Prinsip kerja turbin gas cukup sederhanya dimana energi panas yang dihasilkan dari proses pembakaran diubah menjadi energi kinetik dan kemudian akan dikonversikan oleh generator menjadi energi listrik. Komponen sistem pada PLTG dapat dilihat pada gambar 2.2 berikut ini.



Gambar 2.2 Komponen Sistem Kerja PLTG

Sumber: mpoweruk.com (diakses pada Sabtu, 10 Juni 2017, 13.15WIB)

Prinsip kerja dari PLTG adalah gas atau udara masuk kedalam kompresor diaman kompresor berfungsi untuk menghisap dan menaikkan tekanan udara atau gas, sehingga udara atau gas menjadi memiliki tekanan tinggi. Kemudian udara yang bertekanan tersebut dialirkan menuju ruang pembakaran dan dicampur dengan bahan bakar sehingga terjadi proses pembakaran. Dalam ruang pembakaran udara tetap dalam kompresi atau tekanan yang konstan dengan artian bahwa udara hanya dinaikkan temperaturnya. Kemudian udara yang bertekanan dan memiliki temeperatur ini dialirkan menuju sudu turbin untuk memutar turbin, sehingga terjadinya konversi udara atau gas menjadi energi kinetik. Energi kinetik ini nantinya akan digunakan untuk memutar kompresor dan memutar generator dimana generator akan mengkonversikan energi kinetik menjadi energi listrik. Setelah udara atau gas ini digunakan untuk memutar turbin maka sisanya akan dibuang melalui saluran pembuangan atau *exhaust*.

Sehingga dari penjelasan prinsip kerja diatas dapat dikelompokkan dalam beberapa langkah diantaranya adalah:

1. *Compression* (kompresi) dimana udara atau gas dihisap dan dialirkan menuju ruang pembakaran.

2. *Combustion* (pembakaran) proses dimana udara atau gas yang telah memiliki kompresi atau tekanan dicampurkan dengan bahan bakar dan kemudian dibakar di ruang pembakaran.
3. *Expansion* (pemuai) udara atau gas yang telah melalui proses pembakaran kemudian dialirkan melalui nozel.
4. *Exhaust* (pembuangan gas) gas sisa hasil pembakaran kemudian dibuang melalui saluran pembuangan.

PLTG tentunya memiliki komponen-komponen dasar yang digunakan untuk melakukan pembangkitan listrik diantaranya adalah sebagai berikut:

1. Turbin Gas

Turbin gas berfungsi untuk menerima aliran gas panas yang memiliki tekanan yang nantinya akan diarahkan menuju sudu turbin, sehingga turbin akan bergerak atau berputar dan menghasilkan energi kinetik. Di dalam terdapat sudu diam dan sudu gerak dan terjadi perubahan energi ketika melewati keduanya. Ketika melewati sudu diam tekanan gas turun namun kecepatan gas meningkat, dan ketika mendorong sudu gerak maka tekanan serta kecepatan gas turun.

2. Kompresor

Fungsi utamanya adalah untuk menghisap udara dan membuatnya menjadi bertekanan yang nantinya digunakan untuk pembakaran dan pendinginan.

3. Ruang Pembakaran

Ruang pembakaran berfungsi sebagai tempat terjadinya proses pencampuran antara udara dan bahan bakar dimana kemudian terjadi pembakaran, atau biasa disebut sebagai *Combustion Chamber*.

4. Generator

Seperti generator pada umumnya yaitu berfungsi sebagai pengkonversi energi kinetik menjadi energi listrik, dimana poros turbin gas dikopel dengan generator.

2.2.4 Pembangkit Listrik Tenaga Gas Uap (PLTGU)

PLTGU adalah gabungan antara PLTG dan PLTU, di mana PLTG menggunakan gas bertekanan dan dipanaskan digunakan untuk memutar turbin. Panas dari sisa gas pemutar turbin dari PLTG digunakan untuk memanaskan boiler untuk menghasilkan uap yang digunakan sebagai penggerak turbin uap pada PLTU. Gas sisa pemutar turbin gas PLTG yang bersuhu tinggi ini akan di alirkan ke *heat recovery steam generator* untuk memanaskan air pada boiler PLTU sehingga menghasilkan uap dengan tekanan tinggi. Uap hasil pemanasan boiler ini selanjutnya dialirkan menuju turbin uap untuk memutar turbin. Bisa dikatakan bahwa PLTGU adalah gabungan kedua pembangkit tersebut, sehingga gas sisa pemutar turbin gas tidak terbuang sia-sia dan bisa dimanfaatkan untuk pemanasan boiler PLTU. PLTGU sendiri memiliki beberapa komponen utama yang digunakan untuk menunjang pembangkitan listrik diantaranya adalah sebagai berikut:

1. Sistem Generator Turbin Gas (*Gas Turbine Generator*)

Komponennya sesuai dengan PLTG karena prinsipnya PLTGU adalah gabungan antara PLTG dan PLTU. Dimana komponennya adalah sebagai berikut:

- a. Turbin gas, berfungsi sebagai pengkonversi tekanan gas menjadi energi kinetik.
- b. Kompresor, berfungsi untuk menghisap dan menyalurkan udara atau gas dengan tekanan tinggi.
- c. Ruang pembakaran, dimana gas yang memiliki tekanan dicampur dengan bahan bakar dan dibakar pada ruang pembakaran sehingga gas atau udara memiliki tekanan dan panas.
- d. Generator, dari hasil putaran turbin gas kemudian dikonversikan oleh generator menjadi energi listrik.

2. *Heat Recovery Steam Generator* (HRSG)

Energi panas yang masih terkandung dalam gas sisa pembuangan PLTG dimana memiliki temperatur yang masih tinggi sekitar 563°C dialirkan melalui HRSG untuk memanaskan air pada boiler. Kemudian sistemnya akan sama seperti PLTU di mana uap akan di pisahkan dengan air

menggunakan *superator*, uap yang sudah terpisah ini kemudian digunakan untuk menggerakkan turbin uap. Air hasil dari pemisahan kemudian dialirkan kembali menuju boiler bersama air pengisian baru, dan begitu seterusnya berulang.

3. Sistem Generator Turbin Uap (*Steam Turbine Generator*)

Komponennya sesuai dengan PLTU karena prinsipnya PLTGU adalah gabungan antara PLTG dan PLTU. Dimana komponennya adalah sebagai berikut:

a. Boiler

Boiler berfungsi untuk menampung air yang nantinya akan dinaikkan temperaturnya menjadi uap panas lanjut (*superheated steam*) yang nantinya uap akan dialirkan menuju turbin untuk memutar turbin.

b. Turbin Uap

Turbin uap berfungsi untuk menerima tekanan uap panas yang nantinya akan dikonversikan menjadi energi putar (energi kinetik). Turbin juga akan dikopel atau disambungkan porosnya dengan generator sehingga bila turbin berputar maka generator akan ikut berputar.

c. Kondensor

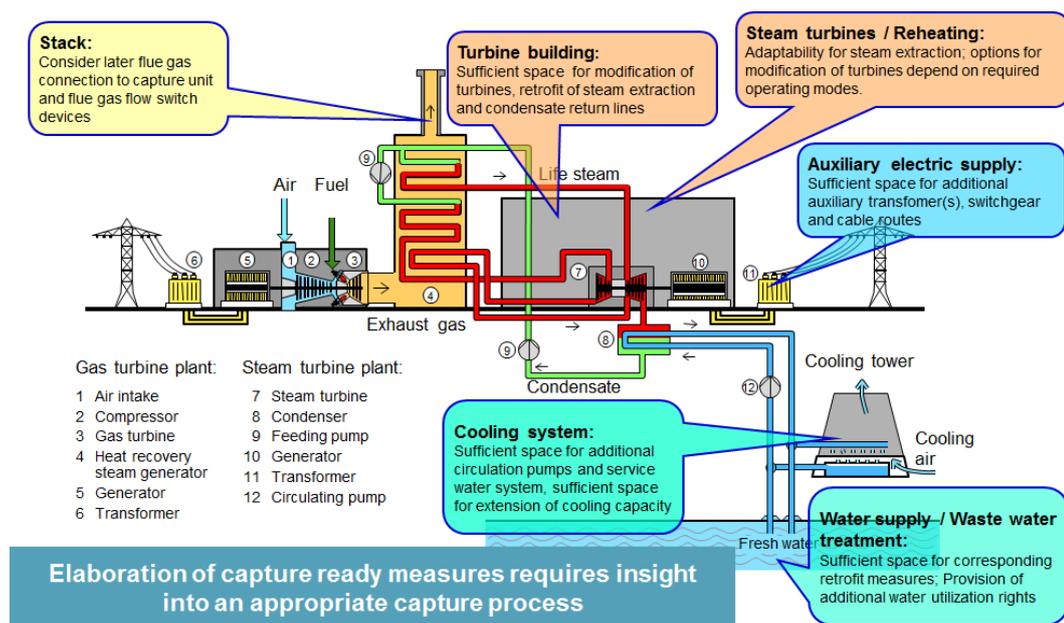
Uap panas yang digunakan memutar turbin akan disalurkan menuju kondensor untuk dilakukan pendinginan sehingga kondensor berfungsi sebagai pengkondensasi uap bekas dari turbin sehingga menjadi air kondensat.

d. Generator

Putaran turbin nantinya akan disalurkan menuju generator dengan mengopel poros turbin dengan generator sehingga generator akan ikut berputar dan mengkonversikan energi kinetik dari turbin menjadi energi listrik.

Maka dengan melihat komponen dasar yang digunakan pada PLTGU prinsip kerjanya dapat dioperasikan unit turbin gas atau PLTG terlebih dahulu untuk menghasilkan gas buang yang nantinya dapat digunakan untuk memanaskan boiler PLTU sehingga dapat digunakan untuk memutar unit turbin uap. Gas buang dari

turbin gas yang masih mengandung energi panas tinggi dialirkan ke HRSG untuk memanaskan air pada boiler PLTU sehingga dihasilkan uap. Setelah uap yang dihasilkan sudah cukup banyak kira-kira 6 jam kemudian maka uap dari boiler dapat dialirkan menuju turbin uap. Prinsip kerja PLTGU dapat dilihat pada gambar 2.3 dibawah ini.



Gambar 2.3 Prinsip Kerja PLTGU

Sumber: energy.siemens.com (diakses pada Sabtu, 10 Juni 2017, 15.00 WIB)

Dalam produksi tenaga listrik PLTGU memiliki 2 siklus yaitu siklus terbuka (*open cycle*) dan siklus tertutup (*close cycle*) dimana keduanya akan dijabarkan pada penjelasan dibawah ini:

1. Siklus Terbuka (*Open Cycle*)

Siklus ini merupakan proses produksi listrik dimana gas pembuangan dari turbin gas PLTG langsung dibuang menuju udara bebas melalui saluran pembuangan. Gas pembuangan ini mempunyai temperatur yang cukup tinggi yaitu sekitar 550°C. Sehingga bisa dikatakan bahwa siklus ini adalah siklus pada pembangkitan listrik turbin gas atau PLTG.

2. Siklus Tertutup (*Closed Cycle*)

Siklus ini adalah kebalikan dari siklus tertutup dimana sisa gas pembuangan dari turbin gas dimanfaatkan dan disalurkan melalui HRSG dan digunakan untuk memanaskan boiler PLTU sehingga akan menghasilkan uap dan dapat digunakan untuk menggerakkan turbin uap atau PLTU.

2.2.5 Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA)

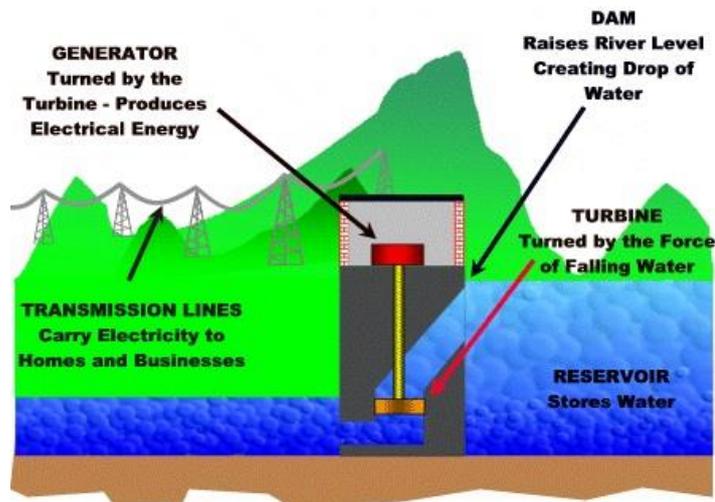
Pembangkit listrik tenaga air atau biasa disebut PLTA adalah salah satu pembangkit yang sudah banyak di gunakan di dunia maupun di Indonesia, terutama negara yang memiliki potensi air yang melimpah seperti Indonesia. PLTA adalah pembangkit listrik yang memanfaatkan tenaga air untuk menggerakkan turbin yang disambungkan dengan generator. Dimana nantinya energi kinetik yang dihasilkan oleh tekanan air terhadap turbin akan dikonversikan oleh generator menjadi energi listrik, yang selanjutnya akan disambungkan menuju jalur transmisi dan akan didistribusikan ke sumber-sumber beban.

Pembangkit ini memanfaatkan tenaga terjun air untuk memutar turbin dimana turbin menghasilkan energi gerak (kinetik) kemudian energi kinetik dari turbin diubah menjadi energi listrik oleh generator, dapat dirumuskan hasil dari terjun air ini menjadi energi kinetik maka daya yang dihasilkan generator dari putaran turbin dapat dihitung dengan persamaan 2.1 berikut ini:

$$P = 9,8 \times Q \times Hn \times h \text{ (KWatt)} \quad (2.1)$$

dimana:

- P = Daya (kW)
- Q = Debit Air (m³/detik)
- Hn = Tinggi Terjun Air (meter)
- 9,8 = Konstanta
- h = Efisiensi Keseluruhan



Gambar 2.4 Proses Konversi Energi pada PLTA

Sumber: Knowledge Center PT Pembangunan Perumahan (Persero) Tbk

Maka dengan melihat gambar 2.4, PLTA memiliki komponen dasar untuk merubah energi terjun air menjadi energi kinetik oleh turbin kemudian menjadi energi listrik oleh generator. Sebuah pusat listrik tenaga air terdiri atas bendungan, turbin, generator, dan transmisi.

a. Komponen Dasar PLTA

1. Bendungan

Bendungan adalah sebuah konstruksi yang dibangun untuk menampung ataupun menahan debit air pada sumber air. Bendungan disebut juga dam, waduk, dan biasa menjadi tempat wisata warga sekitar. Fungsi utamanya adalah sebagai penampung air untuk irigasi sawah sekitar bendungan, disisi lain bisa difungsikan untuk menyuplai air untuk PLTA.

2. Turbin

Turbin adalah komponen PLTA yang berfungsi merubah energi potensial air menjadi energi kinetik, dimana turbin memiliki sudu-sudu yang nantinya akan menerima terjunan air sehingga memutar turbin. Turbin sendiri memiliki beberapa komponen yang akan mensuplai air menuju turbin yaitu sudu (*runner*), pipa pesat, alat pengaman, poros, bantalan, dan distributor listrik.

Dilihat dari besarnya tinggi terjun air, maka turbin dibagi menjadi dua jenis yaitu turbin reaksi dan turbin impuls. Turbin reaksi bekerja karena adanya tekanan air, sedangkan turbin impuls bekerja karena kecepatan air yang menghantam sudu. Maka apabila dilihat dari tinggi terjun air dapat dijelaskan sebagai berikut:

a. Turbin Pelton (Jenis Turbin Impuls)

Turbin ini memiliki satu atau beberapa pipa pesat yang menyemburkan air memutar sudu turbin. Ketinggian terjun air untuk turbin ini adalah 200-2000 meter dengan debit air sebesar $4-15\text{m}^3/\text{detik}$ sehingga turbin ini cocok untuk PLTA di pegunungan yang tinggi.

b. Turbin Cross Flow (Jenis Turbin Impulse)

Turbin jenis ini aliran air mengalir secara melintang di mana turbin ini didesain untuk digunakan pada debit air yang lebih besar dan terjun air yang lebih rendah dibandingkan Pelton, terjun airnya kurang dari 200 meter.

c. Turbin Propeller (Jenis Turbin Reaksi)

Turbin propeller biasanya memiliki beberapa sudu, pada umumnya antara 3 sampai dengan 6 blade dan aliran air mengenai semua blade dengan konstan. Ada beberapa jenis turbin propeller diantaranya: turbin bulb, turbin Straflo, turbin tube dan turbin KAPLAN.

d. Turbin Francis (Jenis Turbin Reaksi)

Turbin jenis ini memiliki sudu turbin dengan baling-baling tetap, pada umumnya berjumlah 9 atau lebih. Air dimasukkan tepat di atas sudu turbin kemudian mengelilingi sudu dan jatuh melalui sudu sehingga memutar turbin.

e. Turbin Kinetic (Jenis Turbin Reaksi)

Turbin jenis ini sering disebut juga sebagai turbin aliran bebas yang memanfaatkan jalur alami aliran air, di mana turbin bisa beroperasi di sungai, saluran buatan manusia, air pasang surut, atau arus laut.

3. Generator

Generator berfungsi merubah energi kinetik dari putaran turbin menjadi energi listrik. Nantinya generator dihubungkan dengan poros turbin di mana

energi kinetik yang dihasilkan turbin memutar kumparan yang berada di dalam generator sehingga terjadi pergerakan elektron yang menghasilkan listrik bolak balik (AC). Dimana putaran rotor dipengaruhi oleh frekuensi dan jumlah kutub pada rotor dan dapat di hitung dengan persamaan 2.2 berikut ini:

$$n = \frac{f}{P} \quad (2.2)$$

dimana:

n = Putaran

f = Frekuensi

P = Jumlah Kutub

3. Transformator

Transformator atau trafo berfungsi untuk menaikkan tegangan arus bolak balik (AC) sehingga apabila nantinya dialirkan ke jalur transmisi listrik tidak banyak terbuang, transformator yang digunakan adalah tipe step up. Jalur transmisi adalah jalur yang digunakan untuk mengalirkan listrik dari pusat pembangkitan menuju ke sumber-sumber beban atau pelanggan energi listrik. Sebelum dialirkan ke pelanggan nantinya energi listrik akan diturunkan dengan transformator step down, sesuai dengan kebutuhan untuk rumah tangga ataupun untuk industri.

b. Jenis PLTA

1. PLTA Terusan Air (*Water Way*)

PLTA ini memanfaatkan aliran sungai yang ada dimana tempat penyuplai air berada di hulu sungai dan mengalirkan air dengan kemiringan tertentu. Sehingga PLTA jenis ini memanfaatkan sungai yang memiliki kemiringan sungai.

2. PLTA Bendungan / Dam

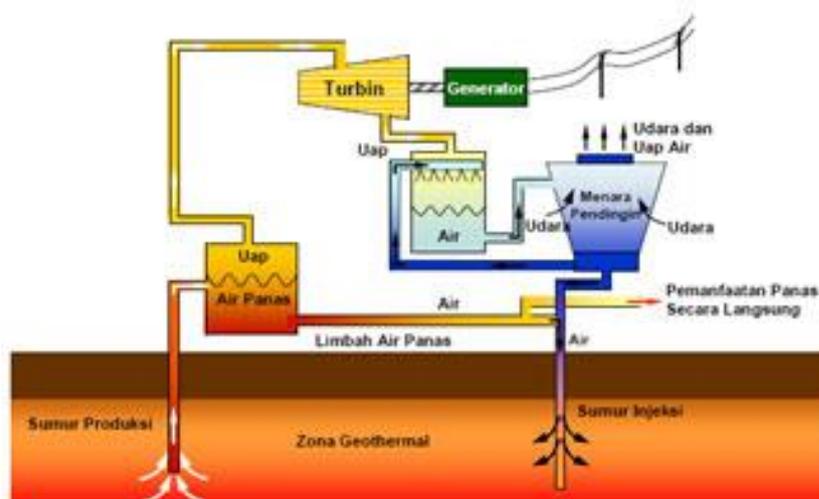
PLTA jenis ini memanfaatkan bendungan untuk menampung lebih banyak air sehingga meningkatkan energi potensial air menjadi tinggi, dengan membendung aliran sungai atau sumber air yang ada.

3. PLTA Terusan dan Bendungan (Campuran)

PLTA jenis ini menggabungkan antara PLTA terusan dan PLTA bendungan, sehingga energi potensial yang diperoleh berasal dari bendungan dan terusan.

2.2.6 Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP)

PLTP sesungguhnya adalah sebuah PLTU, hanya saja uapnya didapat dari perut bumi. Oleh karena itu, PLTP umumnya terletak di pegunungan dan di dekat gunung berapi. Pada gambar 2.5, uap masuk di bagian tengah kemudian mengalir ke kiri dan ke kanan (aliran ganda). Uap didapat dari suatu kantong uap didalam perut bumi. Kantong uap ini terbentuk dalam tanah diatas lapisan batuan yang keras dan ada diatas magma. Di atas lapisan batuan yang keras ini, terdapat rongga yang mendapat air dari lapisan humus di bawah hutan yang menahan air hujan. Dalam rongga ini air menjadi uap sehingga rongga ini menjadi rongga berisi uap (menyuplai ketel uap). Dari atas tanah dilakukan pengeboran ke arah rongga yang berisi uap ini sehingga uap menyembur ke atas permukaan bumi. Semburan uap ini kemudian diarahkan (dialirkan) ke turbin uap penggerak generator. Setelah menggerakkan turbin, uap diembunkan dalam kondensor, disuntikkan kembali ke perut bumi menuju rongga uap tersebut diatas sehingga didapat siklus uap dan air yang tertutup.



Gambar 2.5 Skema Sirkuit Uap dan Air Pada PLTP

Sumber: geothermalindonesia.com (diakses pada Minggu, 11 Juni 2017, 12.30WIB)

Tekanan uap yang didapat dari perut bumi umumnya hanya berkisar pada 20 kg/cm^2 , sedangkan tekanan uap pada PLTU konvensional dapat mencapai 100 kg/cm^2 . Hal ini menyebabkan turbin uap PLTP mempunyai dimensi yang relatif besar dibandingkan turbin uap PLTU konvensional. Selain itu, uap dari perut bumi kebanyakan mempunyai kandungan belerang yang relatif tinggi sehingga hal ini perlu diperhitungkan pada material turbin. Karena jumlah kandungan uap dalam suatu rongga uap (seperti tersebut di atas) jumlahnya terbatas, maka daya PLTP yang dibangun harus disesuaikan dengan perkiraan kandungan uap ini. Di lain pihak, peralatan sebuah PLTP diperkirakan mempunyai umur ekonomis sekitar 20 tahun. Oleh karena itu, PLTP harus dibangun dengan daya terpasang sedemikian sehingga pemakaian uapnya tidak menghabiskan kandungan uap yang tersedia dalam waktu kurang dari 20 tahun.

Operasi PLTP lebih sederhana dari operasi PLTU karena pada PLTP tidak ada ketel uap. Biaya operasinya lebih kecil dibanding biaya operasi PLTU karena tidak ada pembelian bahan bakar. Tetapi biaya investasinya lebih tinggi karena penemuan kantong uap dalam perut bumi memerlukan biaya eksplorasi dan pengeboran tanah yang tidak kecil.

Seringkali pengeboran dan penyediaan uap dilakukan oleh perusahaan pertambangan, misalnya Pertamina, kemudian uap dibeli oleh perusahaan listrik, misalnya PLN. Dalam hal demikian, perusahaan listrik harus memperhitungkan biaya uap sebagai biaya operasi yang belum tentu lebih murah daripada biaya bahan bakar PLTU.

Masalah lingkungan PLTP yang memerlukan perhatian adalah masalah kebisingan dan masalah uap yang mengandung belerang yang dalam udara dapat menghasilkan gas H_2S yang baunya busuk. Bahan ikutan pada uap yang berasal dari perut bumi ini dapat juga diproses untuk dipisahkan sehingga PLTP dapat mempunyai produk sampingan seperti belerang.

2.2.7 Pembangkit Listrik Tenaga Biogas (PLTBg)

Biogas dapat digunakan dalam cara yang sama seperti gas alam di kompor gas, lampu atau sebagai bahan bakar untuk mesin. Kandungan terdiri dari 50-75% metana, 25-45% karbon dioksida, uap air 2-8% dan lainnya O_2 N_2 , NH_3 H_2 H_2S .

Bandingkan dengan gas alam, yang berisi 80 sampai 90% metana. Kandungan energi dari gas yang terutama tergantung pada kandungan metana nya yang tinggi sangat dibutuhkan. Namun biogas juga terdapat kandungan karbon dioksida, uap air dan gas belerang yang harus diminimalkan terutama untuk digunakan dalam mesin. Nilai kalor rata-rata biogas adalah sekitar 21-23,5 MJ / m³, sehingga 1 m³ biogas sesuai dengan bahan bakar diesel 0,5-0,6 l atau sekitar 6 kWh (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, 2009).

Secara teori, biogas dapat dikonversi langsung menjadi listrik dengan menggunakan sel bahan bakar. Namun, proses ini memerlukan gas sangat bersih dan sel bahan bakar mahal. Oleh karena itu, opsi ini masih menjadi bahan untuk penelitian dan saat ini tidak digunakan sebagai pembangkit listrik. Konversi biogas untuk listrik oleh generator set jauh lebih praktis. Berbeda dengan gas alam, biogas ditandai dengan resistensi ketukan tinggi dan karenanya dapat digunakan di motor pembakaran dengan tingkat kompresi yang tinggi.

a. Biogas

Gas yang dihasilkan dari proses fermentasi oleh mikroba terhadap bahan-bahan organik biasanya diawali dengan pembusukan, dimana hal ini terjadi karena dipengaruhi oleh suhu, kelembaban, dan keasaman. Bahan atau semua limbah organik sebenarnya dapat dimanfaatkan menjadi biogas namun sejauh ini hanya kotoran dan urin ternak saja yang banyak dimanfaatkan menjadi biogas sederhana. Hasil dari fermentasi limbah organik ini nantinya akan menghasilkan gas metana yang bisa digunakan sebagai biogas. Disisi lain jenis limbah organik juga turut mempengaruhi cepat tidaknya proses fermentasi yang dilakukan, selain itu ada parameter lain yang juga mempengaruhi diantaranya temperatur digester, tingkat keasaman (ph), tekanan dan kelembaban udara.

b. Digester

Melihat potensi peternakan di Indonesia yang sangat besar maka jenis sumber energi terbarukan biogas ini bisa dijadikan sebagai penyediaan energi listrik terutama wilayah yang memiliki ternak yang banyak, sehingga limbah kotoran ternak yang ada dapat dimanfaatkan. Untuk mengubah limbah kotoran ternak

menjadi sumber energi pembangkit listrik dibutuhkan sebuah digester penampung limbah organik.

Digester adalah bangun ruang atau tandon sebagai tempat pemrosesan limbah organik dimana nantinya akan terjadi fermentasi oleh mikroba yang akan menguraikan limbah isian tersebut sehingga menghasilkan gas bio atau gas methana. Digester merupakan salah satu komponen PLTBg dimana nantinya limbah organik akan dikonversi menjadi gas bio atau gas methana. Proses fermentasi memerlukan waktu 4-5 hari setelah digester diisikan, dan proses fermentasi mencapai puncaknya pada hari ke 20-25.

c. Jenis Digester

Konstruksi digester dibedakan menjadi beberapa jenis diantaranya:

1. *Fixed dome*, dimana tandon digester jenis ini memiliki volume yang tetap atau fix sehingga apabila gas yang diproduksi di dalam digester sudah penuh, maka gas harus segera dialirkan keluar menuju ke pengumpul gas karena bila dibiarkan akan terjadi ledakan. Karena volume digester yang sudah tidak dapat menampung gas hasil fermentasi.
2. *Floating dome*, tandon jenis ini memiliki volume yang fleksibel atau akan berubah volumenya jika gas yang dihasilkan mulai mengisi. Disisi lain proses pengumpulan gas menjadi satu dengan reaktor tersebut.

Bahan baku akan dialirkan menuju digester dengan dua jenis aliran diantaranya adalah:

1. Bak (*batch*), dengan menggunakan jenis aliran ini maka bahan baku akan ditempatkan pada tandon atau bangunruang dari awal hingga selesai proses digesti atau fermentasi oleh mikroba. Untuk mengetahui potensi dari suatu bahan atau limbah organik maka banyak digunakan aliran bahan baku jenis ini.
2. Mengalir (*continuous*), tipe ini mengalir bahan baku masuk dan residu keluar pada selang waktu tertentu. Sehingga aliran bahan baku tidak langsung dikumpulkan dalam satu wadah namun sedikit demi sedikit dengan selang waktu tertentu sehingga menghasilkan residu.

Tata letak penempatan digester juga ikut andil mempengaruhi proses digesti sehingga ada beberapa tipe tata letak digester diantaranya adalah:

1. Digester diletakkan pada permukaan tanah. Sering digunakan dengan skala kecil dimana tandon berasal dari bahan-bahan bekas tidak terpakai seperti tong-tong bekas minyak tanah atau aspal. Namun bila menggunakan tong maka volume yang bisa ditampung sangat kecil sehingga tidak mencukupi bila digunakan untuk banyak rumah tangga. Disisi lain sifat tong yang gampang korosi juga menjadi kelemahan lain.
2. Sebagian digester diletakkan di bawah permukaan tanah. Banyak digunakan untuk skala menengah dimana tandon atau tangki digester terbuat dari beton yang dibuat seperti sumur kemudian ditutup dengan plat baja. Bila kita menggunakan tata letak seperti ini biasanya volumenya dapat disesuaikan dengan kebutuhan. Namun kelemahan dari tipe ini adalah plat baja yang dapat merambatkan dingin menuju ruang digester sehingga dapat mempengaruhi proses fermentasi.
3. Seluruh digester diletakkan di bawah permukaan tanah. Model jenis ini banyak digunakan karena memiliki kelebihan dimana suhu yang selalu terjaga karena secara permanen tandon atau tangki digester diletakkan di bawah tanah. Sehingga tidak terpengaruh dengan keadaan di sekitar digester dan mendukung perkembangan mikroba yang akan menguraikan limbah organik.

2.2.8 Pembangkit Listrik Tenaga Sampah (PLTSa)

a. Biomasa

Pengertian biomassa secara umum biomassa merupakan bahan yang dapat diperoleh dari tanaman baik secara langsung maupun tidak langsung dan dimanfaatkan sebagai energi dalam jumlah yang sangat besar. Biomassa juga disebut sebagai “fitomassa” dan seringkali diterjemahkan sebagai bioresource atau sumber daya yang diperoleh dari hayati. basis sumber daya ini meliputi ratusan bahkan ribuan spesies tanaman daratan dan lautan, berbagai sumber pertanian, perhutanan dan limbah residu dari proses industri serta kotoran hewan.

Biomassa adalah bahan organik yang dihasilkan melalui proses fotosintetik, baik berupa produk maupun buangan. Selain digunakan untuk tujuan primer yaitu serat, bahan pangan, pakan ternak, minyak nabati, bahan bangunan dan sebagainya, biomassa juga digunakan sebagai sumber energi (bahan bakar). Pada umumnya digunakan sebagai bahan bakar adalah biomassa yang nilai ekonomisnya rendah atau merupakan limbah setelah diambil produk primernya.

Potensi biomassa di Indonesia yang biasa digunakan sebagai sumber energi jumlahnya sangat melimpah. limbah yang berasal dari hewan maupun tumbuhan semuanya potensial untuk dikembangkan. Tanaman pangan dan perkebunan menghasilkan limbah yang cukup besar, yang dapat dipergunakan untuk keperluan lain seperti bahan bakar nabati. Pemanfaatan limbah sebagai bahan bakar nabati memberikan tiga keuntungan langsung. pertama, peningkatan efisiensi energi, secara keseluruhan karena kandungan energi yang terdapat pada limbah cukup besar dan akan terbuang percuma jika tidak dimanfaatkan. Kedua, penghematan biaya, karena seringkali membuang limbah biasa lebih mahal dari pada memanfaatkannya. Ketiga, mengurangi keperluan akan tempat penimbunan sampah karena penyediaan tempat penimbunan akan menjadi lebih sulit dan mahal, khususnya di daerah perkotaan.

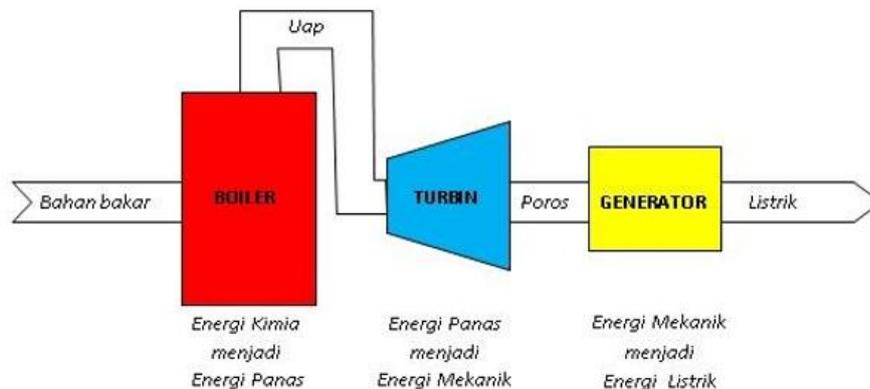
b. Prinsip Kerja

Pada dasarnya PLTSa adalah PLTU berbahan bakar sampah sehingga pada prinsip kerjanya tidaklah jauh berbeda jika dibandingkan dengan prinsip kerja PLTU pada umumnya.

Proses konversi energi pada PLTU berlangsung dengan tiga tahapan sesuai dengan gambar 2.6, yaitu:

1. Energi kimia dalam bahan bakar diubah menjadi panas dalam bentuk uap bertekanan dan bertemperatur tinggi.
2. Energi panas (uap) diubah menjadi energi mekanik dalam bentuk putaran.

3. Energi mekanik dirubah menjadi energi listrik.



Gambar 2.6 Proses Konversi Energi pada PLTSa Sama Dengan PLTU

Sumber: rakhman.net (diakses pada Sabtu, 17 Juni 2017, 12.45WIB)

c. Karakteristik Sekam Padi

Sekam padi merupakan lapisan keras yang meliputi kariopsis yang terdiri dari dua belahan yang disebut lemma dan palea yang saling bertautan. Pada proses penggilingan beras sekam akan terpisah dari butir beras dan menjadi bahan sisa atau limbah penggilingan. Sekam dikategorikan sebagai biomassa yang dapat digunakan untuk berbagai kebutuhan seperti bahan baku industri, pakan ternak dan energi atau bahan bakar. Dari proses penggilingan padi biasanya diperoleh sekam padi sekitar 20-30%.

Sekam padi, sebagian besar terdiri dari lingo-selulosa dan silika yang memiliki potensi besar sebagai sumber energi. Sekam padi dapat digunakan untuk bahan pembangkit listrik melalui jalur uap atau gasifikasi. Untuk pembangkit listrik berskala kecil, jalur gasifikasi menjadi pilihan yang tepat karena pembangkit listrik tenaga uap kecil sangat tidak efisien dan sangat sulit dipertahankan karena adanya boiler.

Berdasarkan data yang dikeluarkan oleh BioEnergy Consult, merupakan konsultan dari India yang terkenal dengan keahlian dan pengalaman yang kaya dalam bidang energi biomassa. Budidaya padi menghasilkan dua jenis residu utama yaitu jerami dan sekam padi yang memiliki potensi menarik dalam hal pembangkitan energi. Meskipun teknologi untuk pemanfaatan sekam padi telah terbukti dengan

baik di negara-negara industri Eropa dan Amerika Utara, namun teknologi tersebut belum diperkenalkan di negara berkembang dalam skala komersial. Pentingnya jerami dan sekam padi sebagai sumber energi yang atraktif dapat diukur dari statistik berikut:

1. Jerami

1 Ton padi menghasilkan 290kg jerami.

290 kg jerami bisa menghasilkan tenaga 100kWh.

Calorific value : 2400 kcal/kg.

2. Sekam padi

1 Ton padi menghasilkan 220kg sekam padi.

1 Ton sekam padi setara dengan 410-570kWh.

Calorific value : 3000 kcal/kg.

Kadar air: 5-12%.

Massa Jenis: 100kg/m³.

Menghitung massa sekam padi untuk menghasilkan energi listrik dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan 2.3 berikut ini:

$$\text{Massa Sekam Padi} = \text{Potensi sekam padi} \times \text{Massa jenis} \quad (2.3)$$

Energy content merupakan kandungan energi dari setiap bahan bakar organik yang didefinisikan sebagai energi utama bahan bakar. *Energy content* diukur berdasarkan nilai kalor bahan bakar yang dihasilkan dari pembakaran sempurna dari satu unit bahan bakar. Menghitung *energy content* dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan 2.4 berikut ini:

$$\text{Energy content} = \text{Massa Sekam Padi} \times \text{Caloric value} \quad (2.4)$$

2.3 Prinsip Kerja LEAP dalam Pemodelan Sistem Energi (Heaps, 2012)

2.3.1 Struktur LEAP

Long-range Energy Alternative Planning System atau biasa disingkat 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 disisi permintaan danpenyediaan 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:

1. Sederhana, transparan dan fleksibel, dan memerlukan data dasar yang sangat sederhana.
2. Simulasi tidak dilakukan dengan asumsi kompetisi yang ideal.
3. Dapat digunakan untuk menganalisis pemilihan teknologi atau biaya dalam pengembangan sistem energi.
4. Sangat berguna dalam aplikasi capacity building.

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

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

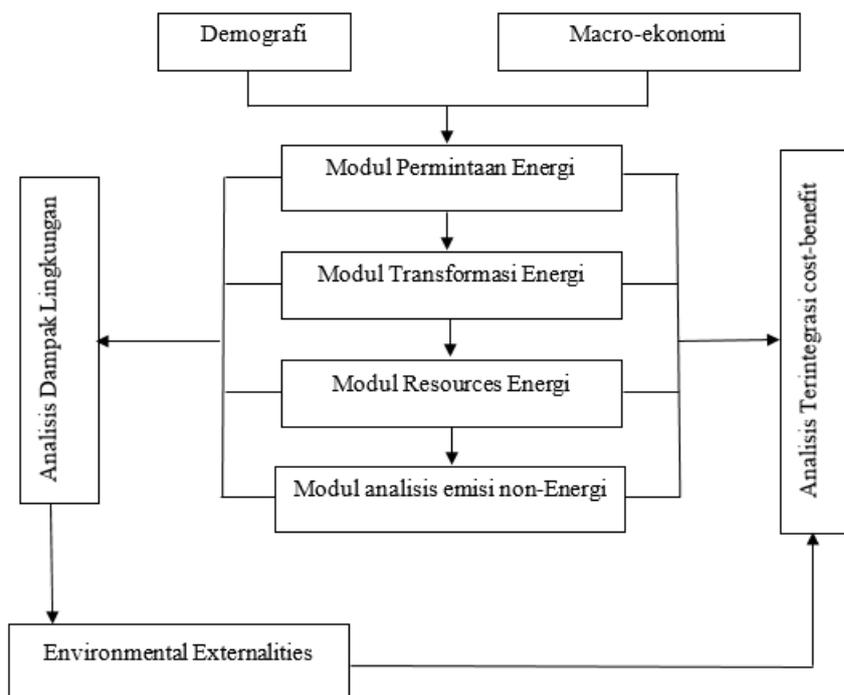
Dalam perkembangannya, LEAP sudah dapat dianggap sebagai model hybrid yang menggabungkan antara optimasi, simulasi, dan *accounting*. Untuk dapat berfungsi sebagai model hybrid, LEAP beroperasi pada dua tahapan, yaitu relasi dasar *accounting* sebagai fasilitas *built-in* dan pengguna LEAP dapat menambahkan 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 energy Modeling System* (OSeMOSYS). Hasil perhitungan optimasi

OSeMOSYS dimasukkan kembali ke LEAP untuk ditampilkan sebagai hasil dari sistem *least-cost*.

2.3.2 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 2.9. 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 menghubungkan 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. Diagram alir perhitungan di dalam LEAP dapat dilihat pada gambar 2.7 di bawah ini.



Gambar 2.7 Diagram Alir Perhitungan di Dalam LEAP

(Sumber: Heaps, 2012)

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 :

Semua biaya yang diperlukan di dalam sistem energi yang terdiri dari biaya kapital, operasi dan pemeliharaan, bahan bakar, efisiensi energi, dan dampak lingkungan.
5. Dampak lingkungan:
 - a. Semua emisi dan dampak langsung dari sistem energi.
 - b. Sumber-sumber sektor non-energi.

2.3.3 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. Setiap skenario akan mengacu pada kondisi yang didiskripsikan 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 sektor 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*.

Metode perhitungan permintaan energi dilakukan menggunakan dua pendekatan, yaitu analisis energi final dan analisis *useful energy*. Di dalam analisis energi final LEAP menghitung permintaan energi berdasarkan persamaan 2.5. Di dalam persamaan 2.5, jumlah energi yang dibutuhkan (e) berbanding lurus dengan aktivitas di sektor energi (a) dan intensitas energi akhirnya (i). Aktivitas energi direpresentasikan oleh variabel penggerak yang dapat berupa data demografi atau data makro-ekonomi. Sedangkan intensitas energi merupakan energi yang dikonsumsi per satuan aktivitasnya. Sebagai contoh, permintaan energi untuk suatu industri semen dapat ditentukan berdasarkan jumlah semen yang dihasilkan (dalam kg atau ton) dan energi yang dibutuhkan untuk menghasilkan semen per satuan berat (jumlah energi per kg semen atau per ton semen).

$$e = (a.i) \tag{2.5}$$

Metode perhitungan permintaan energi dengan pendekatan analisis *useful energy* dilakukan dengan persamaan 2.6 energi yang dibutuhkan (e) dalam persamaan 2.6 berbanding lurus dengan intensitas *useful energy* (u) dan aktivitas di sektor energi (a) serta berbanding terbalik dengan efisiensi penggunaan energi (n). Sebagai contoh, permintaan energi di sektor komersial akan berubah bergantung pada bertambahnya jumlah bangunan ($+a$), peningkatan pendapatan yang menyebabkan lebih banyak dibutuhkan pemanasan dan pendinginan ($+u$), atau

teknologi isolasi bangunan yang semakin baik ($-u$), atau bangunan menggunakan teknologi boiler listrik atau gas alam untuk menggantikan boiler BBM($+n$).

$$e = a. \left(\frac{u}{n}\right) \quad (2.6)$$

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:

1. Biaya dari sisi permintaan energi yang dapat dinyatakan dalam biaya total, biaya per aktivitas, atau biaya efisiensi energi relatif terhadap suatu skenario.
2. Biaya kapital transformasi energi.
3. Biaya tetap dan variabel operasi dan pemeliharaan.
4. Biaya sumberdaya energi primer (biaya bahan bakar).
5. Biaya sumber daya energi primer yang diimpor.
6. Keuntungan biaya dari aktivitas ekspor sumberdaya energi primer.
7. Biaya *externality* polusi dari sektor transformasi energi.
8. 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 (*annualized cost*). Metode yang digunakan dalam perhitungan biaya ini menggunakan *standard mortgage* seperti pada persamaan 2.7, 2.8 dan 2.9. Dalam persamaan 2.8 dan 2.9, i merupakan interest rate, n lifetime sistem pembangkit listrik, dan CRF adalah *capital recovery factor*.

$$\text{Annualized Cost} = \text{Total Cost} \times \text{CRF} \quad (2.7)$$

$$\text{CRF} = \frac{i \cdot k}{k - 1} \quad (2.8)$$

$$k = (1 + i)^n \quad (2.9)$$

2.3.4 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 2.10:

$$D_{b,s,t} = TA_{b,s,t} \times EL_{b,s,t} \quad (2.10)$$

Dimana:

TA : Level aktivitas.

EI : Intensitas energi.

b : Cabang yang didefinisak di dalam LEAP.

s : Skenario.

t : Tahun (dari 0 tahun dasar) sampai dengan akhir tahun simulasi.

Untuk setiap cabang yang didefinisikan, LEAP menghitung permintaan energi untuk setiap jenis bahan bakar. Dengan demikian, LEAP dapat menghitung total permintaan energi untuk setiap jenis bahan bakar tertentu.

2.3.5 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 2.11.

$$CB_{BA} = (C_{EX} + CN_{EN}) \times C_{value} \quad (2.11)$$

Dimana :

CB_{BA} : kapasitas awal (MW),

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

CN_{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 2.12.

$$C_{puncak} = \frac{D}{LF \times 8760 \text{ [jam/tahun]}} \quad (2.12)$$

Dimana :

C_{puncak} : 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 2.13.

$$PRM_{BA} = (C_{BA} - C_{peak}) / C_{peak} \quad (2.13)$$

Dimana PRM_{BA} adalah PRM sebelum ada penambahan kapasitas. Selanjutnya, kapasitas pembangkit listrik yang diperlukan secara *endogenous* ditentukan dengan persamaan 2.14.

$$C_{ENA} = (PRM - PRM_{BA}) \times C_{peak} \quad (2.14)$$

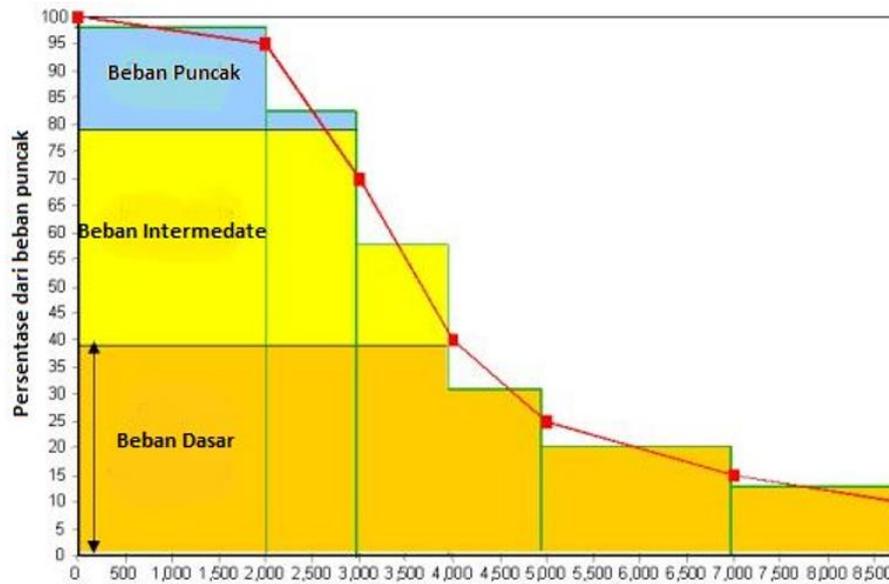
Dimana C_{ENA} adalah kapasitas pembangkit listrik yang harus ditambahkan untuk mempertahankan PRM pada nilai yang sudah ditentukan. Pada akhirnya, LEAP menghitung kapasitas pembangkit listrik yang diperlukan untuk setiap proses pembangkitan listrik.

2.3.6 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 2.15.

$$Running\ Cost_i = VariableOMCost_i + \frac{FuelCost_i}{Efficiency_i} \quad (2.15)$$

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 di *dispatch* secara bersamaan. Selanjutnya, LEAP akan melakukan pendekatan diskrit terhadap LDC yang telah ditentukan dan dibagi kedalam *interval time slice*.



Gambar 2.9 Komulatif LDC

(Sumber: Heaps, 2012)

Di dalam gambar 2.9, 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 2.12.

Selanjutnya, setiap proses pembangkit listrik *dispatch* berdasarkan interval vertikal untuk memenuhi kebutuhan energi listrik di bawah kurva LDC. Pembangkit listrik untuk memenuhi beban dasar *dispatch* pertama kali, diikuti dengan pembangkit berikutnya yang digunakan untuk memenuhi beban intermediate 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 *dispatch* sampai daerah di bawah kurva LDC tersisipenuh. Pada saat kapasitas yang tersedia melampaui jumlah yang diperlukan, kapasitas aktual untuk setiap proses yang *dispatch* dikurangi sedemikian hingga setiap proses *dispatch* secara proporsional terhadap kapasitas yang tersedia.