

TEKNOLOGI PEMBANGKIT TENAGA LISTRIK



Dr. Ramadoni Syahputra

UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH YOGYAKARTA

September 2020

規則圖

**TEKNOLOGI
PEMBANGKIT TENAGA LISTRIK**

Undang-Undang Republik Indonesia nomor 28 Tahun 2014 tentang Hak Cipta

Pasal 4

Hak Cipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 3 huruf a merupakan hak eksklusif yang terdiri atas hak moral dan hak ekonomi.

KETENTUAN PIDANA

Pasal 112

Setiap Orang yang dengan tanpa hak melakukan perbuatan sebagaimana dimaksud dalam Pasal 7 ayat (3) dan/atau Pasal 52 untuk Penggunaan Secara Komersial, dipidana dengan pidana penjara paling lama 2 (dua) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp300.000.000,00 (tiga ratus juta rupiah).

Ramadoni Syahputra

**TEKNOLOGI
PEMBANGKIT TENAGA
LISTRIK**

Prakata Penulis

Bismillaahirrahmaanirrahim

Alhamdulillahirobbil ‘alamiin, rasa syukur yang dalam senantiasa penulis haturkan ke haribaan Allah Subhahanu wa ta’ala. Atas berkat rahmat dan karunia-Nya penulis mampu menyelesaikan manuskrip buku ajar dengan judul “Teknologi Pembangkit Tenaga Listrik”. Tiada daya dan upaya selain atas pertolongan Allah Subhahanu wa ta’ala.

Penulis sangat berharap buku ajar ini dapat menjadi salah satu bahan rujukan bagi mahasiswa maupun dosen pengampu pada mata kuliah yang berkenaan dengan pembangkit tenaga listrik di Program Studi Teknik Elektro. Buku ajar ini juga dapat digunakan sebagai acuan pendamping pada mata kuliah-mata kuliah di bidang keminatan sistem tenaga listrik seperti teknik tenaga listrik, mesin-mesin listrik, operasi sistem tenaga listrik, dan lain-lain.

Bagian awal buku ini menguraikan tentang pengantar sistem tenaga listrik. Komponen sistem tenaga listrik dan perkembangan sistem kelistrikan di Indonesia diuraikan dalam bagian tersebut. Bagian-bagian selanjutnya merupakan bagian inti dari buku ajar ini yang menguraikan pembangkit listrik termal yang paling populer digunakan sebagai penghasil energi listrik, baik di Indonesia maupun di dunia. Pembangkit-pembangkit listrik tersebut adalah Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN), dan Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG). Tiga jenis pembangkit listrik berbasis termal tersebut saat ini masih menjadi andalan dalam pembangkitan energi listrik di Indonesia.

Penulis sangat berterima kasih kepada pihak-pihak yang telah membantu dalam penyusunan buku ajar ini. Bantuan tersebut diberikan secara langsung maupun tidak langsung. Terima kasih yang tiada terhingga kepada Bapak Rektor Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, Prof. Dr. Ir. H. Gunawan Budiyo, M.P., IPM., yang telah memberikan kesempatan seluas-luasnya kepada dosen UMY untuk berkarya dan berkreasi. Penulis juga menyampaikan terima kasih kepada Kepala Lembaga Riset dan Inovasi (LRI) UMY, Prof. Dr. Dyah Mutiarin, M.Si., kepada Dekan Fakultas Teknik UMY, Ir. Aris Widyo Nugroho, ST., MT., Ph.D., juga kepada Kepala Divisi Penerbitan Buku LRI UMY, Budi Nugroho, S.Sos., yang telah banyak sekali membantu dan mendorong penyelesaian buku ajar ini.

Kepada seluruh dosen, staf, dan mahasiswa Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik UMY, penulis juga menyampaikan terima kasih atas bantuan dan masukannya. Tak lupa penulis haturkan terima kasih yang setinggi-tingginya kepada Ibunda (almh) dan Ayahanda (alm), semoga Allah Subhanahu wa ta'ala mengampuni dosa-dosamu, senantiasa melimpahkan kasih sayang-Nya sebagaimana kasih sayangmu, juga pahit getir perjuanganmu dalam mendidik dan membesarkan putramu ini. Kepada istriku tercinta, Dr. Indah Soesanti, S.T., M.T., atas kasih sayangnya dan senantiasa mendampingi, membantu, dan memberikan saran-saran cerdas yang luar biasa berguna bagi penulis. Terakhir, kepada semua pihak yang telah membantu. Semoga semuanya tercatat sebagai amal saleh yang mendapatkan balasan di dunia dan akhirat kelak, amin ya robbal 'alamin.

Tiada gading yang tak retak. Pepatah klasik ini selalu relevan hingga kapan pun. Buku ajar ini masih jauh dari sempurna. Segala kritik dan saran membangun selalu penulis tunggu demi kesempurnaan buku ajar

ini. Akhirnya, semoga buku ajar ini dapat bermanfaat dalam proses pembelajaran, khususnya pada Program Studi Teknik Elektro. Semoga Allah Subhahanu wa ta'ala senantiasa membimbing kita ke jalan yang benar.

Yogyakarta, September 2020
Penulis,

Dr. Ramadoni Syahputra

Daftar Isi

Prakata Penulis — vii

Daftar Isi — x

Daftar Tabel — xi

Daftar Gambar — xiii

Bab 1 Pengantar Sistem Tenaga Listrik — 1

1.1. Pendahuluan — 2

1.2. Perangkat Sistem Tenaga Listrik — 8

Bab 2 Pembangkit Listrik Tenaga Uap — 13

2.1. Pengertian Umum — 13

2.2. PLTU Batu bara — 16

2.3. Proses Produksi Tenaga Listrik PLTU Batu Bara — 18

2.4. Komponen Utama dan Spesifikasi — 22

2.5. Persamaan untuk Perhitungan Daya dan Kebutuhan Bahan Bakar. — 38

2.6. Persamaan untuk Perhitungan Biaya Pembangkitan Biaya Modal (*Capital Cost*) — 44

2.7. Pendapatan per Tahun dan Payback Period — 46

2.8. Contoh Perhitungan Kebutuhan Bahan Bakar — 47

2.9. Biaya Pembangkitan — 56

Bab 3 Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir — 63

3.1. Pengertian Umum — 63

3.2. Prinsip Dasar PLTN — 66

3.3. Kelebihan dan Kekurangan — 70

3.4. Jenis-Jenis PLTN — 71

3.5. Rumus/ Persamaan Perhitungan Daya pada PLTN — 77

3.6. Biaya Pembangkitan — 80

3.7. *Payback Period* — 81

3.8. Contoh PLTN tipe PWR kapasitas 200 MW — 81

Bab 4	Pembangkit Listrik Tenaga Gas — 91
	4.1. Pengertian Umum — 91
	4.2. Bahan Bakar PLTG — 93
	4.3. Prinsip Kerja PLTG — 96
	4.4. Kelemahan dan Keunggulan PLTG — 97
	4.5. Perencanaan Teknik PLTG — 99
	4.6. Kendali Daya pada PLTG — 103
	4.7. Perhitungan Kebutuhan Bahan Bakar PLTG — 104
	4.8. Perhitungan Biaya Pembangkitan PLTG dengan Bahan Bakar Gas Alam — 108
	Daftar Pustaka — 110

Daftar Tabel

Tabel 2.1.	Nilai kalori dari beberapa jenis batu bara — 23
Tabel 2.2	Interpolasi — 51
Tabel 2.3	Output tekanan turbin — 52
Tabel 2.4	Konsumsi Batu bara — 54
Tabel 2.5	<i>Return of investment</i> dan <i>benefit cost ratio</i> selama 25 tahun — 60
Table 4.1	Kandungan Gas alam — 94
Tabel 4.2	Persamaan untuk acuan beberapa besaran-besaran — 108

Daftar Gambar

- Gambar 3.1. Model atom — 65
- Gambar 3.2. Pembelahan inti atom — 67
- Gambar 3.5. Skema *boiling water reactor* — 73
- Gambar 3.6. Konstruksi reaktor vessel — 82
- Gambar 3.7. Bejana Reactor — 83
- Gambar 3.8. Perancangan bahan bakar uranium — 84
- Gambar 3.9. Pressurizer — 85
- Gambar 3.10. steam generator tipe U — 85
- Gambar 3.11. Pompa sentrifugal pendingin rector — 86
- Gambar 3.12. Siemens steam turbine SST-800 — 87
- Gambar 3.13. Siemens Sgen5-100A-2P Series — 88
- Gambar 4.1. Diagram PLTG — 93
- Gambar 4.2. Pemanfaatan gas alam di berbagai sektor — 95
- Gambar 4.3. Skema pembangkit listrik tenaga gas uap (*combined cycle*) — 98
- Gambar 4.4. Turbin gas pada PLTG — 100
- Gambar 4.5. Siklus Brayton — 102
- Gambar 4.6. Bagian utama sebuah turbin gas — 102

Bab 1

Pengantar Sistem Tenaga Listrik

Tujuan Instruksional Umum:

Memberikan wawasan kepada mahasiswa tentang sistem tenaga listrik disertai data dan perkembangannya di Indonesia yang dibahas secara umum.

Tujuan Instruksional Khusus:

1. Memberikan pengetahuan kepada mahasiswa tentang pengertian sistem tenaga listrik.
2. Memberikan pengetahuan kepada mahasiswa tentang komponen sistem tenaga listrik.
3. Memberikan pengetahuan kepada mahasiswa tentang data perkembangan sistem tenaga listrik di Indonesia.
4. Memberikan pengetahuan kepada mahasiswa tentang prospek ekspansi sistem tenaga listrik.
5. Memberikan pengetahuan kepada mahasiswa tentang pembangkit listrik dalam sistem tenaga listrik.

1.1 Pendahuluan

Seiring dengan kemajuan ekonomi, sosial, dan budaya, energi listrik saat ini telah menjadi kebutuhan dasar manusia. Sementara itu, kapasitas PLN untuk memasok listrik ke Indonesia sangat terbatas. Menurut informasi dari Direktorat Jenderal Listrik dan Pemanfaatan Energi (DJLPE), dari total sekitar 66.000 desa, rasio elektrifikasi telah mencapai 99,20 persen dan rasio desa berlistrik telah mencapai 100 persen pada 2020. Namun, hanya sebagian kecil dari potensi air Indonesia sekitar 75,67 GW yang telah dimanfaatkan. Dari jumlah itu, baru 4,2 GW yang digunakan untuk pembangkit mini/mikro hidro dan yang memiliki potensi 450 MW baru digunakan sebesar 230 MW sejak dipasang pada 2008.

Penggunaan energi dan kemajuan teknologi telah memberikan dampak yang signifikan terhadap elemen sosial dan ekonomi baik dalam skala kecil maupun besar, dari dalam negeri hingga tingkat nasional dan internasional. Namun, karena selalu terkait dengan isu lingkungan dan dampaknya, isu energi tidak bisa dipandang sebelah mata. Indonesia dan negara-negara lain di seluruh dunia masih mengandalkan bahan bakar fosil, khususnya batu bara dan bahan bakar minyak, untuk menghasilkan energi listrik. Penggunaan bahan bakar fosil di pembangkit listrik menghasilkan masalah ketersediaannya, selain masalah lingkungan. Karena bahan bakar fosil adalah sumber energi yang tidak terbarukan, pasokannya secara bertahap berkurang sehingga menaikkan harganya. Para ahli dari berbagai negara telah membuat penemuan baru dengan mengintensifkan pengelolaan sumber energi terbarukan untuk menghasilkan energi listrik, antara lain air, angin, matahari, gelombang laut, energi biomassa, dan lain-lain. Hal ini disebabkan semakin menipisnya dan mahalnya energi berbasis bahan bakar fosil dan isu lingkungan yang kian sensitif.

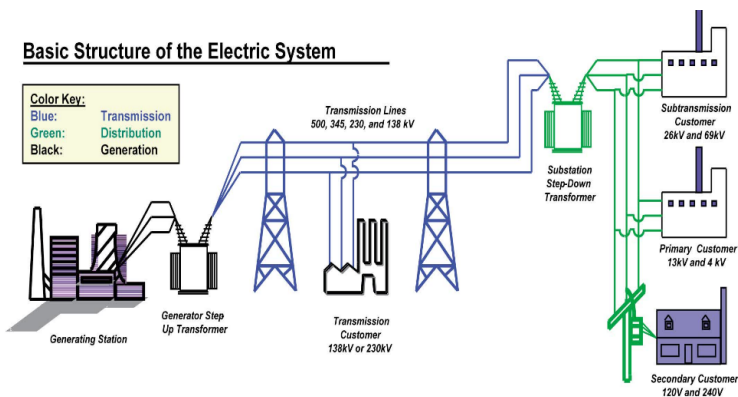
Menurut data PT PLN (Persero), pada 2020, tingkat elektrifikasi Indonesia hanya berhasil mencapai 99,20 persen. Energi listrik terjual 243.582,75 GWh pada 2020. Kelompok pelanggan industri menggunakan 72.240 GWh (29,66%), rumah tangga menggunakan 112.156 GWh (46,04%), bisnis menggunakan 42.819 GWh (17,58%), sedangkan 16.368 GWh (6,71%) lainnya digunakan untuk sosial, penerangan jalan pemerintah, dan penerangan jalan umum. Pada akhir 2020, terdapat 79.000.033 klien atau meningkat 4,35 persen dibandingkan akhir 2019. Berbeda dengan tahun sebelumnya ketika harga jual rata-rata per kWh daya sebesar Rp. 1.130,33, pada 2020 harga jual rata-rata per kWh daya sebesar Rp. 1.071.36.

Kapasitas terpasang dibagi menjadi persentase berikut berdasarkan jenis generator: PLTGU 8.814 MW (25,77%), PLTU 15.554 MW (45,47%), PLTA 3.520 MW (10,29%), PLTD 2.848 MW (8,33%), PLTG 2.894 MW (8,46%), PLTP 568 MW (1,67%), PLT Surya dan PLT Bayu 8,37 MW (0,02 persen). Beban puncak pada 2020 meningkat sebesar 6,76 persen dari tahun sebelumnya yakni menjadi 30.834 MW. Beban puncak sistem interkoneksi Jawa—Bali meningkat 6,30 persen dibandingkan tahun sebelumnya menjadi 22.575 MW.

Penggunaan energi dan kemajuan teknologi telah memberikan dampak yang signifikan terhadap elemen sosial dan ekonomi baik dalam skala kecil maupun besar, dari dalam negeri hingga tingkat nasional dan internasional. Namun, karena selalu terkait dengan isu lingkungan dan dampaknya, maka isu energi tidak bisa dipandang sebelah mata. Negara-negara di dunia terus mengandalkan bahan bakar fosil, terutama batu bara dan bahan bakar minyak, untuk menghasilkan energi listrik. Penggunaan bahan bakar fosil di pembangkit listrik menghasilkan masalah ketersediaannya selain masalah lingkungan. Karena bahan bakar fosil

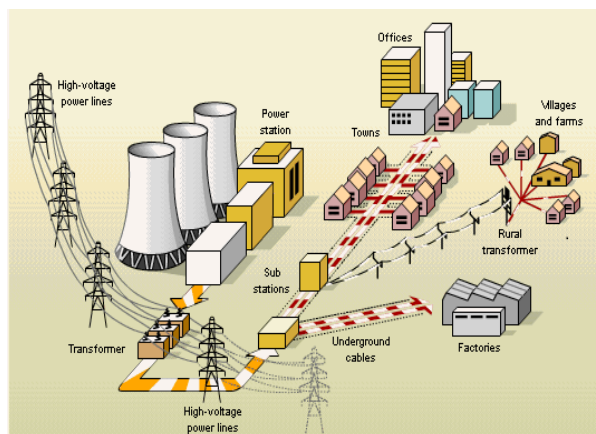
adalah sumber energi yang tidak terbarukan, pasokannya secara bertahap berkurang, yang menaikkan harganya.

Pemanfaatan berbagai sumber daya untuk menghasilkan energi listrik yang berasal dari sumber-sumber energi terbarukan masih dalam tahap pengembangan berkelanjutan. Untuk mengatasi masalah kekurangan listrik di beberapa lokasi, sumber energi seperti sumber daya energi hidro, angin, matahari, gelombang laut, panas bumi (*geothermal*), biomassa, dan lain-lain telah dan sedang dirancang dan dibangun untuk menghasilkan listrik. Kapasitas pembangkit listrik kecil beberapa puluh watt hingga kapasitas daya besar dengan daya mega-watt juga tersedia. Namun, kemajuan lebih lanjut sejak awal abad kedua puluh satu telah membuat sejumlah upaya melalui penelitian menyeluruh tentang bagaimana mengintegrasikan berbagai jenis yang berasal dari pembangkit listrik energi terbarukan dengan infrastruktur listrik saat ini, yang dikenal dengan sistem interkoneksi. Pembangkitan terdistribusi (*distributed generation, DG*) saat ini telah sangat populer dalam sistem tenaga listrik yang mengintegrasikan pembangkit energi terbarukan dengan jaringan listrik yang ada. Tata letak dasar suatu sistem tenaga listrik diilustrasikan pada Gambar 1.1.



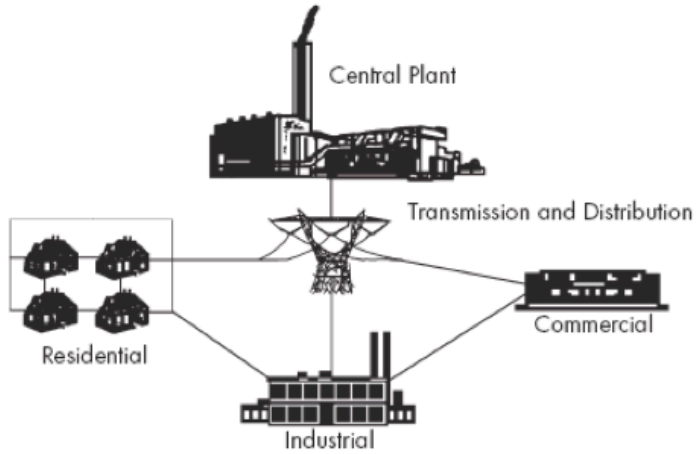
Gambar 1.1 Skematik diagram suatu sistem tenaga listrik

DG menjadi komponen penting dari catu daya listrik. Saat ini lokasi yang sering disebut sebagai pembangkit listrik adalah rumah bagi pembangkit listrik skala besar yang menghasilkan energi secara terpusat, antara lain pembangkit-pembangkit listrik tenaga uap (PLTU), tenaga gas dan uap (PLTGU), tenaga nuklir (PLTN), tenaga gas (PLTG), tenaga air (PLTA), dan lain-lain. Oleh karena itu, keberadaan DG sangat berperan dalam membantu pemerintah dalam menyediakan energi listrik bagi masyarakat. Mengingat bahwa sistem interkoneksi jaringan listrik saat ini benar-benar merupakan sistem pembangkit terdistribusi, ungkapan “pembangkitan terdistribusi” sebenarnya bukanlah hal baru. Namun, istilah “pembangkitan terdistribusi” baru mulai digunakan belakangan ini karena lebih erat kaitannya dengan pembangkit listrik yang memiliki kapasitas relatif lebih kecil dan biasanya ditenagai oleh sumber energi terbarukan untuk dihubungkan ke jaringan listrik saat ini yang dipasok oleh pembangkit listrik termal. Gambar 1.2 mengilustrasikan pentingnya pembangkitan terdistribusi (DG) dalam sistem tenaga listrik, dan Gambar 1.3 mengilustrasikan gagasan pembangkitan terpusat dan terdistribusi.

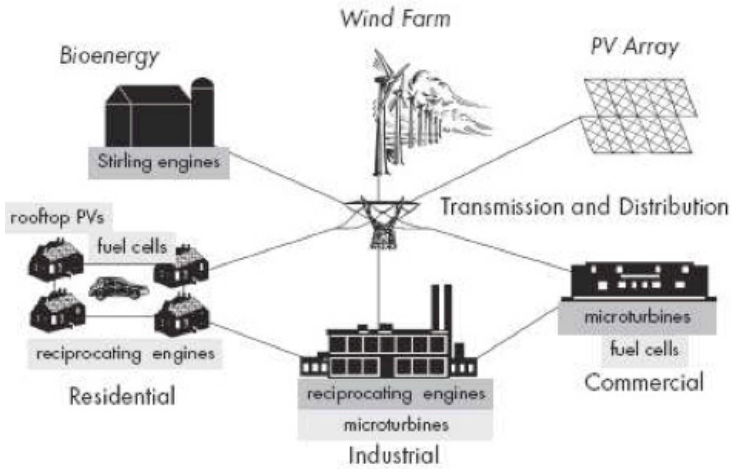


Gambar 1.2 Integrasi DG dalam suatu sistem tenaga listrik

Tidak mudah untuk mencoba memasukkan berbagai DG ke dalam jaringan yang terhubung. Sebagai ilustrasi, dapat diambil contoh pembangkit listrik tenaga surya menggunakan sel surya. Tegangan dc merupakan bentuk energi listrik yang dihasilkan. Tegangan dc yang dihasilkan berubah-ubah berdasarkan intensitas cahaya matahari yang mengenainya serta jumlah sel surya yang terpasang. Tingkat tegangan jaringan listrik interkoneksi biasanya secara signifikan lebih tinggi, sehingga tegangan dc yang dihasilkan oleh sel surya harus terlebih dahulu ditingkatkan dengan menggunakan konverter dc. Selain itu, inverter digunakan untuk mengubah tegangan dc yang ditinggikan menjadi daya listrik ac dengan frekuensi yang sama dengan frekuensi sistem tenaga listrik (50 atau 60 Hz). Hal yang sama berlaku untuk berbagai jenis pembangkit listrik, masing-masing dengan karakteristik khusus mereka sendiri. Ambil pembangkit listrik tenaga angin, misalnya, yang rotasi turbinnya berfluktuasi secara dramatis pada siang hari karena kecepatan angin yang berubah. Untuk itu, diperlukan sistem kendali yang tepercaya agar generator dapat berputar dengan putaran yang tinggi dan stabil sebagai respons terhadap variasi putaran turbin angin yang rendah. Mengangkat dan mendiskusikan isu-isu seperti ini serta bagaimana mengatasinya dengan menggunakan temuan penelitian dari para ahli terkemuka yang temuannya dapat ditemukan di jurnal-jurnal terkenal di seluruh dunia merupakan hal yang menarik untuk disajikan dalam buku ini.



(a)



(b)

Gambar 1.3 (a) Skematik pembangkit listrik bersifat sentralistik dan (b) skematik pembangkit listrik tersebar (DG)

1.2 Perangkat Sistem Tenaga Listrik

Jenis energi listrik adalah salah satu cara yang paling nyaman, terjangkau, dan aman untuk mentransmisikan energi. Dalam sistem tenaga listrik, energi listrik dapat terus-menerus dikirim dari satu lokasi ke lokasi lain yang saling berjauhan. Suatu sistem tenaga listrik terdiri dari beberapa bagian dan peralatan listrik, antara lain beban, jaringan transmisi, jaringan distribusi, dan peralatan penting yaitu transformator.

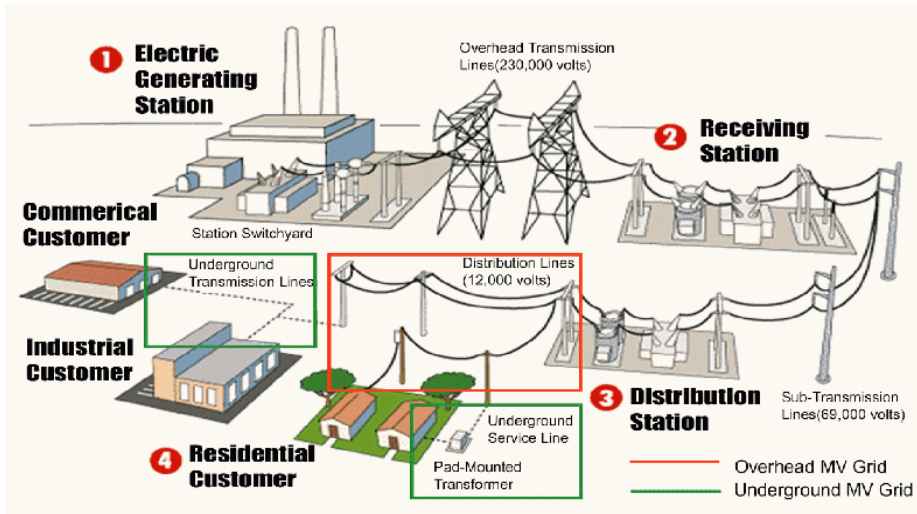
Sejak pembangkit tenaga listrik sebagai pioner, yang dikenal dengan *Pearl Street Electrical Station*, mulai berfungsi di New York City, Amerika Serikat, pada 1882, industri tenaga listrik telah dimulai. Selain itu, sektor tenaga listrik berkembang pesat dan jaringan transmisi dan distribusi serta fasilitas pembangkit telah muncul di banyak negara.

Listrik adalah bentuk energi yang sangat berharga. Fakta bahwa makhluk modern sangat bergantung pada energi listrik tidak dapat disangkal. Akibatnya, jumlah energi listrik yang dibutuhkan untuk kehidupan manusia modern praktis “sama” dengan oksigen. Bahkan, tingkat perkembangan suatu negara dapat diukur dari jumlah listrik yang digunakannya. Misalnya, Amerika Serikat, negara industri maju pada 2000, memiliki total kapasitas terpasang untuk pembangkit energi sekitar 1200 GW, atau $1,2 \times 10^{12}$ Watt. Sementara itu, di negara Indonesia, sistem Jawa—Bali memiliki kapasitas pembangkit listrik terpasang sekitar 20 GW pada akhir tahun 2004 masih merupakan negara berkembang. Sebagian besar pembangkit listrik di Indonesia terletak di pulau Jawa dan Bali karena pulau-pulau tersebut merupakan mayoritas konsumsi listrik negara.

Sistem pembangkitan, sistem transmisi, dan sistem distribusi semuanya termasuk dalam definisi sistem tenaga listrik dan secara garis besar digambarkan pada Gambar 1.4. Baru-baru ini, ditetapkan bahwa biaya investasi fasilitas pembangkit sama dengan sistem distribusi ketika

diperiksa di tingkat nasional. Hingga 80% dari keseluruhan pengeluaran untuk sistem tenaga listrik sering kali dihabiskan untuk sistem distribusi bersama dengan sistem pembangkitan.

Penjelasan berikut akan menguraikan siklus aliran energi listrik dalam suatu sistem tenaga listrik. Sumber-sumber energi primer yang menjadi bahan bakar pokok untuk membangkitkan energi listrik hingga saat ini masih didominasi bahan bakar fosil. Bahan bakar fosil yang populer terdiri dari minyak bumi, gas, dan batu bara. Selain itu, bahan bakar yang juga banyak digunakan adalah bahan bakar nuklir, hidro, panas bumi, dan angin. Sumber-sumber energi primer tersebut melalui suatu mekanisme pengolahan energi diubah menjadi energi kinetik untuk menggerakkan turbin sehingga menghasilkan energi mekanik berupa putaran. Ketika turbin terhubung dengan suatu generator tiga fase melalui poros atau as, turbin yang berputar otomatis memutar generator untuk menghasilkan tegangan ac tiga fase. Energi listrik ini selanjutnya dikirimkan ke konsumen listrik melalui mekanisme penyaluran jarak jauh yang disebut sistem transmisi dan pendistribusian ke konsumen yang disebut sistem distribusi. Dalam pengiriman dan pendistribusian energi listrik, peralatan penting yang digunakan untuk menaikkan dan menurunkan tegangan adalah transformator. Adanya transformator ini sangat memudahkan dan membuat sistem tenaga listrik menjadi sangat fleksibel.



Gambar 1.4. Perlengkapan pada sistem tenaga listrik

Arus pada saluran transmisi akan mengalir kurang bebas sebagai akibat dari kenaikan tegangan. Dengan demikian, aliran arus rendah yang dibawa oleh saluran transmisi tegangan tinggi akan mengurangi kehilangan panas I^2R yang ada. Trafo *step-down* kembali menurunkan tegangan menjadi tegangan menengah ketika saluran transmisi mencapai pusat beban. Energi listrik ini diubah menjadi jenis energi lain yang dikonsumsi, seperti energi mekanik (motor), penerangan, pemanasan, pendinginan, dan bentuk lainnya pada pusat-pusat beban yang terhubung dengan jalur distribusi.

Jenis energi yang sangat berguna adalah energi listrik. Besarnya energi listrik yang dikonsumsi suatu negara dapat digunakan untuk mengukur kemajuannya. Energi listrik merupakan jenis energi yang “menyenangkan” karena dapat dengan mudah disalurkan dan diubah menjadi berbagai energi yang berbeda.

Pada fasilitas pembangkit listrik seperti PLTU, PLTGU, PLTN, PLTA, PLTG, dan lain-lain, energi listrik dihasilkan di lokasi yang jaraknya relatif jauh dari pusat beban atau tempat energi listrik digunakan. Jarak pembangkit listrik dengan pusat beban umumnya berjauhan karena pembangkitan energi listrik disesuaikan dengan lokasi keberadaan potensi energi. Oleh karena itu, diperlukan saluran transmisi untuk menyalurkan energi listrik yang dihasilkan. Karena tegangan yang dihasilkan oleh generator seringkali rendah (antara 6 kV dan 24 kV), tegangan ini sering ditingkatkan oleh transformator daya ke tingkat tegangan yang lebih tinggi antara 30 kV dan 500 kV. Sistem transmisi tenaga listrik yang diaplikasikan di beberapa negara maju dengan wilayah yang sangat luas seperti negara Rusia dan Amerika Serikat bahkan mencapai 1000 kV.

Level tegangan listrik yang relatif lebih tinggi ini dimaksudkan untuk mengurangi rugi-rugi daya dan penurunan tegangan pada saluran serta meningkatkan konduktivitas saluran, yang berbanding lurus dengan kuadrat tegangan. Dengan menaikkan voltase, dibutuhkan tingkat insulasi yang lebih tinggi, yang mengakibatkan kenaikan harga peralatan.

Suatu Gardu Induk (GI) memegang peranan penting dalam penyaluran daya listrik kepada konsumen. Di GI, tegangan pertama kali diturunkan ke tegangan yang lebih rendah, misalnya dari tegangan nominal sistem 500 kV menjadi tegangan nominal sistem 150 kV atau dari tegangan nominal sistem 150 kV menjadi tegangan nominal sistem 70 kV, dan seterusnya merupakan fasilitas sistem tenaga listrik yang terdiri dari peralatan penting yaitu transformator tenaga. Tegangan listrik selanjutnya diturunkan pada gardu distribusi, baik dari tegangan nominal sistem 70 kV menjadi tegangan nominal sistem 20 kV atau dari tegangan nominal sistem 150 kV menjadi tegangan nominal sistem 20 kV. Pada saluran distribusi primer, tegangan nominal sistem yang biasa digunakan di Indonesia adalah 20 kV.

Bab 2

Pembangkit Listrik Tenaga Uap

Tujuan Instruksional Umum:

Memberikan wawasan kepada mahasiswa tentang Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) yang dibahas secara terperinci.

Tujuan Instruksional Khusus:

1. Memberikan pengetahuan kepada mahasiswa tentang pengertian Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU).
2. Memberikan pengetahuan kepada mahasiswa tentang komponen Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU).
3. Memberikan pengetahuan kepada mahasiswa tentang data perkembangan Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) di Indonesia.
4. Memberikan pengetahuan kepada mahasiswa tentang prospek ekspansi Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU).
5. Memberikan pengetahuan kepada mahasiswa tentang analisis Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU).

2.1 Pengertian Umum

Generator yang dikenal sebagai pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) menggunakan energi kinetik uap untuk menghasilkan energi listrik. PLTU

adalah jenis pembangkit listrik yang menggunakan uap kering untuk memutar sudu-sudu turbin sebagai alat penggerakannya.

Pembangkit listrik semacam ini pada dasarnya berfungsi sebagai pembangkit listrik (alternator) yang sejajar dengan turbin yang digerakkan oleh energi kinetik dari uap panas dan kering. Pembangkit listrik tenaga uap membakar sejumlah bahan bakar, termasuk batu bara, bahan bakar minyak, bahan bakar utama (MFO), solar, dan diesel kecepatan tinggi (HSD), awalnya dimulai dengan udara panas terkompresi.

Sejarah PLTU

Michael Faraday mampu menunjukkan pada 1991, setelah sebelas tahun percobaan, bahwa sebuah kumparan atau konduktor menginduksi tegangan listrik ketika melintasi medan magnet yang berubah. Ini membuktikan teori pembangkitan listrik melalui induksi magnetik. Sekarang, bukti nyata ini berfungsi sebagai dasar untuk desain semua mesin listrik. Karena pengembangan dinamo dan kemudahan menghasilkan listrik dengan induksi, pabrikan London memiliki akses listrik pada 1882. Pasokan ini berasal dari generator DC yang ditenagai oleh mesin bolak-balik yang membakar uap yang dihasilkan oleh boiler manual. Generator kecil menjadi lebih umum di seluruh negeri sebagai akibat dari meningkatnya kebutuhan listrik. Ini membuat seseorang ingin bergabung untuk menghemat uang.

Gramme membangun generator pertama pada 1878, tetapi belum mulai menghasilkan listrik sampai Nicola Tesla mengembangkan sistem polifase medan berputar pada 1888. Generator turbin AC pertama dibuat oleh Sir Charles Parson pada 1882 dan generator 3-vasa 1500kW dibuatnya dibangun di pembangkit listrik Neptunus di British Tyne pada 1901.

Ini adalah gaya utama di balik rotasi kumparan dalam medan magnet. Namun, ternyata semakin mudah untuk mengalirkan arus listrik dalam medan magnet yang berputar dalam kumparan stasioner atau di stator, semakin tinggi output yang dibutuhkan. Desain mesin berkembang dari waktu ke waktu dan pada 1992 generator 20 MW yang berputar pada 300 rpm pun beroperasi. Pusat distribusi dan pengontrol beban adalah perusahaan yang mengoperasikan sistem transmisi interkoneksi karena kebutuhan desain unit pembangkit telah berkembang seiring dengan permintaan dan kapasitasnya.

Karena efisiensinya yang tinggi dan bahan bakar yang tersedia, PLTU merupakan pembangkit listrik termal yang menghasilkan energi listrik yang terjangkau. PLTU adalah alat untuk mengubah energi, mengubah energi kimia dari bahan bakar menjadi energi listrik.

Keuntungan dan Kerugian dari PLTU

Ada beberapa hal yang menjadi keunggulan dari suatu PLTU, yaitu:

- a. mampu dioperasikan dengan jenis bahan bakar padat, cair, dan gas;
- b. mampu dibangun sesuai dengan kebutuhan kapasitas;
- c. mampu dioperasikan pada mode pembebanan bervariasi;
- d. memiliki keberlangsungan operasional yang tinggi; dan
- e. memiliki usia pakai yang lama.

Selain keunggulan, PLTU juga memiliki kelemahan dibandingkan jenis pembangkit listrik lain, sebagai berikut.

- a. Pasokan bahan bakar seperti batu bara dan minyak menjadi penentu beroperasinya pembangkit ini.
- b. *Starting* pembangkit membutuhkan pasokan listrik dari luar.
- c. Dalam operasional, membutuhkan air yang banyak sebagai pendingin karena proses termal pembangkit.
- d. Biaya untuk investasi pembangunan pembangkit relatif mahal.

2.2. PLTU Batu bara

Batu bara digunakan sebagai sumber energi utama atau bahan bakar utama pada pembangkit listrik tenaga uap berbahan bakar batu bara, yang memanaskan air dan menghasilkan uap, yang kemudian digunakan untuk memutar sudu-sudu turbin. Uap ini kering. Siklus Rankine yang dimodifikasi, yang menggunakan *superheating*, *fid water heating*, dan *steam reheating*, digunakan oleh PLTU batu bara.

Uap yang digunakan harus memenuhi tekanan dan suhu yang diinginkan untuk memaksimalkan efisiensi termal. Faktor-faktor ini telah menyebabkan adopsi luas generator turbo dengan kapasitas 500 MW. Memanaskan kembali uap setelah sebagian mengembang melalui tahap suhu akhir saat menggunakan turbin uap dengan kapasitas 100 MW atau lebih meningkatkan efisiensi (turbin tekanan rendah).

Pembakaran batu bara terjadi selama proses pembangkitan energi di pembangkit listrik tenaga batu bara. Seperti bahan bakar fosil lainnya, ketika batu bara dibakar, abu dan asap tercipta selain energi yang dilepaskan sebagai panas. Polutan dari pembangkit listrik tenaga batu bara adalah sumber debu dan asap ini. Berikut ini adalah kontaminan utama yang dihasilkan pembangkit listrik tenaga batu bara.

- a. Sox adalah pembuangan gas buang yang telah dikaitkan dengan kondisi paru-paru dan sejumlah penyakit pernapasan.
- b. “Hujan asam” merupakan fenomena yang terjadi di banyak negara maju dan berkembang, terutama yang mengandalkan pembangkit listrik tenaga batu bara untuk produksi listriknya. Nox, emisi gas buang yang dikeluarkan oleh pembangkit listrik tenaga batu bara bersamaan dengan gas Sox, dan hujan asam, keduanya bertanggung jawab atas fenomena ini. Sektor pertanian dan peternakan mungkin menderita akibat hujan asam.

- c. Efek rumah kaca (juga dikenal sebagai “efek rumah kaca”), yang dapat berdampak pada perubahan iklim global, disebabkan oleh gas buang CO_x, yang dapat membuat lapisan di atmosfer yang menyelimuti permukaan bumi.
- d. Radon dan uranium 233 adalah di antara partikel radioaktif yang ditemukan dalam debu pembakaran batu bara. Selain bahaya yang ditimbulkan oleh partikel radioaktif, debu dari pembakaran batu bara juga menimbulkan risiko bagi kesehatan penduduk setempat.
- e. Selain itu, debu hasil pembakaran batu bara mengandung zat berbahaya lainnya, seperti logam berat seperti Pb, Hg, Ar, Ni, Se, dan lain-lain. Berdasarkan penelitian yang dilakukan di dekat pembangkit listrik, diketahui bahwa kadar logam berat tersebut jauh lebih tinggi dari nilai ambang batas yang diizinkan.

Prinsip Kerja PLTU Batu Bara secara Umum

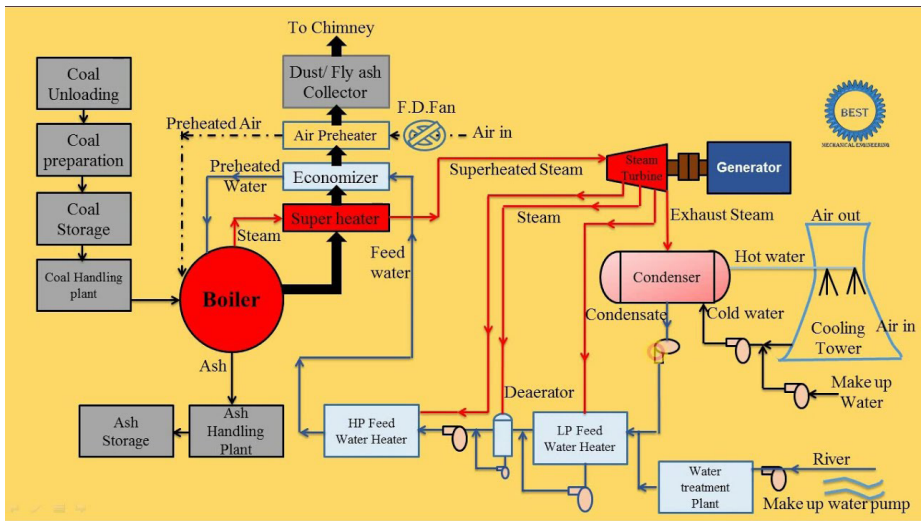
Fluida operasi PLTU adalah *steam water* sirkulasi tertutup. Siklus tertutup mengacu pada penggunaan cairan yang sama secara terus-menerus. Secara singkat, urutan peredarannya adalah sebagai berikut.

Seluruh area permukaan transmisi panas *boiler* pertama-tama diisi penuh dengan air. Air dalam *boiler* dipanaskan oleh gas panas yang dihasilkan selama pembakaran bahan bakar dan udara, yang menyebabkan air berubah menjadi uap. Selanjutnya, uap yang telah berbentuk uap kering dengan suhu dan tekanan tinggi dialirkan ke turbin untuk diputar. Kondensor adalah tempat uap bekas dari turbin dikirim untuk didinginkan dengan air pendingin dan diubah kembali menjadi air. Air yang tersisa setelah uap mengembun digunakan sebagai air umpan *boiler* sekali lagi. Loop ini terus berjalan dan berulang.

Sebuah generator yang terhubung langsung ke turbin diputar oleh turbin untuk menghasilkan energi listrik dari terminal output generator saat turbin berputar. Meskipun merupakan siklus tertutup, siklus fluida kerja akan mengandung lebih sedikit air seiring waktu. Kebocoran, baik disengaja maupun tidak disengaja, menjadi penyebab hilangnya air ini. Air harus ditambahkan ke siklus untuk menebus air yang hilang. Air *make-up* ini harus memenuhi persyaratan yang sama dengan air dalam siklus.

2.3. Proses Produksi Tenaga Listrik PLTU Batu Bara

Siklus PLTU dapat diartikan sebagai proses perubahan antara air menjadi uap, kemudian uap kembali menjadi air, dan seterusnya menghasilkan uap yang digunakan untuk memutar turbin PLTU.



Gambar 2.1. Proses operasional suatu PLTU

Air demin (*demineralized*) atau air dengan tingkat konduktivitas (kemampuan menghantarkan listrik) 0,2 us, adalah air yang digunakan dalam siklus PLTU (mikro Siemen). Air mineral harian kami memiliki

peringkat konduktivitas antara 100 dan 200, sebagai perbandingan. Setiap unit PLTU biasanya memiliki pabrik desalinasi dan fasilitas demineralisasi, yang membuat air demin ini, untuk mendapatkannya.

Sederhananya, siklus PLTU dapat diamati saat memasak air. Air pertama-tama ditampung dalam panci masak, kemudian menerima panas dari sumbu api yang menyala di bawahnya. Karena pembakaran, suhu air terus naik hingga mencapai titik didih. Karena pembakaran yang sedang berlangsung, titik didih air terlampaui sampai uap panas dihasilkan. Dengan memutar turbin dan generator menggunakan uap ini, energi listrik dihasilkan.

Gambar 2.1 menggambarkan siklus PLTU secara sederhana dan memberikan penjelasan sebagai berikut.

Air demin terletak di lokasi yang disebut Hotwell, pertama-tama. Air didorong dari hotwell ke pompa kondensat, kemudian ke pemanas tekanan rendah (LP Heater) yang menghangatkan tahap pertama. Permukaan dasar generator, juga disebut sebagai Lantai Dasar, adalah tempat hotwell dan pompa kondensat berada.

Selain itu, air masuk ke deaerator dan akan melalui proses pelepasan ion-ion mineral yang masih ada di dalam air, tetapi sudah tidak dibutuhkan lagi, seperti oksigen dan lain-lain. Cara lain untuk mengatakannya adalah deaerator menghilangkan gelembung dan balon yang sering terlihat di permukaan air. Suhu air harus mencapai suhu yang diperlukan agar proses pelepasan ini berfungsi secara efektif. Akibatnya, alat yang dikenal sebagai Pemanas LP memanaskan air beberapa kali saat mengalir ke deaerator. Deaerator terletak di lantai atas (tetapi bukan di atas).

Air kembali ke Lantai Dasar setelah meninggalkan deaerator. Saat air mencapai *Ground Floor*, maka air tersebut dipompakan oleh *Boiler Feed Pump* (BFP), atau pompa air pengisi, ke *boiler* atau tempat air akan “direbus”.

Dalam hal ini, *boiler* bisa diibaratkan drum raksasa, tetapi drum jauh lebih kecil. Karena uap yang dihasilkan juga harus pada tekanan tinggi, air yang dipompa ini juga pada tekanan tinggi. Oleh sebab itu, pembangunan PLTU menempatkan BFP di lantai dasar dan deaerator diletakkan di lantai atas karena tekanan yang sangat besar juga diciptakan oleh air yang meluncur dari ketinggian.

Air melewati beberapa tahapan pemanasan di HP Heater sebelum direbus kembali di *boiler* (*High Pressure Heater*). Air kemudian akan masuk ke boiler yang berada di lantai paling atas.

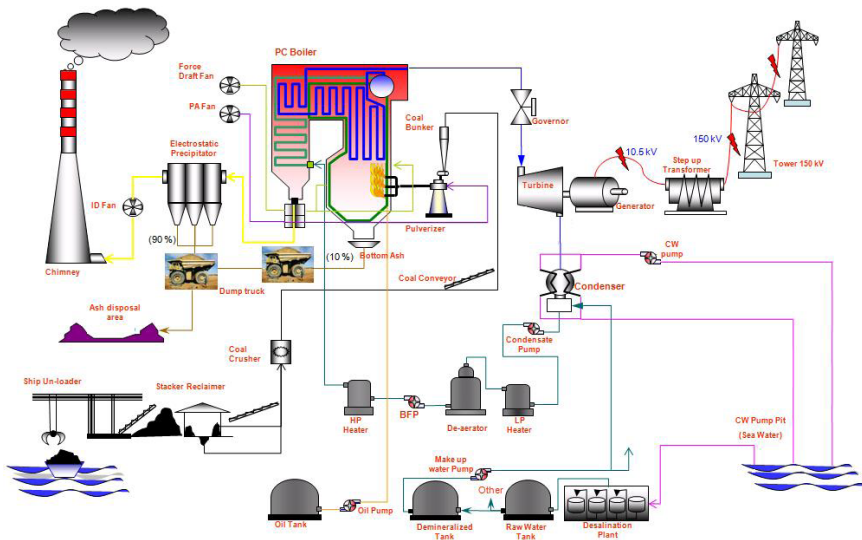
Uap dibuat di *boiler* ini dengan proses memasak air. Api diperlukan untuk proses ini, dan batu bara biasanya digunakan sebagai bahan bakar utama untuk pembakaran. Udara dari FD fan (*Force Draft Fan*) dan pelumas dari tangki Bahan Bakar Minyak membantu proses pembakaran. Melalui pompa bahan bakar minyak, bahan bakar disuntikkan ke *boiler*. Materi untuk talent PLTU berbeda, bergantung pada bahan bakar yang akan digunakan dalam PLTU—beberapa orang menyebutnya sebagai minyak, minyak dan gas, atau pembakaran ganda dan batu bara.

Sedangkan *Force Draft Fan* menghasilkan udara (*FD Fan*). Untuk membantu proses pembakaran di *boiler*, FD Fan menarik udara dari luar. Pemanas udara menaikkan suhu udara saat mengalir ke *boiler*, memungkinkan pembakaran terjadi di sana.

Air mulai berubah menjadi uap saat pembakaran berlangsung. Namun, karena uap hasil pembakaran ini masih berupa uap jenuh. Uap jenuh ini masih memiliki kandungan air, sehingga belum dapat digunakan untuk memutar turbin. Kadar air ini mengancam turbin karena setetes air dapat menimbulkan korosi pada sudu hingga 3000 putaran per menit. Uap jenuh dikeringkan dalam super heater untuk menghilangkan kandungan air, sehingga menghasilkan uap kering. Turbin diputar oleh uap kering ini.

Karena suatu turbin dan suatu generator sinkron tiga fase dipasang pada poros yang sama, ketika turbin berhasil berputar, generator juga akan berputar. Energi dihasilkan oleh generator listrik ini. Ada medan magnet di dalam generator dan saat generator berputar, magnet mengalami beda potensial. Transformator tenaga yang merupakan peralatan taktis dalam sistem tenaga listrik menerima energi listrik dari generator sinkron untuk mengubahnya menjadi tegangan tinggi (*high voltage*) ataupun tegangan ekstra tinggi (*extra high voltage*), yang selanjutnya disalurkan melalui jaringan transmisi tenaga listrik yang saling terinterkoneksi.

Proses selanjutnya adalah memanfaatkan kembali uap kering yang telah digunakan untuk memutar turbin sehingga digunakan kembali. Uap kering ini merupakan sesuatu yang berharga sehingga tidak dibuang. Uap mengembun di kondensor, kemudian berubah kembali menjadi air melalui proses kondensasi dan mengalir ke *hotwell*. Gambar 2.2 menggambarkan siklus PLTU secara keseluruhan.



Gambar 2.2 Skematik diagram suatu PLTU secara lengkap

Karena merupakan siklus tertutup, siklus PLTU seharusnya tidak membutuhkan air tambahan dalam keadaan ideal. Namun, pada kenyataannya, lebih banyak air yang dibutuhkan setiap hari. Hal ini menunjukkan bahwa terdapat beberapa kebocoran air dan uap pada suatu PLTU. Sumur panas terus-menerus dilengkapi dengan air sesuai dengan kebutuhannya dari air yang berasal dari tangki demineralisasi untuk menjaga siklus tetap berjalan dan untuk mengompensasi hilangnya air dalam siklus karena kebocoran.

2.4. Komponen Utama dan Spesifikasi

Berikut ini merupakan komponen utama dan fungsinya dalam proses produksi tenaga listrik PLTU Batu bara serta spesifikasi alat yang digunakan dalam perancangan PLTU Batu bara.

2.4.1. Batu bara

Pada PLTU Batu bara akan menggunakan bahan bakar batu bara sebagai media pemanasan air menjadi Uap, tetapi PLTU juga akan menggunakan bahan bakar minyak solar sebagai penyalaan awalnya.



Gambar 2.3 Batu bara jenis subbituminous

Spesifikasi batu bara yang umumnya digunakan di Indonesia yaitu berjenis subbituminous dengan nilai kalor yang berkisar 5700—6400 kkal/kg. Gambar 2.3 menunjukkan fisik batu bara jenis subbituminous. Selanjutnya, pada Tabel 2.1 ditunjukkan nilai kalori dari beberapa jenis batu bara.

Tabel 2.1. Nilai kalori dari beberapa jenis batu bara

Batu bara menurut sifat kimia			
No	Jenis Batu bara	Kadar kalori	Kadar kelembapan
1	Antrasit	7200—7780 / kg	
2	Bitumin	6100—7800 / kg	
3	Sub Bitumin	5700—6400 / kg	15—30 %
4	Lignit	4500—4600 / kg	Sampai 30%
5	Gambut	-	

2.4.2. Ketel (*Boiler*)

Fungsi secara umum dari *boiler* yaitu, sebagai tempat berlangsungnya proses perubahan air menjadi uap melalui proses pembakaran batu bara. Fungsi secara khusus:

- memproduksi uap yang sesuai dengan jumlah yang direncanakan,
- memanaskan lanjut uap yang dihasilkan sebelum digunakan untuk memutar turbin, dan
- memanaskan kembali uap yang telah digunakan oleh turbin tekanan tinggi sebelum digunakan untuk memutar sudu-sudu turbin tekanan menengah.

Boiler tersusun atas tiga komponen pemanas sebagai berikut.

- Primary Superheater*

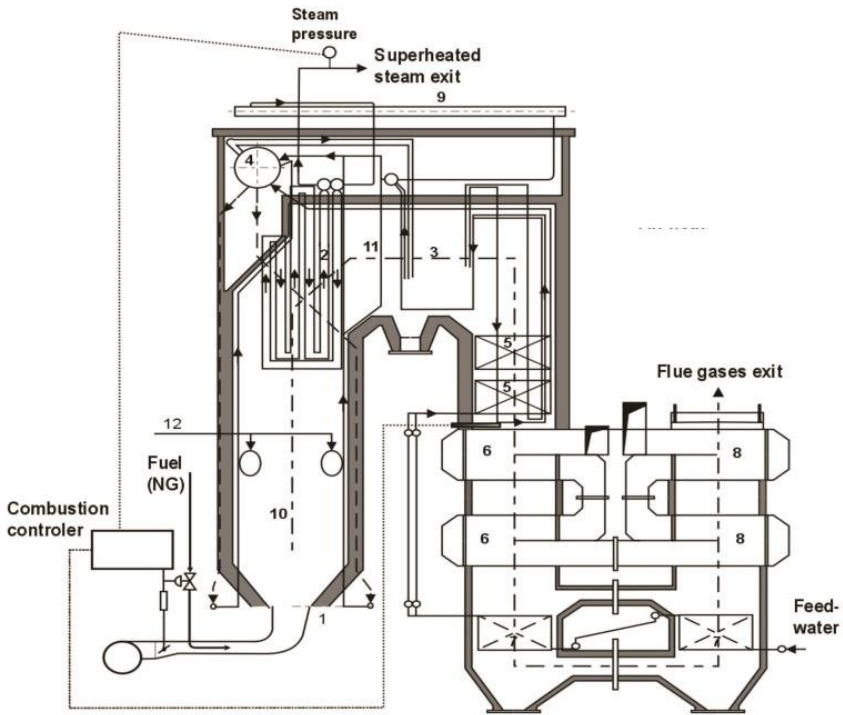
Primary superheater berfungsi untuk menghilangkan kadar air pada uap setelah terjadi penguapan yang berlangsung pada *boiler* dan ditampung pada *main drum*.

b. *Secondary Superheater*

Secondary superheater berfungsi untuk memastikan bahwa uap sudah tidak mengandung air sama SEKALI (uap kering).

c. *Reheater*

Reheater berfungsi untuk memanaskan kembali uap yang keluar dari turbin tekanan tinggi (*high pressure turbine*) yang mempunyai suhu 33—347° C agar dapat mencapai suhu standar yaitu 538° C.



Gambar 2.4. Skematik boiler atau ketel

Pada Gambar 2.4 ditunjukkan skematik suatu boiler atau ketel uap yang biasa digunakan pada suatu PLTU. Contoh spesifikasi boiler dari PLTU batu bara adalah sebagai berikut.

Pabrik pembuat	: Babcock & Wilcox, Canada
Kapasitas	: 1.953.866 kg uap / jam
Temperatur uap yang keluar <i>superheater</i>	: 540° c
Tekanan uap yang keluar <i>reheater</i>	: 59 kg/cm ²
Bahan bakar utama	: Batu bara
Bahan bakar untuk penyalaan awal	: Minyak solar

2.4.3. Turbin

Turbin merupakan peralatan pokok dalam suatu pembangkit listrik tenaga uap. Turbin uap berfungsi memutar generator melalui poros yang terhubung langsung dengan rotor generator sinkron. Proses kerjanya adalah turbin uap menerima uap kering yang dialirkan melalui pipa dari *boiler*. Uap kering bertekanan dan temperatur tinggi ini mengenai sudu-sudu turbin untuk membuatnya berputar. Sumbu atau poros dari turbin uap tersambung dengan perangkat generator sinkron melalui rotor yang digerakkan melalui mekanisme putaran. Mekanisme tersebut berupa generator listrik yang nantinya akan menghasilkan tenaga listrik.

Turbin uap pada suatu PLTU dengan bahan bakar batu bara terdiri atas 3 (tiga) macam turbin. Tiga macam turbin tersebut yaitu turbin tekanan tinggi (*high pressure turbine*) dengan uap kerja bertekanan tinggi, turbin tekanan menengah (*intermediate pressure turbine*) dengan uap kerja bertekanan menengah, dan turbin tekanan rendah (*low pressure turbine*) dengan uap kerja bertekanan rendah.

Selanjutnya, turbin uap berkapasitas besar memiliki beberapa macam *cylinder casing* yang dipakai pada turbin, yaitu *cross compound* dan *tandem compound*. *Cross compound* adalah suatu turbin dengan bagian *high pressure* (HP) dan bagian *low pressure* (LP) tersebar. Masing-masing bagian tersebut tergendong dengan suatu rotor generator. Sedangkan *tandem compound*

adalah suatu turbin dengan bagian *high pressure* (HP) dan bagian *intermediate pressure* (IP) terpisah, tetapi masih dalam satu sumbu yang terhubung dengan rotor generator.

Turbin yang dipergunakan dalam PLTU batu bara yang tipikal adalah tipe *tandem compound quadruple exhaust condensing reheat turbine* dengan kapasitas 400 MW dan kapasitas 600 MW, yang artinya sisi keluar uap atau *exhaust steam*-nya mempunyai 4 haluan yang dilengkapi dengan kondensor dan *reheat*.

Bagian-bagian dari turbin uap sebagai berikut.

1. Rumah Turbin

Rumah turbin disebut juga dengan *casing*. *Casing* ini berfungsi untuk melindungi uap yang diarahkan ke turbin melalui pipa uap agar tidak terjadi kebocoran yang menyebabkan rugi-rugi uap. Rugi-rugi uap ini sangat menentukan efisiensi dari suatu turbin uap.

2. Sudu tetap (*stator*)

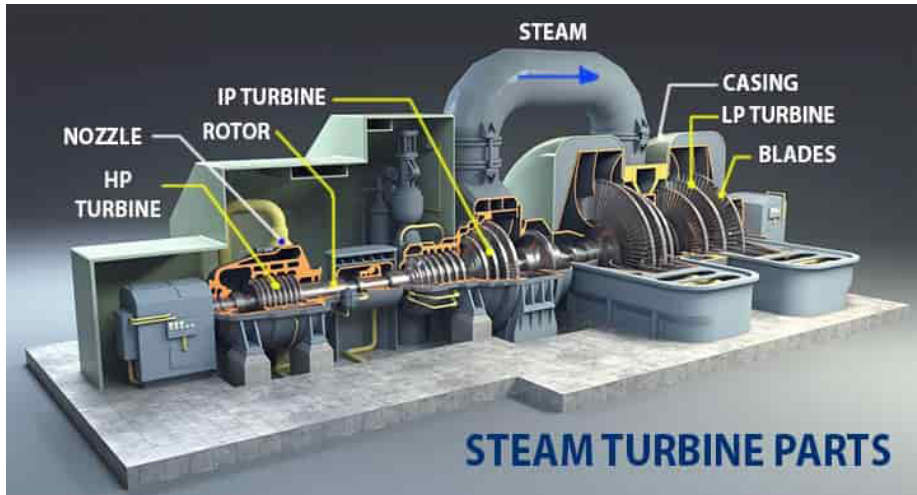
Stator merupakan serangkaian tingkat sudu tetap yang berfungsi sebagai *nozzle* yang mengubah energi panas yang berasal dari uap menjadi energi kinetik pada turbin.

3. Sudu jalan/ gerak (*rotor*)

Rotor adalah serangkaian tingkat sudu-sudu bergerak untuk mentransfer energi kinetik uap yang telah diekspansikan oleh *nozzle* (sudu tetap) menjadi energi putar poros atau torsi.

4. Bantalan (*bearing*)

Bantalan merupakan landasan tempat berputarnya rotor turbin dan didesain dengan sedemikian rupa sehingga tercipta gesekan yang minimal antara permukaan bantalan dengan poros turbin. Bantalan juga digunakan untuk menahan gaya radial yang ditimbulkan oleh rotor turbin.



Gambar 2.5 Turbin uap tipikal

5. Poros (*shaft*)

Poros merupakan bagian dari turbin yang menjadikan rotor pada berbagai tingkat menjadi satu kesatuan yang berperan mentransmisikan torsi rotor turbin untuk memutar bagian rotor generator listrik.

Pada Gambar 2.5 ditunjukkan komponen suatu *boiler* turbin uap yang biasa digunakan pada suatu PLTU. Contoh spesifikasi turbin PLTU batu bara diuraikan berikut ini.

Pabrik produsen turbin uap	: Mitsubishi
Negara	: Jepang
Jenis turbin uap	: Tandem compound quadruple Exhaust condensing reheat
Kapasitas daya turbin	: 600 MW
Tekanan uap (<i>steam</i>) masuk	: 169 kg/cm ²
Temperatur uap (<i>steam</i>) masuk	: 538° c
Tekanan uap keluar	: 68 mmHg.Abs

Laju putaran turbin	: 3000 rpm
Level	: 3
Jumlah sudu tekanan tinggi	: 10
Jumlah sudu tekanan menengah	: 7
Jumlah sudu tekanan rendah	: 2 x 7

2.4.4. Generator Sinkron

Generator adalah suatu alat yang bertugas mengubah energi mekanik yang berupa gerak memutar dari poros turbin yang terhubung ke poros generator, menjadi energi listrik.

Generator yang dipakai merupakan generator sinkron 3 *phase* yang terdiri atas tiga kumparan stator (kumparan jangkar) yang dipasang pada sudut 120 derajat satu sama lain, sedangkan rotor terdiri dari satu pasang kumparan medan (kutub magnet). Pada saat generator bergerak satu putaran penuh, akan dihasilkan 3 buah gelombang tegangan sinusoidal yaitu gelombang R, S, dan T.



Gambar 2.6. Generator sinkron tipikal

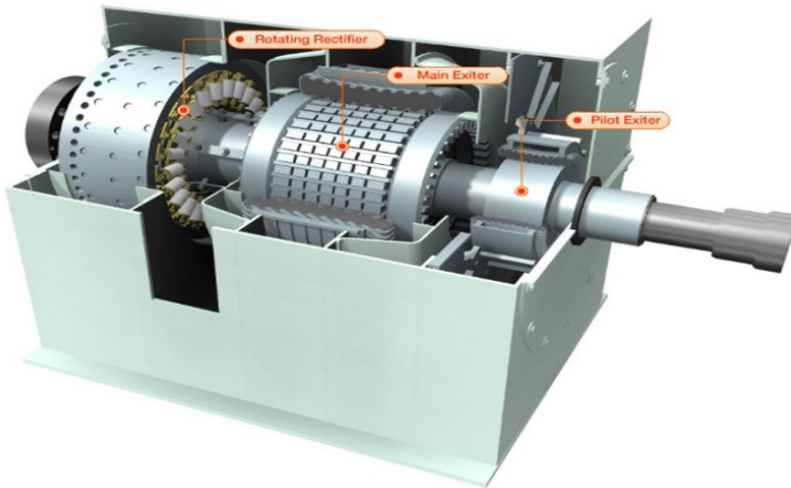
Pada Gambar 2.6 ditunjukkan komponen suatu generator sinkron tiga fase yang biasa digunakan pada suatu PLTU. Contoh spesifikasi generator pada suatu PLTU batu bara diuraikan berikut ini.

Pabrik produsen	: Mitsubishi
Negara	: Jepang
Laju putaran turbin	: 3000 rpm
Jumlah fase generator	: 3 fase
Frekuensi generator	: 50 Hz
Daya semu keluaran	: 767 MVA
Daya aktif keluaran	: 651.950 kW
Arus keluaran	: 19. 253 A
Tegangan emf keluaran	: 23 kV
Tegangan sistem eksitasi	: 590 V
Faktor daya generator	: 0,85
Pendingin generator	: gas hidrogen
Tekanan gas hidrogen (H_2)	: 5 kg /cm ²
Volume gas hidrogen (H_2)	: 125 m ³
Perbandingan hubung-singkat	: 0,58 pada 706 MVA
Jenis koneksi belitan	: Y

2.4.5.Sistem Eksitasi

Sistem eksitasi merupakan perangkat penting yang tidak bisa dipisahkan dari generator sinkron. Sebagaimana diketahui bahwa prinsip kerja generator sinkron adalah jika rotor generator diputar, maka kawat-kawat konduktor yang berupa lilitan pada rotor akan memotong medan magnet stator yang bersifat searah. Dengan dipotongnya medan magnet searah tersebut, pada stator dibangkitkan tegangan induksi (ggl) dengan frekuensi sesuai putaran rotornya. Medan magnet searah yang

terdapat pada stator inilah yang dihasilkan oleh *exciter* dalam sistem eksitasi generator sinkron.



Gambar 2.7 Perangkat eksitasi yang digunakan pada suatu generator untuk PLTU

Sumber :<http://www.brushlessgenerator.com/>

Pada Gambar 2.7 ditunjukkan suatu perangkat sistem eksitasi yang merupakan komponen penting pada suatu generator sinkron tiga fase yang biasa digunakan pada suatu PLTU. Contoh spesifikasi *brushless exciter* PLTU batu bara diuraikan berikut ini.

Pabrik produsen	: Mitsubishi
Negara	: Jepang
Jenis eksitasi	: Tertutup keseluruhan
Kapasitas Daya aktif	: 3300 kW
Tegangan keluaran	: 590 V
Arus keluaran	: 5593 A
Laju putaran rotor	: 3000 rpm

2.4.6. Penggiling Batu bara

Penggiling batu bara (*pulverizer mill*) adalah suatu perangkat penting yang berguna untuk menghaluskan bongkahan batu bara hingga menjadi halus pada ukuran yang diperlukan. Batu bara yang telah halus ini yang digunakan dalam proses pembakaran pada *boiler* PLTU.

Proses kerja dari penggiling batu bara harus memperhatikan:

- tingkat kehalusan batu bara sesuai diinginkan sehingga pembakaran batu bara maksimal,
- tingkat kekerasan (*grinfability*) batu bara, dan
- metode pengembusan serbuk batu bara yang dikeringkan menggunakan embusan udara yang hangat.



Gambar 2.8. Penggiling batu bara tipikal pada suatu PLTU batu bara

Pada Gambar 2.8 ditunjukkan suatu perangkat penggiling batu bara tipikal yang merupakan komponen penting pada suatu PLTU. Contoh spesifikasi penggiling batu bara pada suatu PLTU batu bara diuraikan berikut ini.

Pabrik produsen	: Babcock dan wicox,
Negara	: Canada
Jenis <i>pulverizer</i>	: MPS-89N
Kapasitas <i>pulverizer</i>	: 67.495 kg/jam, pada kelembapan batu bara 28,3%
Level kelembutan	: 200 Mesh
Laju putaran <i>pulverizer</i>	: 23,5 rpm
Spesifikasi motor listrik	: daya 522 kW, tegangan 3,3kV, arus 158 A, frekuensi 50 Hz

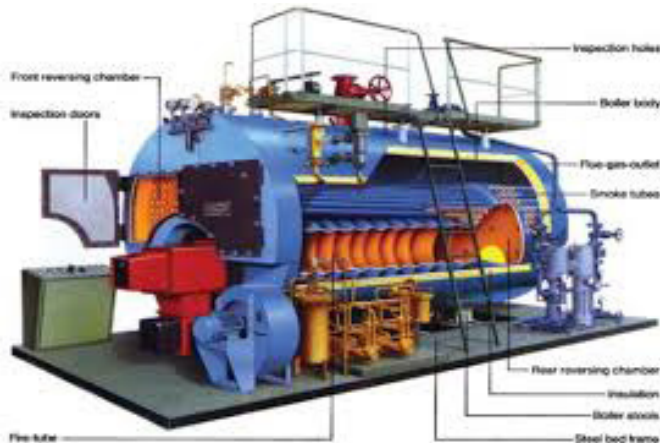
2.4.7. Pompa Pengisi Ketel (*Boiler Feedwater Pump, BFP*)

Boiler feedwater pump mempunyai fungsi untuk memompa air pengisi *boiler* setelah sebelumnya mengalami proses pemanasan awal pada *low pressure heater* dan telah menjalani proses *deaerasi*. Proses *deaerasi* yaitu suatu proses terjadinya pemanasan sekaligus untuk membuang oksigen dan gas lainnya yang tidak dapat diembunkan atau terkondensasi. BFP ini akan memompa air ke *high pressure heater* untuk menjalani proses pemanasan awal lanjut sebelum masuk ke *boiler*.

Contoh spesifikasi *boiler feedwater pump* PLTU Batu bara adalah sebagai berikut.

Pabrik produsen	: Mitsubishi
Negara	: Jepang
Jenis boiler	: Tipe horizontal empat langkah, <i>centrifugal doble cage</i>
Kapsitas pengisian	: 1.410 m ³ /jam
Tinggi <i>head</i>	: 2.670 m
Tekanan pompa	: 14,2 kg/m ²
Putaran	: 5.720 rpm

Spesifikasi motor : daya 5.960 kW, tegangan 10 kV, frekuensi 50 Hz, 3 fase, putaran 1.480 rpm



Gambar 2.9 Pompa pengisi ketel (*Boiler feedwater pump*)

Sumber: <http://artikel-teknologi.com/>

2.4.8. Pompa Air Pendingin

Pompa air pendingin ini digunakan sebagai *condenser* untuk mendinginkan uap panas dari turbin.

Contoh spesifikasi pompa air pendingin PLTU Batu bara adalah sebagai berikut.

Pabrik produsen	: Babcock dan wilcox
Negara	: Canada
Kapasitas pompa	: 180 m ³ /jam
Tinggi discharge	: 45,2 m
Tekanan pompa	: 2,0 kg/cm ²
Spesifikasi motor penggerak	: daya 1.300 kW, tegangan 10,5 kV, frekuensi 50Hz, 3 fase



Gambar 2.10 Pompa air pendingin

Sumber : <http://ridomanik.blogspot.com/>

2.4.9. Transformer Generator

Perangkat listrik yang dikenal sebagai generator transformator dapat mengubah dan mentransfer energi listrik melalui sambungan magnetik berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik. Kopling magnetik diperlukan untuk operasi berbasis induksi elektromagnetik transformator antara sirkuit primer dan sekunder. Fluks magnet dilakukan secara bersamaan sebagai hasil dari kopling ini, yang berbentuk inti besi. Transformator daya adalah bagian dari peralatan listrik yang mengubah tegangan rendah menjadi tegangan tinggi atau sebaliknya.

Perangkat transformator terdiri dari bagian-bagian sebagai berikut.

1. Inti besi untuk menampung fluks dari belitan kumparan transformator/
2. Kumparan yang terdiri dari lilitan kawat berisolasi.
3. *Bushing* atau konduktor yang diselubungi isolator.
4. Tangki untuk menampung minyak dan konservator yang merupakan sebuah tabung penampung pemuai volume minyak transformator.
5. Minyak transformator sebagai media pendingin dan isolator.



Gambar 2.11 Transformator pada pembangkit

Sumber: <http://german.alibaba.com/product-free/generator-transformer-110557555.html>

Contoh spesifikasi transformator pada suatu PLTU Batu bara sebagai berikut.

Pabrik produsen	: Mitsubishi
Negara	: Jepang
Jenis isolasi transformator	: isolasi minyak (<i>oil immersed</i>)
Daya semu transformator	: 411.000/548.000/685.000 kVA
Tegangan belitan primer	: 23 KV
Arus belitan primer	: 17.195 A
Tegangan belitan sekunder	: 500 V
Arus belitan sekunder	: 791 A
Frekuensi	: 50 Hz
Jumlah fase	: 3 fase
Uji sisi tegangan tinggi	: 1550 kV
Uji sisi tegangan rendah	: 125 kV
Uji sisi tegangan netral	: 125 kV
Prosentase impedansi	: 11,9 % pada daya semu 685 MVA

2.4.10. *Electrostatic Precipitator*

Dengan kemampuan efisiensi 99,5 persen, *electrostatic precipitator* merupakan alat yang digunakan untuk mengumpulkan abu pembakaran, memastikan tidak ada abu dalam asap yang dikeluarkan dari cerobong asap dan mencegah pencemaran lingkungan. Elektron yang ditangkap dalam perangkat ini ditarik ke dalam filter sehingga dapat dikumpulkan secara mekanis. Proyek konstruksi jalan dan produksi semen untuk bahan beton hanyalah dua aplikasi untuk bubuk abu batu bara.



Gambar 2.12 Penangkapan abu (*electrostatic precipitator*)

Sumber : <http://www.tjbsserver.com/>

Contoh spesifikasi *electrostatic precipitator* pada PLTU Batu bara adalah sebagai berikut.

Pabrik produsen : Lodge cotrell,
Negara : Ameriak Serikat

Kuantitas laju gas	: 1.347.823 Nm ³ /jam
Temperatur	: 195 °C
Laju aliran gas	: 1,47 m/detik
Jenis elektroda	: <i>square twisted element</i>
Tegangan DC pada elektroda	: 65 kV
Arus DC pada elektroda	: 1400 mA
Efisiensi perangkat	: 99,5 %
Kapasitas	: 25 ton/jam

2.4.11. Cerobong (*Stack*)

Cerobong asap di PLTU Batu bara dibuat sangat tinggi yaitu 200 meter sampai 275 meter. Hal ini dimaksudkan agar asap yang dibuang dapat langsung terbawa angin sehingga kandungan debu dan gas sisa pembakaran sampai *ground level* masih di bawah ambang batas.



Gambar 2.13 Cerobong atau stack

Sumber : PLTU suralaya, Banten 2010

Contoh spesifikasi *stack* atau cerobong asap PLTU Batu bara adalah sebagai berikut.

Jumlah cerobong	: 1 buah atau 1 unit
Tinggi cerobong	: 275 m
Diameter luar bagian bawah cerobong	: 25 m
Diameter luar bagian atas cerobong	: 14 m
Diameter pipa saluran gas buang	: 6,5 m
Temperatur gas masuk cerobong	: + 140° C
Kecepatan aliran gas	: + 2 m/detik
Bahan cerobong	: Beton dan bagian dalamnya tedapat 2 buah pipa saluran gas dengan diameter 6,5 m

2.5. Persamaan untuk Perhitungan Daya dan Kebutuhan Bahan Bakar.

Efisiensi Generator:

$$\eta_G = \text{pin}_G / \text{pout}_G \times 100\%$$

$$\text{Pin}_G = \text{Pout}_T$$

Di mana:

η_G : efisiensi generator

Pin_G : daya input dari generator

Pout_G : daya output dari generator

Pout_T : daya output dari turbin

Efisiensi Turbin

$$\eta_T = \text{pin}_T / \text{Pout}_T \times 100\%$$

Di mana:

n_T : efisiensi turbin

pin_T : daya input dari turbin

Jumlah uap yang dibutuhkan untuk memutar turbin dihitung sebagai berikut.

$$\text{Jumlah uap} = \frac{P_{in_T}}{\text{Kerja Turbin}}$$

$$\text{Kerja turbin} : H_3 - H_4$$

$$H_4 = H_1 + H_4 (H_5 - H_1)$$

$$X_4 = \frac{S_3 - S_1}{S_5 - S_1}$$

Di mana:

P_{in_T} : daya input dari turbin

H_1 : tekanan masuk boiler (KJ/s)

H_2 : tekanan masuk turbin (Kj/Kg)

H_3 : tekanan keluar turbin (Kj/kg)

H_4 : tekanan keluar kondenser (kj/kg)

S_1 : entropoli masuk boiler (kj/kg)

S_3 : entropoli masuk turbin (kg/kj)

S_5 : entropoli keluar kondenser (kg/kj)

Entropi → energi per satuan suhu

Tekanan masuk turbin:

$$P_{Tin} = (P_{Tin\ turbin} + P_{Truangan})$$

Di mana:

$P_{Tin\ turbin}$: tekanan pada alat ukur (kPa)

$P_{Truangan}$: tekanan ruangan (kPa)

Jumlah kalor yang dibutuhkan untuk menaikkan temperatur air (pada boiler):

$$Q_{BB} = \frac{m(H_3 - H_1)}{\eta_B}$$

Di mana:

Q_{BB} : jumlah kebutuhan kalor (kj/jam)

m : laju aliran uap *steam* (kg/s)

H_1 : tekanan masuk *boiler* (kj/kg)

H_3 : tekanan masuk turbin (kj/kg)

n_B : efisiensi *boiler* (%)

Nilai kalor tertinggi pada batu bara yang digunakan:

$$HHV = 8080C + 34500 (H - 0/8) + 2220S$$

Di mana:

C : jumlah komponen karbon dalam %

H : jumlah komponen hidrogen dalam %

O : jumlah komponen oksigen dalam %

S : jumlah komponen sulfur dalam %

Kebutuhan udara teoretis pembakaran:

$$V_{og} = 11,5.C - 34,5 (H - 0/8) + 4,32.S$$

Di mana:

V_{og} : Kebutuhan udara teoretis pembakaran

C : Carbon (%)

H : Hidroen (%)

O : Oksigen (%)

S : Sulfur (%)

A : debu (%)

Kebutuhan udara lebih:

$$m = 21/(21-0)$$

Di mana:

m : Kebutuhan udara lebih

O : Oksigen (%)

Kebutuhan udara untuk pembakaran aktual :

$$U_g = m.V_{og}$$

Di mana:

U_g : kebutuhan udara untuk pembakaran aktual

m : kebutuhan udara lebih

V_{og} : kebutuhan udara teoretis pembakaran

Laju aliran udara yan dibutuhkan untuk membakar batu bara:

$$m_{udara} = U_g \cdot BB$$

Di mana:

m_{udara} : laju aliran udara

U_g : kebutuhan udara untuk pembakaran aktual

BB : konsumsi batu bara per jam

Debit aliran udara:

$$Q = M_{udara} / P_{udara}$$

Di mana:

Q = debit aliran udara

M_{udara} : laju aliran udara

P_{udara} : massa jenis udara

Berat gas asap yang dihasilkan dari pembakaran:

$$G_g = U_g + (1 - A)$$

Di mana:

G_g : berat gas asap

U_g : kebutuhan udara untuk pembakaran aktual

A : debu (%)

Laju aliran gas asap yang terbentuk dari pembakaran batu bara:

$$m_{gas} = G_g \cdot BB$$

Di mana:

m_{gas} : laju aliran gas asap

G_g : berat gas asap

BB : konsumsi batu bara per jam

Debit aliran gas buang:

$$Q_{m_{gas}} / P_{gas}$$

Di mana:

Q : debit aliran gas buang

m_{gas} : laju aliran gas asap

P_{gas} : massa jenis gas

Energi hasil pembakaran batu bara

P_{out} pembakaran = nilai kalor $\times \eta_{BB}$

Di mana:

η_{BB} efisiensi pembakaran batu bara

jumlah batu bara yang dibutuhkan dalam proses pembakaran :

$$Q_{batu\ bara} = \frac{Q_B}{P_{out}\ Pembakaran}$$

Di mana:

$Q_{batu\ bara}$: jumlah batu bara yang dibutuhkan dalam proses pembakaran

Q_{BB} : jumlah kalor (kj/jam)

Electrostatic presipitator (EP) atau penangkap debu

Medan elektrik maksimum yang dihasilkan:

$$E_{max} : 630.000 \left(\frac{T_{ref}}{T} \cdot \frac{P}{P_{ref}} \right)$$

Di mana:

E_{max} : medan elektrik maksimum

T_{ref} : suhu gas referensi

T : suhu gas

P_{ref} : tekanan gas referensi

P : tekanan gas

Tegangan operasi EP:

$$V = W \cdot E_{\max}$$

Di mana:

V : tegangan operasi

W : jarak antara *wire* dan plat

E_{max} : medan elektrik maksimum

Luasan elektroda:

$$A = \frac{Q_u}{V_d} \ln(1 - \eta_{EP})$$

Di mana:

A : liasan elektroda

Q_u : debit aliran udara

η_{EP} : efisiensi *electrostatic precipitator* (EP)

Stack atau cerobong

Tinggi kepulan asap (gas buang)

$$\Delta H = \frac{V_{s,d}}{U} (1,5(2,68 \times 10^{-2} (P) \frac{(T_s - T_a)}{T_s})d)$$

Di mana:

ΔH : tinggi kepulan asap

V_s : kecepatan aliran gas

d : diameter pipa

U : kecepatan angin

P : tekanan atmosfer

T_s : suhu *stack* atau cerobong

T_a : suhu atmosfer

Tinggi efektif cerobong:

$$h = h_{\text{parameter}} + \Delta H$$

Di mana:

h : tinggi efektif cerobong

$h_{\text{parameter}}$: tinggi parameter cerobong

Pompa

Kerja spesifik pompa masuk adalah sebagai berikut.

$$W_{\text{pump,in}} = V_1 (P_2 - P_1)$$

Di mana:

$W_{\text{pump,in}}$: kerja spesifik pompa masuk (kj/kg)

V_1 : Volume cairan (m³/kg)

P_1 : Tekanan masuk *boiler* (kPa)

P_2 : tekanan keluar *boiler* (kPa)

Kondensor

Panas yang terbuang oleh kondensor

$$Q_{\text{out}} = h_s - h_4$$

Di mana:

H_4 : Entalpi uap yang masuk ke kondensor (kj/kg)

H_s : Entalpi air yang keluar dari kondensor (kj/kg)

2.6. Persamaan untuk Perhitungan Biaya Pembangkitan Biaya Modal (Capital Cost)

Perhitungan CRF

$$\text{CRF} = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$$

Di mana:

CRF : Capitas cost Recovery Factory

i : nilai tingkat suku bunga

n : umur pembangkit

Biaya pembangunan (BP)

$$\text{Biaya pembangunan} = \frac{\text{Biaya investasi}}{\text{kapasitas}}$$

Di mana:

Biaya pembangunan (BP) : dalam satuan (US \$/Kw)

Biaya investasi pembangkit : dalam satuan (US \$)

Kapasitas pembangkit : dalam satuan (Kw)

Perhitungan jumlah pembangkitan energi netto (C_n)

$$C_n = P \times Z \times 8760$$

Di mana:

C_n : jumlah pembangkitan energi netto (GWh/Tahun)

P : kapasitas daya pembangkit (Watt)

Z : Faktor kapasitas pembangkit

Biaya modal atau *Capitas Cost* (CC)

$$CC = \frac{BP \times P \times CRF}{C_n}$$

Di mana:

CC : *Capital Cost* (US \$ /Kwh)

BP : biaya pembangunan (US \$ /Kw)

P : kapasitas daya pembangkit (W)

CRF : *Capital cost Recovery*

Biaya bahan bakar

$$FC = \frac{HBA}{1/\text{konsumsi}}$$

Di mana:

FC : biaya bahan bakar (US\$ /Kwh)

HBA : harga bahan bakar acuan (US\$/Kg)

Konsumsi : konsumsi batu bara per kWh (kg/kWh)

Biaya operasi dan perawatan

$$\text{O \& M cost} = \frac{4\% \text{ total investasi}}{C_n}$$

Di mana:

O & M cost = biaya operasi dan perawatan (US\$/kWh)

Biaya pembangkit total

$$\text{TC} = \text{CC} + \text{FC} + \text{O \& M cost}$$

Di mana:

TC : biaya pembangkitan total (US\$/kWh)

CC : capital cost (US\$/Kwh)

FC : biaya bahan bakar (US\$/Kwh)

O & M cost: biaya operasi dan perawatan (US\$/kWh)

2.7. Pendapatan per Tahun dan Payback Period

Keuntungan Penjualan

$$\text{KP} = \text{BPP} - \text{TC}$$

Di mana:

KP : keuntungan penjualan (Cent US\$/kWh)

BPP : harga pembelian tertinggi (US\$/kWh)

TC : biaya pembangkitan total (US\$/kWh)

Keuntungan per tahun

$$\text{CIF} = \text{KP} \times C_n$$

Di mana:

CIF = keuntungan pertahun (US\$)

Payback Period

$$\text{PP} = \frac{\text{biaya investasi}}{\text{CIF}}$$

Di mana:

PP = *Payback Period* (tahun)

Return of Investment

$$ROI_n = \frac{\text{laba}_t - \text{investasi}}{\text{investasi}}$$

Di mana:

ROI_n : *Return of Investment*

Lab_n : Keuntungan per tahun = CIF (US\$)

Benefit Cost ratio (BCR)

$$BCR_n = \frac{\text{laba}_n}{\text{biaya investasi}}$$

Di mana:

BCR_n = *Benefit Cost Ratio*

2.8 Contoh Perhitungan Kebutuhan Bahan Bakar

2.8.1. Batu bara

Perhitungan kebutuhan bahan bakar pada PLTU batu bara dengan menggunakan subbitumin, (komposisi batu bara; Carbon 59,0 %, Hydrogen 3,8% ,sulphur 1,6 %,Oxygen 7,4 %, Nitrogen 1,2 %, Ash 16,0 %, Moisture 11,0%) 581590,817 kg/jam. Efisiensi pembakaran 94 % (7).

Daya hasil pembakaran batu bara:

Nilai kalor pada 1 kg batu bara = 5500 kkal/kg = 23027,96 kJ/kg

$P_{\text{out pembakaran}} = \text{nilai kalor pada 1 kg batu bara} \times \eta_{\text{pembakaran}}$

= 23027,96 kJ/kg x 0,94

= 21646,28 kJ/ kg

2.8.2. Boiler

Dari hasil daya pembakaran batu bara, akan dihasilkan jumlah panas:

$$\begin{aligned} Q_{\text{bahan bakar}} &= Q_f \times P_{\text{out pembakaran}} \\ &= 433.099,54 \text{ kg/jam} \times 21.646,28 \text{ kJ/kg} \\ &= 9.374.995.049 \text{ kJ/jam} \end{aligned}$$

Maka, jumlah panas yang diberikan adalah 9.374.995.049 kJ/jam untuk menaikkan temperatur 28° C menjadi uap 540° C dengan efisiensi boiler 84 % dan laju uap steam yang dihasilkan dari boiler sebagai berikut.

$$\begin{aligned} \eta_{\text{boiler}} &= m \times (h_e - h_1) / Q_{\text{bahan bakar}} \\ m &= \frac{0,84 \times 9.374.995.049 \text{ kJ/jam}}{(3388,344 - 2431,692) \text{ kJ/kg}} \\ m &= 752,925 \text{ kg/s} \end{aligned}$$

nilai kalor tertinggi pada batu bara yang digunakan:

$$\begin{aligned} \text{HHV} &= 8080C + 34500 (H - 0/8) + 22220S \\ &= 8080C \times 0,59 + 34500 \times (0,038 - (0,074/8)) + 2220 \times 0,16 \\ &= 6114,275 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

Kemudian, kebutuhan udara yang dibutuhkan untuk pembakaran tiap kg ke batu bara sebagai berikut.

$$\begin{aligned} U_{\text{og}} &= 11,5C - 34,5 (H - 0/8) + 4,32S \\ &= 11,5 \times 0,59 - 34,5 \times (0,038 - (0,074/8)) + 4,32 \times 0,16 \\ &= 5,862 \text{ kg}_{\text{udara}} / \text{kg}_{\text{BB}} \end{aligned}$$

Sedangkan kebutuhan udara lebih (*excess air*) sebagai berikut.

$$\begin{aligned} M &= 21 / (21 - O_2) \\ &= 21 / (21 - 7) \\ &= 1,5 \end{aligned}$$

Jadi, kebutuhan udara untuk pembakaran aktual:

$$U_g = m \cdot U_{\text{og}}$$

$$= 1,5 \cdot 5,862 \text{ kg}_{\text{udara}} / \text{kg}_{\text{BB}}$$

$$= 8,793 \text{ kg}_{\text{udara}} / \text{kg}_{\text{BB}}$$

Laju aliran udara yang dibutuhkan untuk membakar 433.099,54 kg/jam:

$$m_{\text{udara}} = U_g \cdot BB$$

$$= 8,793 \text{ kg}_{\text{udara}} / \text{kg}_{\text{BB}} \cdot 433.099,54 \text{ kg/jam}$$

$$= 3.808.244,295 \text{ kg}_{\text{udara}} / \text{jam}$$

Debit aliran udara dalam m^3/jam :

$$Q = m_{\text{udara}} / P_{\text{udara}}$$

$$= 3.808.244,295 \text{ kg}_{\text{udara}} / \text{jam} / 1,29$$

$$= 2.952.127,361 \text{ m}^3_{\text{udara}} / \text{jam}$$

Berat gas asap yang dihasilkan dari pembakaran:

$$G_g = U_g + (1 - A)$$

$$= 8,793 \text{ kg}_{\text{Gas}} / \text{kg}_{\text{BB}} + (1 - 0,16)$$

$$= 9,633 \text{ kg}_{\text{Gas}} / \text{kg}_{\text{BB}}$$

Laju aliran gas asap yang terbentuk dari pembakaran 433.099,54/jam batu bara:

$$m_{\text{gas}} = G_g \cdot BB$$

$$= 9,633 \text{ kg}_{\text{Gas}} / \text{kg}_{\text{BB}} \cdot 433.099,54 / \text{jam}$$

$$= 4.172.047,869 \text{ kg}_{\text{Gas}} / \text{jam}$$

Debit aliran gas langsung dalam m^3/jam :

$$Q = m_{\text{gas}} / P_{\text{gas}}$$

$$= 4.172.047,869 \text{ kg}_{\text{Gas}} / \text{jam} / 1,286$$

$$= 3.244.205,186 \text{ m}^3_{\text{gas}} / \text{jam}$$

2.8.3 Turbin

Dari hasil pembakaran batu bara pada *boiler*, diperoleh tekanan uap yang masuk ke turbin sebesar $169 \text{ kg}/\text{cm}^2$. Temperatur uap masuk 538°C dan tekanan uap keluar $68 \text{ kg}/\text{cm}^2$. Dari data yang diketahui, tekanan

masuk turbin adalah sebesar:

$$\begin{aligned}
 (P_{in}) &= 169 \text{ kg/cm}^2, \text{ ditambah dengan } 1 \text{ atm.} \\
 \text{Tekanan } 1 \text{ kg/cm}^2 &= 98,07 \text{ kPa} \\
 \text{Tekanan masuk turbin rata-rata} &= 169 \text{ kg/cm}^2 \\
 &= 169 \times 98,07 \text{ kPa} = 16.573,83 \text{ kPa} \\
 \text{Tekanan ruangan } 1 \text{ atm} &= 101,325 \text{ kPa} \\
 \text{Daya masuk } (P_{in}) &= (\text{Tekanan pada alat ukur} + \\
 &\quad \text{Tekanan ruangan}) \text{ kPa} \\
 &= (16.573,83 + 101,325) \text{ kPa} \\
 &= 16.675,155 \text{ kPa (abs)}
 \end{aligned}$$

Nilai tekanan masuk turbin yang diperoleh adalah sebesar 16.675,155 kPa, sedangkan untuk tekanan keluar turbin adalah sebesar $(P_{out}) = 68 \text{ kg/cm}^2$. Maka:

$$\begin{aligned}
 \text{Tekanan } 1 \text{ kg/cm}^2 &= 98,07 \text{ Kpa} \\
 \text{Tekanan keluar turbin rata-rata} &= 68 \text{ kg/cm}^2 \\
 &= 68 \times 98,07 \text{ kPa} \\
 &= 6.668,76 \text{ kPa} \\
 \text{Tekanan ruangan } 1 \text{ atm} &= 101,325 \text{ kPa} \\
 \text{Daya keluar } (P_{out}) &= (\text{tekanan pada alat ukur} + \\
 &\quad \text{tekanan ruangan}) \text{ kPa} \\
 &= (6.668,76 + 101,325) \text{ kPa} \\
 &= 6.770,085 \text{ kPa (abs)}
 \end{aligned}$$

Jadi, nilai tekanan keluar turbin yang diperoleh adalah sebesar 6.770,085 kPa.

Setelah mendapatkan tekanan masuk dan tekanan keluar turbin, dapat dicari entalpi masuk turbin dan keluar turbin. Untuk mendapatkan nilai efisiensi turbin, diperlukan beberapa tahap yaitu dari tekanan masuk boiler yaitu penjumlahan antara tekanan ruangan 1 atm dengan tekanan

dearator 0,7 kg/cm²G sehingga dapat dicari entalpi fluida masuk *boiler* (h_1) sebagai berikut.

$$\text{Tekanan 1 kg/cm}^2 = 98,07 \text{ kPa}$$

$$\text{Tekanan masuk boiler} = 0,7 \text{ kg/cm}^2$$

$$= 0,7 \times 98,07 \text{ kPa} = 68,649 \text{ kPa}$$

$$\text{Tekanan ruangan 1 atm} = 101,325 \text{ kPa}$$

$$\text{Daya keluar (Pout)} = (\text{tekanan pada alat ukur} + \text{tekanan ruangan}) \text{ kPa}$$

$$= (68,649 + 101,325) \text{ kPa}$$

$$= 169,974 \text{ kPa (abs)}$$

Jadi, nilai tekanan keluar turbin yang diperoleh adalah sebesar 169,974 kPa. Dari data tekanan masuk *boiler* dapat ditentukan entalpi masuk *boiler* dengan melihat tabel 2.3, kemudian hasil tersebut dilakukan interpolasi dari data tabel 2.3 sehingga diperoleh:

Tabel 2.2 Interpolasi

$\frac{x - 467,13}{487,01 - 467,13} = \frac{169,974 - 150}{175 - 150}$	$\frac{X - 0,001053}{0,001057 - 0,001053} = \frac{169,974 - 150}{175 - 150}$
$\frac{x - 467,13}{19,88} = \frac{19,974}{25}$	$\frac{X - 0,001053}{0,000004} = 0,79896$
$\frac{x - 467,13}{19,88} = 0,79896$	$x - 0,001053 = 3,16 \times 10^{-6}$
$x - 467,13 = 15,28$	$v_f/X = 0,00105616 \text{ kJ/kg}$
$x = 15,28 + 467,13$	
$h_f/X = 483,01 \text{ kJ/kg}$	
$\frac{X - 1,4337}{1,4850 - 1,4337} = \frac{169,974 - 150}{175 - 150}$	
$x - 1,4337 = 0,040527$	
$S_f/x = 1,4742 \text{ kJ/kg}$	

Tabel 2.3 Output tekanan turbin

P	h_f	V_f	S_f
150	467,13	0,001053	1,4337
169,974	X	X	X
175	487,01	0,001057	1,4850

Maka, diperoleh

$$H_1 : 483,01 \text{ kJ/kg}$$

$$V_1 : 0,00105616 \text{ kJ/kg}$$

$$S : 1,4742 \text{ kJ/kg}$$

Selanjutnya, dari entalpi fluida masuk *boiler* dapat dicari entalpi fluida keluar *boiler* (h_2) yaitu:

$$\text{Tahap 2 } P_2 = 16.675,155 \text{ kPa}$$

$$S_2 = S_1$$

Kerja spesifik pompa masuk adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned} W_{\text{pump,in}} &= V_1 (P_2 - P_1) \\ &= 0,00105616 \text{ m}^3/\text{kg} \times (16.675,155 - 169,974) \text{ kPa} \\ &= 17,4321 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} H_2 &= h_1 + W_{\text{pump,in}} \\ &= 483,01 \text{ kJ/kg} + 17,4321 \text{ kJ/kg} \\ &= 500,4421 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

Selanjutnya, pada tahap tiga dari temperatur turbin dapat dicari (h_3) dan (s_3) sebagai berikut.

Tahap 3

$$T_3 = 538^\circ\text{C} \text{ (tabel 2.3) interpolasi,}$$

$$H_3 = 3388,344 \text{ kJ/kg}$$

$$S_3 = 6,382392 \text{ kJ/kg K}$$

Pada tahap tiga dari spesifikasi pompa dapat dicari (h_5) dan (s_5) sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 \text{Tekanan } 1 \text{ kg/cm}^2 &= 98,07 \text{ kPa} \\
 \text{Tekana keluar pompa} &= 2 \text{ kg/cm}^2 \\
 &= 2 \times 98,07 \text{ kPa} = 196,14 \text{ kPa} \\
 \text{Tekanan ruangan } 1 \text{ atm} &= 101,325 \text{ kPa} \\
 \text{Daya keluar (pout)} &= (\text{tekanan pada alat ukur} + \text{tekanan} \\
 &\quad \text{ruangan}) \text{ kPa} \\
 &= (196,14 + 101,325) \text{ kPa} \\
 &= 297,465 \text{ kPa (abs)}
 \end{aligned}$$

Jadi, nilai tekanan keluar turbin yang diperoleh adalah sebesar 297,465 kPa.

Dari tekanan keluar pompa maka entalpi dapat dicari dengan melihat tabel 2.2, diperoleh data:

$$H_5 = 560,155 \text{ kJ/kg}$$

$$S_5 = 1,66408 \text{ kJ/kg K}$$

Selanjutnya, untuk mencari h_4 dapat dicari sebagai berikut.

$$S_1 = 1,4742 \text{ kJ/kg} \quad h_1 = 3388,344 \text{ kJ/kg}$$

$$S_3 = 6,382392 \text{ kJ/kg} \quad h_3 = 3388,344 \text{ kJ/kg}$$

$$S_5 = 1,6695 \text{ kJ/kg} \quad h_5 = 3388,344 \text{ kJ/kg}$$

$$S_4 = s_3 = 6,2120 \text{ kJ/kg}^\circ\text{K}$$

$$X_{4a} = \frac{s_2 - s_1}{s_5 - s_1}$$

$$\begin{aligned}
 X_{4a} &= \frac{6,382392 - 1,4742}{1,6685 - 1,4742} = 25,26
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 H_4 &= h_1 + x_{4a} (h_5 - h_1) \\
 &= 483,01 \text{ kJ/kg} + 25,26 (560,155 \text{ kJ/kg} - 483,01 \text{ kJ/kg}) \\
 &= 2431,692 \text{ kJ/kg}
 \end{aligned}$$

Laju uap *steam* (m) yang dihasilkan = 752,925 kg/s

Selanjutnya, daya input turbin uap adalah

$$\begin{aligned} Wt &= m (h_3 - h_4) \\ &= 752,925 \text{ kg/s} \times (3388,344 - 2431,692) \text{ kJ/kg} \\ &= 720287,2071 \text{ kJ/s} \end{aligned}$$

Efisiensi turbin yang digunakan 85 % sehingga dengan output turbin uap:

$$\begin{aligned} n_{\text{turbin}} &= P_{\text{output turbin}} / P_{\text{input turbin}} \\ P_{\text{output turbin}} &= n_{\text{turbin}} \times P_{\text{input turbin}} \\ &= 0,85 \times 720287,2071 \text{ kJ/s} \\ &= 612244,126 \text{ kJ/s} \end{aligned}$$

2.8.4 Output Generator

Ouput generator adalah

$$\begin{aligned} n_{\text{generator}} &= P_{\text{output generator}} / P_{\text{input generator}} \\ P_{\text{output generator}} &= n_{\text{generator}} \times P_{\text{input generator}} \\ &= 0,98 \times 612244,126 \text{ kJ/s} \\ &= 599999,2435 \text{ kJ/s} \\ &= 599,9992435 \text{ MW} = 600 \text{ MW} \end{aligned}$$

Sehingga daya ouput generator adalah 600 MW.

Dari perhitungan PLTU yang memiliki kapasitas 600 MW dengan faktor kapasitas 0,85 menggunakan bahan bakar batu bara sedang (subbituminious) dengan nilai kalori 5500 kkal/kg, maka dari perhitungan tersebut didapatkan hasil konsumsi batu bara, seperti pada tabel 2.4 berikut.

Tabel 2.4 Konsumsi Batu bara

Kapasitas (MW)	Konsumsi/jam (ton/jam)	Konsumsi/jam (ton/hari)	Konsumsi/jam (ton/tanah)
600	433,099	10.827,475	3.952.028,375

Energi listrik per tahun dari PLTU

$$\begin{aligned} \text{Energi listrik} &= \text{kapasitas} \times \text{jam operasi} \times \text{faktor kapasitas} \\ &= 600 \text{ MW} \times 8760 \text{ jam/tahun} \times 0,85 \\ &= 4.467.600.000 \text{ kWh/tahun} \end{aligned}$$

Kebutuhan batu bara untuk produksi 1 kWh

$$\begin{aligned} \text{Kebutuhan batu bara untuk produksi 1 kWh} &= \frac{\text{konsumsi energi}}{\text{energi listrik}} \\ &= \frac{3952.028.375 \text{ kg/ tahun}}{4.467.600.000 \text{ kWh/tahun}} \\ &= 0,8846 \text{ kg/kWh} \end{aligned}$$

Jika dioperasikan 25 tahun, maka:

$$\begin{aligned} \text{Jumlah batu bara yang dibutuhkan selama operasi} &= \text{konsumsi pertahun} \times 25 \text{ tahun} \\ &= 3.952.028.375 \text{ kg/tahun} \times 25 \text{ tahun} = 98.800.709.380 \text{ kg} \end{aligned}$$

Karena batu bara yang digunakan dipasok dari Indonesia, jika dibandingkan dengan cadangan batu bara yang dimiliki (data tahun 2015) maka:

Pemakaian batu bara untuk PLTU:

$$\begin{aligned} &= (\text{konsumsi per tahun} \times 25 \text{ tahun}) / (\text{cadangan batu bara}) \times 100 \% \\ &= 0,00319 \% \end{aligned}$$

Kondensor

Panas yang terbuang oleh kondensor:

$$\begin{aligned} Q_{\text{out}} &= h_5 - h_4 \\ &= (2431,692 - 560,155) \text{ kJ/kg} \\ &= 1871,537 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

Pompa

Kerja spesifik pompa masuk adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned} W_{\text{pump,in}} &= V_1 (P_2 - P_1) \\ &= 0,00105616 \text{ m}^3 / \text{kg} \times (16.675,155 - 169,974) \text{ kpa} \\ &= 17,4321 \text{ kj/kg} \end{aligned}$$

Electrostatic (ESP)

Dengan kecepatan aliran udara yang keluar dari hasil pembakaran 1,5m/s dengan suhu 197° C, efisiensi 0,995, jarak antara *wire* dan plat 015m, dan tekanan gas masuk *electrostatic precipator* 110 kPa, debit aliran gas buang 3.244.205,186 m³_{gas} /jam = 901,17 m³_{gas} /s, medan listrik maksimum yang dihasilkan adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned} E_{\text{max}} &= 630.000 (T_{\text{ref}} / T \cdot P / P_{\text{ref}}) \\ &= 630.000 (273/470 \cdot 110/101,3) \\ &= 435.731,52 = 436.000 \text{ V/m} \end{aligned}$$

Tegangan operasi ESP :

$$\begin{aligned} V &= W \cdot E_{\text{max}} \\ &= 0,15 \times 436.000 \text{ v/m} \\ &= 65.400 \text{ Volt} \end{aligned}$$

Luasan elektroda :

$$\begin{aligned} A &= -Qu / Vd \ln (1 - n_{\text{EP}}) \\ &= -901,17 / 1,5 \ln (1 - 0,995) \\ &= 3183,12 \text{ m} \end{aligned}$$

2.9 Biaya Pembangkitan

Biaya modal (*capital cost*)

Perhitungan modal bergantung pada besarnya tingkat suku bunga dan umur ekonomis. Nilai tingkat suku bunga (*i*) yang digunakan adalah suku bunga per tahun yang harus dibayar per tahun (*n*).

Perhitungan CRF

Nilai tersebut kemudian akan digunakan untuk menghitung CRF (*capital recovery factor*) dengan memperhitungkan umur pembangkit suku bunga yang digunakan sebesar 7,5 % berdasarkan BI rate per 14 april 2015⁽⁸⁾, sehingga CRF adalah :

$$CRF = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} = \frac{0,075}{(1+0,075)^{25} - 1} = 0,08971$$

Biaya pembangunan

Biaya pembangunan merupakan biaya investasi pembangkit (US\$) dengan kapasitas (kW). Jika investasi pembangkit sebesar 750 juta US\$ (9) dan kpsitas pembangkit 600 MW = 600.000 kW, biaya pembangunan adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned} \text{Biaya pembangunan} &= \frac{\text{biaya investasi}}{\text{Kapasitas}} = \frac{750.000.000}{600.000} \\ &= 1.250 \text{ US\$/kW} \end{aligned}$$

Perhitungan jumlah pembangkitan energi netto (C_n)

$$\begin{aligned} C_n &= P \times Z \times 8760 \\ &= 600.000.000 \times 0,85 \times 8760 \\ &= 4,4676 \times 10^{12} \text{ Wh/tahun} \\ &= 4467,6 \text{ GWh/tahun} \end{aligned}$$

Dengan demikian, biaya modal atau capital cost (CC) sebesar:

$$\begin{aligned} CC &= \frac{\text{Biaya pembangunan} \times \text{kapasitas pembangkit} \times CRF}{C_n} \\ &= \frac{1250 \times 600.000 \times 0,08971}{4.467.600.000} = 0,01560 \text{ US\$/kWh} \\ &= 1,560 \text{ cent US\$/kWh} \end{aligned}$$

Biaya bahan bakar

Harga batu bara acuan (HBA) subbituminous dengan 5500 kkal/kg 47,85 US\$/ton atau 0,04785 US\$/kg⁽¹⁰⁾ dan besarnya penggunaan batu bara per kWh adalah 0,8846 kg/kWh. Maka, biaya bahan bakar adalah

$$\begin{aligned} FC &= \frac{\text{HBA}}{1/\text{konsumsi}} = \frac{0,04785}{1,14} = 0,04160 \text{ US\$/kWh} \\ &= 4,160 \text{ cent US\$/kWh} \end{aligned}$$

Biaya operasi dan perawatan

Biaya ini diperkirakan sebesar 3% dari total investasi, sehingga O & M cost per kWh adalah:

$$\begin{aligned} \text{O \& M cost} &= \frac{3\% \text{ total investasi}}{C_n} = \frac{22.500.000}{4.467.600.000} = 0,00503 \text{ US\$/ kWh} \\ &= 0,0503 \text{ cent US\$/kWh} \end{aligned}$$

Biaya pembangkitan total

$$\begin{aligned} \text{TC} &= \text{CC} + \text{FC} + \text{O\&M cost} = 1,566 + 4,16 + 0,503 \\ &= 6,25 \text{ cent US\$/kWh} \end{aligned}$$

Pendapatan per tahun dan *payback period*

Jika harga jual listrik ke PLN berdasarkan Peraturan Menteri ESDM Nomor 03 Tahun 2015 bahwa harga pembelian tertinggi tenaga listrik (BPP) PLTU 600 MW non-mulut tambang sebesar 6,96 cent US\$/kWh (11), maka perhitungan penjualan per kWh listrik adalah:

$$\text{KP} = \text{BPP} - \text{TC} = 6,96 - 6,25 = 0,71 \text{ cent US\$/kWh}$$

Dan, pendapatan/ keuntungan per tahun (*cash in flow*) sebesar:

$$\text{CIF} = \text{KP} \times C_n = 0,0071 \times 4.467.600.000 = 31.719.960 \text{ US\$}$$

Sehingga, *payback period* adalah

$$PP = \frac{\text{biaya investasi}}{\text{CIF}} = \frac{750.000.000}{31.719.960} = 23.64 \text{ tahun}$$

Return of Investment

Besarnya *return of investment* pada tahun pertama sebesar

$$ROI_1 = \frac{\text{laba}_1 - \text{investasi}}{\text{Investasi}} = \frac{31.719.960 - 750.000.000}{750.000.000} = -0,958$$

Tahun kedua

$$ROI_2 = \frac{\text{laba}_2 - \text{investasi}}{\text{Investasi}} = \frac{(31.719.960 \times 2) - 750.000.000}{750.000.000}$$

Tahun ketiga

$$ROI_3 = \frac{\text{laba}_3 - \text{investasi}}{\text{Investasi}} = \frac{(31.719.960 \times 3) - 750.000.000}{750.000.000}$$

Tahun keempat

$$ROI_4 = \frac{\text{laba}_4 - \text{investasi}}{\text{Investasi}} = \frac{(31.719.960 \times 4) - 750.000.000}{750.000.000}$$

Benefit Cost Ratio (BCR)

Benefit Cost Ratio (BCR)

Benefit Cost Ratio (BCR) merupakan presentase pertumbuhan keuntungan selama setahun, yang dapat dicari berdasarkan keuntungan pada tahun tersebut berbanding biaya investasi. Dengan demikian, besarnya *benefit cost ratio* adalah:

Tahun pertama

$$BCR_1 = \frac{\text{laba}_1}{\text{Biaya investasi}} = \frac{31.719.960}{750.000.000} = 0,42$$

Tahun kedua

$$BCR_2 = \frac{\text{laba}_2}{\text{Biaya investasi}} = \frac{(2 \times 31.719.960)}{750.000.000} = 0,085$$

Tahun ketiga

$$\text{BCR}_3 = \frac{\text{laba}_3}{\text{Biaya investasi}} = \frac{(3 \times 31.719.960)}{750.000.000} = 0,127$$

Tahun keempat

$$\text{BCR}_4 = \frac{\text{laba}_4}{\text{Biaya investasi}} = \frac{(4 \times 31.719.960)}{750.000.000} = 0,169$$

Tabel 2.5 Return of investment dan benefit cost ratio selama 25 tahun

Tahun ke	ROI	BCR
1	-0,958	0.042
2	-0,915	0.085
3	-0,873	0.127
4	-0,831	0.169
5	-0,789	0.211
6	-0,746	0.254
7	-0,704	0.296
8	-0,662	0.338
9	-0,619	0.381
10	-0,577	0.423
11	-0,535	0.465
12	-0,492	0.508
13	-0,450	0.550
14	-0,408	0.592
15	-0,366	0.634
16	-0,323	0.677
17	-0,281	0.719
18	-0,239	0.761

Tahun ke	ROI	BCR
19	-0,196	0.804
20	-0,154	0.846
21	-0,112	0.888
22	-0,070	0.930
23	-0,027	0.973
24	-0,015	1.015
25	-0,057	1.057

Jika pembangkit PLTU beroperasi selama 25 tahun, besarnya *return of investment* (ROI) dan *benefit cost ratio* (BCR) selama 25 tahun akan dihasilkan seperti pada tabel 2.5.

Bab 3

Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir

Tujuan Instruksional Umum:

Memberikan wawasan kepada mahasiswa tentang Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) yang dibahas secara terperinci.

Tujuan Instruksional Khusus:

1. Memberikan pengetahuan kepada mahasiswa tentang pengertian Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN).
2. Memberikan pengetahuan kepada mahasiswa tentang komponen Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN).
3. Memberikan pengetahuan kepada mahasiswa tentang prospek Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) di Indonesia.
4. Memberikan pengetahuan kepada mahasiswa tentang prospek ekspansi Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) .
5. Memberikan pengetahuan kepada mahasiswa tentang analisis Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN).

3.1. Pengertian Umum

Unit terkecil dari materi yang tidak lagi memiliki karakteristik dasar materi disebut atom. Karena ciri-ciri atom yang menyusun materi berbeda

dengan ciri-ciri materi itu sendiri, maka dikatakan tidak memiliki sifat-sifat dasar materi. Setiap atom digambarkan sebagai bola dengan inti atom di tengah dan kulit atom luar. Elektron dengan muatan listrik negatif yang bergerak di sekitar inti atom dapat ditemukan di kulit atom. Proton dan neutron ada di dalam nukleus. Sementara neutron netral atau tidak memiliki muatan listrik, proton memiliki muatan listrik positif.

Sejarah Perang Dunia II adalah bagaimana kebanyakan orang umumnya akrab dengan istilah nuklir. Pada tanggal 9 Agustus 1945, dua bom nuklir meledak atau diledakkan oleh pasukan sekutu (Amerika Serikat) masing-masing di kota Hiroshima dan Nagasaki. Serangan di dua kota Jepang itu juga erat kaitannya dengan jalan yang ditempuh negara mereka untuk rakyat Indonesia. Kali ini, setelah dijajah oleh Belanda selama tiga setengah abad dan oleh Jepang selama tiga setengah tahun, sudah sangat dekat dengan kekalahan bangsa Jepang dari kekuatan Sekutu dalam Perang Dunia II pada 17 Agustus 1945.

Teknologi nuklir adalah teknologi yang kebanyakan orang merasa hanya sesekali atau bahkan tidak pernah bersentuhan dengan masalah kehidupan sehari-hari. Risiko atau bahaya dari teknologi nuklir lebih diketahui masyarakat umum daripada keuntungan yang dapat diperoleh darinya. Akibatnya, nuklir dikaitkan dengan sejumlah besar ide dan anggapan yang tidak menguntungkan. Lebih jauh, mayoritas orang awam sekarang mengasosiasikan istilah “nuklir” dengan bom karena kelemahan yang melekat dalam pengembangan teknologi nuklir.

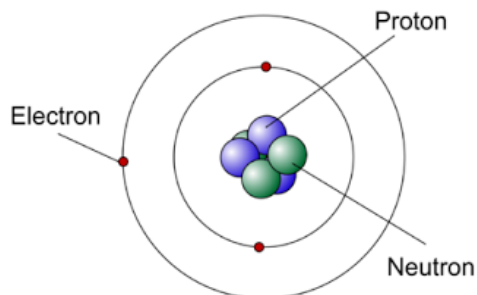
Dalam sains, kata “nuklir” selalu digunakan untuk merujuk pada proses yang terjadi di dalam inti atom. Misalnya, bidang ilmiah fisika nuklir berfokus pada penyelidikan peristiwa fisik yang terjadi di inti atom. Inti atom merupakan salah satu komponen dalam reaksi nuklir. Kita juga akrab dengan ungkapan “reaktor nuklir”, yang mengacu pada lokasi reaksi

nuklir yang dapat dilakukan dengan aman dan terkendali.

Atom itu sendiri adalah komponen terkecil dari materi, sedangkan inti atom hanyalah bagian yang sangat kecil dari sebuah atom. Namun, ternyata kita harus berhadapan dengan medan perdebatan yang sangat luas ketika berbicara tentang iptek nuklir. Tentu saja, ada banyak kejadian fisik yang berbeda dan informasi lain yang ditemukan di nuklir yang telah ditemukan oleh manusia yang terkait erat dengan ini. Sebagian besar pengetahuan yang dikandungnya masih diteliti oleh orang-orang saat ini. Banyak proyek penelitian skala besar yang melibatkan banyak ilmuwan masih dilakukan untuk mengumpulkan data untuk kemajuan ilmu pengetahuan dan teknologi nuklir.

Penemuan reaksi pemecahan inti atom oleh Otto Hahn dan Fritz Strassmann pada 1938 menandai dimulainya sejarah perkembangan ilmu dan teknologi nuklir. Mereka melakukan penelitian dengan menembakkan neutron yang sangat lambat pada elemen uranium-235 (U-235). Inti atom U-235 terpecah menjadi inti atom yang lebih kecil dan massanya lebih ringan dari U-235, menurut hasil pemotretan.

Neutron cepat, dengan kecepatan dua hingga tiga kali kecepatan cahaya, dihasilkan energi yang dilepaskan sebagai panas adalah 200 Mega elektron volt (MeV).



Gambar 3.1. Model atom

Sumber: <http://info-pasid.blogspot.com/2012/07/teori-model-atom.html>

Reaksi yang ditemukan Hahn dan Strassmann secara signifikan berbeda dari reaksi kimia umum yang dipahami pada saat itu. Dalam reaksi kimia yang khas, unsur-unsur yang bereaksi masih dapat hadir dalam produk reaksi karena reaksi berlangsung antara unsur-unsur kimia. Karena inti atom U-235 tidak dapat lagi ditemukan setelah fisi, proses nuklir yang melibatkannya dikenal sebagai reaksi nuklir.

Fakta bahwa inti U-235 pecah menjadi dua inti yang lebih kecil menyebabkan peristiwa ini sering disebut sebagai reaksi fisi. Persamaan ekuivalensi massa dan energi, yang diajukan Albert Einstein dengan persamaan $E = mc^2$ (E = energi dalam joule, m = massa dalam kilogram, dan c = kecepatan cahaya, yaitu 300.000 km/detik), dapat ditunjukkan dan diterima oleh masyarakat umum dan ilmuwan.

Nuklir, terutama senyawa radioaktif, telah digunakan secara luas sampai saat ini di banyak industri yang berbeda, termasuk hidrologi, farmasi, pengawetan makanan, pertanian, peternakan, dan sterilisasi. Bidang non-energi adalah aplikasinya. Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) yang menggunakan tenaga nuklir untuk menghasilkan tenaga listrik yang cukup terjangkau, aman, dan andal, merupakan salah satu pemanfaatan teknologi nuklir yang saat ini sedang dikembangkan dan dimanfaatkan secara besar-besaran dalam industri energi, tidak merusak lingkungan dengan cara apapun. Teknologi nuklir telah digunakan di pembangkit listrik tenaga nuklir, yang telah dikembangkan secara komersial sejak 1954.

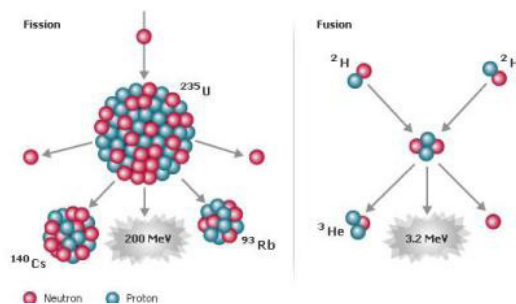
3.2. Prinsip Dasar PLTN

Cara uap dihasilkan dari panas berbeda antara operasi dasar pembangkit listrik tenaga nuklir dan pembangkit listrik konvensional. Berbeda dengan pembangkit listrik konvensional yang menghasilkan

panas dari pembakaran bahan bakar fosil, pembangkit listrik tenaga nuklir menghasilkan panas melalui reaksi pemecahan inti atom bahan bakar (uranium) (minyak, batu bara, dan gas). Mirip dengan generator biasa, generator uap menggunakan panas yang dihasilkannya untuk menghasilkan uap, yang kemudian digunakan untuk menggerakkan turbin dan generator untuk menghasilkan listrik. Saat menghasilkan energi, pembangkit listrik tenaga nuklir tidak melepaskan asap atau debu ke atmosfer yang mengandung logam berat CO^2 , SO^2 , atau NO^x .

Pembelahan Inti

Fisi nuklir menyediakan panas yang dibutuhkan untuk menghasilkan uap di pembangkit listrik tenaga nuklir. Proses pembelahan inti digambarkan pada Gambar 3.2. Inti atom bahan bakar uranium menjadi lebih tidak stabil dan mengalami fisi jika partikel neutron masuk ke dalamnya. Fisi ini menghasilkan dua atom materi baru, dua hingga tiga neutron baru, dan energi. Massa keseluruhan dari semua bahan yang dibuat setelah fisi inti uranium lebih kecil daripada sebelum fisi. Energi diciptakan dari perbedaan massa ini. Setelah fisi nuklir, neutron baru dapat bertabrakan dengan inti atom uranium lainnya untuk menciptakan energi, atom benda lain, dan dua hingga tiga neutron baru. Demikian seterusnya, memulai reaksi berantai.



Gambar 3.2 Pembelahan inti atom

Sumber: <http://radioaktif12fm.wordpress.com/2010/11/13/reaksi-fisi-dan-fusi/>

Untuk satu hari, satu gram uranium dapat menghasilkan satu juta watt daya. Satu gram uranium dapat menghasilkan energi yang cukup untuk bertahan 24 hari jika sebuah tempat tinggal menggunakan 1000 kilowatt-jam listrik per hari. Kadmium merupakan salah satu bahan kimia pengontrol yang diperlukan untuk menjaga agar reaksi berantai tetap stabil dan terkendali agar tidak tumbuh tidak terkendali, seperti bom atom. Karena neutron yang baru dibuat dari fisi memiliki kecepatan yang sangat tinggi, mereka harus diperlambat agar lebih mudah memasuki inti atom.

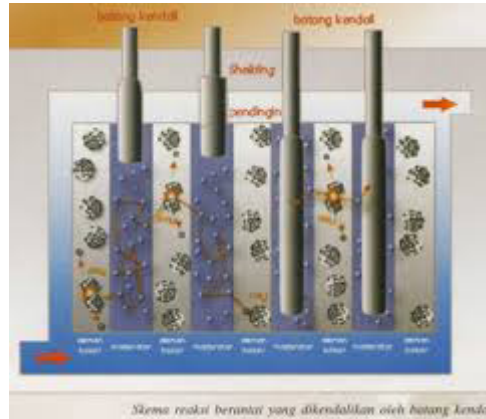
Demineralized plain water adalah zat yang sering digunakan sebagai retarder atau moderator. Bergantung pada jenis bahan bakar, air berat, atau grafit juga dapat digunakan sebagai moderator. Banyak panas yang dihasilkan oleh bahan bakar uranium. Bahan bakar dapat rusak atau meleleh jika pendinginan tidak dilakukan. Berbagai zat, termasuk air ringan, air berat, logam natrium cair, dan gas, sering digunakan sebagai pendingin. Jenis bahan bakar adalah faktor lain yang memengaruhi pilihan pendingin.

Reaksi Berantai Terkendali

Banyak energi dapat dihasilkan dalam waktu singkat melalui reaksi berantai. Reaksi berantai yang terjadi pada reaktor nuklir harus dikelola agar tercipta energi yang sesuai dengan kebutuhan agar dapat menggunakan energi panas tersebut. Sebuah batang kendali dengan kemampuan untuk menyerap neutron digunakan untuk melakukan kontrol ini. Bahan penyerap neutron, seperti boron atau kadmium, digunakan untuk membuat batang kendali. Pertimbangan untuk reaksi nuklir di pembangkit listrik tenaga nuklir meliputi:

- Bahan bakar nuklir maksimum memiliki tingkat U-235 3,27 yang terdistribusi secara merata dalam isotop U-238, sehingga tidak mungkin terjadi reaksi fisi berantai yang tidak terkendali di dalamnya.

- Reaksi pemutusan rantai hanya dapat terjadi dengan adanya moderator.



Gambar 3.3. Pengendalian reaksi berantai menggunakan batang kendali

Sumber: *Media informasi ilmu pengetahuan dan teknologi nuklir, BATAN*

Pemenuhan Energi

Dulu Indonesia merupakan negara dengan sumber energi yang melimpah, tetapi kini sudah tidak lagi. Diperkirakan 321 miliar barel minyak, 507 triliun standar kaki kubik gas alam, 50 miliar ton batu bara, dan 27.000 megawatt energi panas bumi di Indonesia mewakili sekitar 1,2 persen potensi dunia (0,02 persen potensi dunia). Pada tahun 2002, ada sekitar 5 miliar barel cadangan minyak terbukti, 90 TSCF cadangan gas alam yang dikonfirmasi, dan 5 miliar ton cadangan batu bara terbukti.

Cadangan minyak akan habis dalam sepuluh tahun, cadangan gas alam dalam tiga puluh tahun, dan cadangan batu bara dalam lima puluh tahun jika produksi tetap pada tingkat 2002 dan tidak ada cadangan terbukti baru ditemukan. Menurut Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM), cadangan minyak kita hanya akan cukup untuk

memenuhi kebutuhan kita selama tujuh tahun ke depan, sesuai dengan kongres pertama organisasi profesi praktisi akuntansi sumber daya alam dan lingkungan yang diadakan di Baturaden pada 12 Desember 2013.

3.3. Kelebihan dan Kekurangan

Semua pembangkit listrik, termasuk pembangkit listrik tenaga nuklir, beroperasi secara seragam. Untuk memanaskan air yang akan menjadi uap, digunakan bahan bakar (baik berupa batu bara, gas, atau uranium). Turbin diputar oleh uap dan turbin pada gilirannya menggerakkan generator untuk menghasilkan tenaga.

Perbedaan mencolok adalah bahwa pembangkit listrik tenaga nuklir menggunakan bahan bakar fisi daripada membakar bahan bakar fosil (bahan fisil). Bahan fisil berinteraksi dengan neutron dalam reaktor, memulai reaksi berantai yang melepaskan panas. Uap bertekanan tinggi dibuat menggunakan panas yang dihasilkan. Setelah itu, turbin ditenagai oleh uap. Pembangkit listrik tenaga nuklir ini menawarkan kelebihan dan kekurangan dibandingkan dengan pembangkit listrik konvensional, antara lain sebagai berikut.

Kelebihan

Energi termal pembelahan 1 kg U-235 murni sekitar 17 miliar kkal atau setara dengan energi termal yang dihasilkan dari pembakaran 2,4 juta kg (2.400 ton) batu bara.

Kekurangan

- Adanya risiko kecelakaan nuklir
- Dampak pada lingkungan

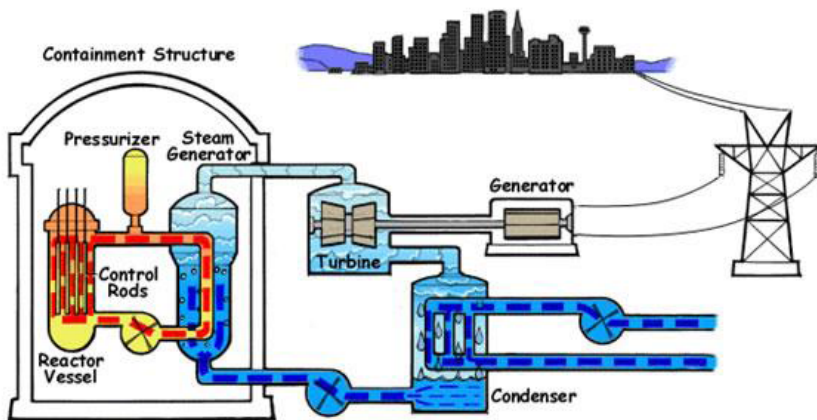
Secara garis besar PLTN tidak menghasilkan gas emisi seperti CO², SO², ataupun gas NO yang berpotensi menyebarkan hujan asam maupun pemanasan global.

Limbah radio aktif berupa padat disimpan dalam ruang penyimpanan. Limbah ini tidak membahayakan.

3.4. Jenis-Jenis PLTN

3.4.1. PWR (*Pressurized Water Reactor*)

PWR adalah jenis reaktor tenaga nuklir yang menggunakan air ringan biasa sebagai moderator neutron dan pendingin. Divisi Tenaga Nuklir Westinghouse kemudian mengubah desain reaktor ini menjadi produk komersial setelah awalnya dikembangkan oleh Laboratorium Tenaga Atom Westinghouse Bettis untuk digunakan pada kapal perang. Di Amerika Serikat, Shippingport melihat pembangunan reaktor PWR komersial pertama, yang berlangsung hingga 1982.



Gambar 3.4. Skema dari *Pressurized Water Reactor*

Sumber: <http://gopltnindonesia.blogspot.com/2010/11/jenis-jenis-pltn.html>

Reaktor PWR ini sedang dikembangkan dan dibangun oleh sejumlah besar bisnis selain Westinghouse, termasuk Asea Brown Boveri—Combustion Engineering (ABB—CE), Framatome, Kraftwerk Union, Siemens, dan Mitsubishi. Jenis reaktor yang paling khas adalah yang ini.

Jumlah reaktor yang digunakan untuk menghasilkan listrik melebihi 230 dan beberapa ratus juga digunakan untuk menggerakkan kapal.

Dalam reaktor tipe PWR, aliran pendinginan utama di teras reaktor mencapai suhu 325 °C, membutuhkan perangkat *pressurizer* untuk menerapkan tekanan tertentu (sekitar 155 atm) untuk mencegah air mendidih. Panas dipindahkan dari penukar panas, generator uap, ke aliran pendingin sekunder, yang mendidih menjadi uap air dan menggerakkan turbin untuk menghasilkan energi. Uap tersebut kemudian dikondensasikan menjadi aliran pendingin sekunder di kondensor. Aliran ini kemudian kembali ke pembangkit uap, tempat dihasilkannya uap sekali lagi sebelum memasuki turbin.

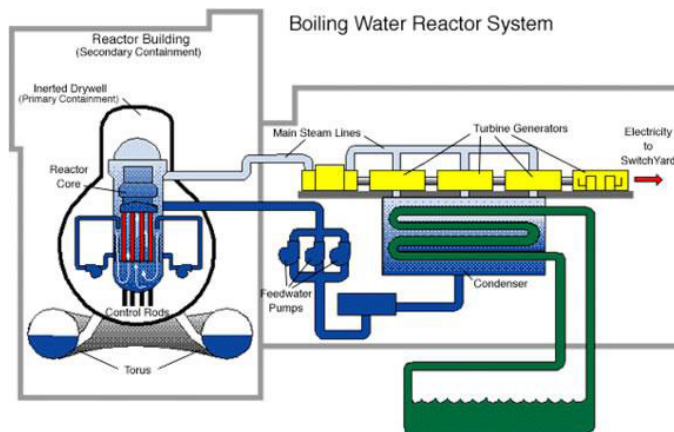
Secara umum, reaktor nuklir (tipe PWR) beroperasi sebagai berikut untuk menghasilkan listrik.

Reaksi fisi terjadi di inti reaktor sebagai akibat dari bahan bakar nuklir yang diledakkan oleh neutron, yang melepaskan energi panas. Air bertekanan di *loop primer* kemudian mentransfer energi panas dari teras reaktor ke pembangkit uap. Air dari putaran sekunder dipanaskan di pembangkit uap, menghasilkan uap. Uap yang dihasilkan kemudian dikirim ke turbin uap, yang kemudian memutar generator dan menghasilkan tenaga.

3.4.2 BWR (*Boiler Water Reactor*)

Sejumlah PLTN juga menggunakan reaktor tipe BWR yang menggunakan air ringan sebagai pendingin dan moderator. General Electric dan Allis-Chambers menciptakan reaktor BWR (GE) pertama. Hanya desain General Electric yang bertahan sampai saat ini. Di Teluk Humboldt di California, sebuah reaktor BWR dengan desain oleh General Electric dibangun. Reaktor BWR juga dikembangkan dan dibangun oleh ASEAN-Atom, Kraftwerk Union, dan Hitachi. Meskipun ada banyak

persamaan antara reaktor ini dan reaktor PWR, perbedaan utamanya adalah pada reaktor BWR, uap yang berputar dihasilkan tepat di teras reaktor.



Gambar 3.5. Skema boiling water reactor

Sumber: http://ancjrit.blogspot.com/2011/06/sekelimut-tentang-pltn-pembangkit_27.html

Hanya ada satu saluran aliran pendingin di reaktor BWR, dan memiliki tekanan rendah (sekitar 75 atm), memungkinkan aliran pendingin mendidih di teras dan mencapai suhu 285°C. Uap yang dihasilkan mengalir dari boiler ke turbin melalui pemisah uap dan pengering yang terletak di atas teras. Turbin harus disaring dan dilindungi dari radiasi selama waktu pemeliharaan karena air di sekitar teras terus-menerus terkontaminasi oleh peluruhan radioaktif. Karena sebagian besar bahan radioaktif di dalam air memiliki waktu paruh yang sangat singkat, termasuk N-16, yang memiliki waktu paruh hanya 7 detik, ruang turbin dapat dimasuki segera setelah reaktor padam. Generator turbin kemudian diisi dengan uap. Setelah turbin diputar, uap dikondensasikan menjadi aliran pendingin di kondensor sebelum disuntikkan kembali ke reaktor untuk memulai

kembali siklus.

3.4.3. Reaktor Air Didih Lanjut (*Advance Boiling Water Reactor, ABWR*)

Reaktor air mendidih lainnya, atau disingkat ABWR, adalah versi modifikasi dari reaktor air mendidih yang ada. Kondisi, keamanan, pengurangan limbah, kesederhanaan operasional, dan pertimbangan ekonomi menjadi prioritas perbaikan. Pompa internal, penggerak batang kendali, pengatur aliran uap, pendinginan teras darurat, cangkang reaktor beton prategang, turbin, alat pemanas untuk pemisah uap (penurun kelembapan), sistem kendali digital, dan lain-lain merupakan tipikal peralatan ABWR yang mengalami perubahan desain.

3.4.4. Reaktor CANDU

Uranium oksida alam adalah bahan bakar untuk reaktor CANDU (CANada Deuterium Uranium), sejenis reaktor air berat bertekanan. Atomic Energy Canada Limited (AECL), sebuah perusahaan Kanada, telah merancang reaktor sejak 1950. Reaktor ini membutuhkan moderator yang lebih efektif, seperti air berat, karena membakar uranium alami sebagai bahan bakar.

Moderator reaktor CANDU ditempatkan dalam tangki yang cukup besar yang dikenal sebagai calandria, yang terdiri dari tabung tekanan horizontal yang digunakan sebagai tangki bahan bakar. Tangki calandria ini didinginkan oleh aliran air berat bertekanan tinggi yang melewatinya dan dipanaskan hingga 290°C. Uap dihasilkan oleh aliran pendingin sekunder yang menerima panas dari aliran pendingin utama, seperti reaktor PWR. Dengan memisahkan tabung bahan bakar yang perlu diisi dari aliran pendingin, dimungkinkan untuk mengisi kembali tabung bertekanan yang digunakan sebagai wadah bahan bakar tanpa memadamkan reaktor.

3.4.5. Reaktor Tabung Tekan

Pendingin air ringan (ada juga air berat) dan moderator air berat, atau pendingin air ringan dan moderator grafit, dalam pipa calander, membentuk inti reaktor tabung tekanan. Refrigeran dan moderator dipisahkan satu sama lain oleh pipa bertekanan sehingga dapat dipisahkan secara terpisah. Dalam praktiknya, ada kombinasi yang berbeda, seperti pendingin air ringan, moderator air berat (Canadian Deuterium Uranium, CANDU), pendingin air berat, moderator air berat (Steam-Generating Heavy Water Reactor, SGHWR), dan pendingin air ringan dengan moderator grafit (Reaktor Berpendingin Air Tipe Saluran Grafit, RBMK). Inti reaktor terdiri dari banyak saluran bahan bakar yang disusun dalam tangki calandria dalam bentuk kisi kubus. Refrigeran mengalir melalui setiap saluran bahan bakar dalam pipa bertekanan, dan energi panas yang dihasilkan dari proses ini diubah menjadi energi penggerak turbin dan digunakan di pembangkit listrik, reaktor nuklir tipe kanal.

3.4.6. *Pebble Bed Modular Reactor (PBMR)*

Tingkat keamanan yang baik disediakan oleh PBMR. Commonwealth Edison PECO Energy, British Nuclear Fuels Limited, dan ESKOM yang berbasis di Afrika Selatan sebagai perusahaan reaktor memimpin proyek PBMR saat ini, yang merupakan kelanjutan dari inisiatif sebelumnya. Helium digunakan sebagai pendingin reaktor di PBMR, yang berjalan pada partikel uranium. Dioksida yang diperkaya disatukan dalam matriks grafit dan ditutup dengan silikon karbida yang memiliki diameter kurang dari 1 mm. Telah ditunjukkan bahwa bahan bakar ini dapat menahan suhu hingga 1600 °C dan tidak akan meleleh di bawah 3500 °C. Karena reaktor adalah sistem *pebble-bed*, bahan bakar dalam bola grafit akan bersirkulasi melalui inti reaktor.

3.4.7. Reactor Magnox

Reaktor Magnox adalah reaktor gaya lama yang dapat memproduksi plutonium untuk senjata nuklir tetapi memiliki siklus bahan bakar yang pendek dan tidak efisien. Ada 11 fasilitas tenaga nuklir di Inggris yang menggunakan 26 reaktor magnox ini, yang pertama kali dirancang di sana. Hanya 4 reaktor Magox yang beroperasi di Inggris pada 2005, dan semuanya akan ditutup pada 2010.

CO² bertekanan digunakan sebagai pendingin, grafit digunakan sebagai moderator, dan uranium alam digunakan sebagai bahan bakar. Logam Magnox berfungsi sebagai pengurung bahan bakar di reaktor magnox. Sebuah kurungan bahan bakar logam uranium alam dengan penutup yang tidak dapat dioksidasi untuk menampung produk fisi disebut Magnox dan dibuat terutama dari logam magnesium dengan sejumlah kecil aluminium dan logam lainnya.

3.4.8. *Advanced Gas-Cooled Reactor (AGR)*

Reaktor berpendingin gas generasi kedua yang dibangun oleh Inggris dikenal sebagai *Advance Gas-Cooled Reactor (AGR)*. AGR merupakan pengembangan dari reaktor Magnox. Ini menggunakan pelet uranium oksida yang diperkaya dengan tingkat pengayaan 2,5 hingga 3,5 persen sebagai bahan bakar dan terkandung dalam tabung baja tahan karat. Setelah mencapai suhu 650°C selama perjalanan melalui teras, gas CO₂ memasuki tabung pembangkit uap. Turbin kemudian akan ditenagai oleh panas yang ditransfer dari uap yang dimasukkan. Sekali lagi memasuki teras, gas telah kehilangan panas.

3.5. Rumus/ Persamaan Perhitungan Daya pada PLTN

Menghitung jumlah atom dalam 1 gram U- 235

Jumlah atom u- 235 = $\frac{m}{A}$ x bilangan Avogadro

Di mana:

m : massa uranium

A : 235 gram/gram

Menghitung energi yang dihasilkan pembelahan tiap atom

E = jumlah atom u – 235 x 200 Mev x $1,6 \times 10^{-13}$ joule

Di mana:

E : energi yang dihasilkan oleh pembelahan tiap atom

Menghitung entalpi uap dan entalpi air menggunakan interpolasi

$$\frac{x - x_1}{x_2 - x_1} = \frac{y - y_1}{y_2 - y_1}$$

menghitung efisiensi termal

$$\eta_{\text{thermal}} = \frac{T_{\text{uap}} - T_{\text{luar boiler}}}{T_{\text{uap}}} \times 100\%$$

Di mana:

η_{thermal} : efisiensi termal

T uap : suhu uap *boiler* (°K)

T luar boiler : suhu luar *boiler* (°K)

Menghitung daya masuk turbin

$$P_{\text{inT}} = \frac{\eta_{\text{thermal}}}{100\%} \times E$$

Di mana:

P_{inT} : daya masuk pada turbin

n termal : efisiensi termal

E : energi yang dihasilkan oleh pembelahan tiap atom

Menghitung daya keluar turbin

$$P_{\text{outT}} = \frac{\eta_{\text{turbin}}}{100\%} \times P_{\text{inT}}$$

Di mana:

P_{outT} : daya keluar pada turbin

η_{turbin} : efisiensi turbin

P_{inT} : daya masuk pada turbin

Menghitung daya keluar generator

$$P_{outG} = \eta_{turbin} / 100\% \times P_{inG}$$

Di mana:

P_{outG} : daya keluar pada generator

η_{turbin} : efisiensi turbin

P_{inG} : daya masuk generator

Menghitung energi panas yang diperlukan untuk membangkitkan
200 Mw

$$E_1 / E_2 = P_{outG1} / P_{outG2}$$

Di mana:

E_1 : energi panas mula yang dihasilkan oleh pembelahan tiap atom

E_2 : energi panas yang digunakan untuk membangkitkan P_{outG2}

P_{outG1} : daya keluar generator yang dihasilkan dari E_1

P_{outG2} : daya keluar generator yang diinginkan

Menghitung produksi uap yang dihasilkan steam generator

$$E_2 = Qu (h_s - h_w)$$

Di mana:

E_2 : energi panas yang digunakan untuk membangkitkan P_{outG2}

Qu : kapasitas uap yang dihasilkan steam generator

h_s : entalpi uap

h_w : entalpi air

Menghitung banyak bahan bakar yang diperlukan tiap jam

$$F = E_2 / E$$

Di mana:

F : uranium yang diperlukan tiap jam

E_2 : energi panas yang digunakan untuk membangkitkan poutg 2

E : energi yang dihasilkan oleh pembelahan tiap atom

Menghitung banyak bahan yang diperlukan dalam sehari

$$F^2 = F \times 24$$

Di mana:

F^2 : uranium yang diperlukan dalam sehari

F : uranium yang diperlukan tiap jam

Menghitung banyak bahan yang diperlukan dalam setahun

$$F^{22} = F^2 \times 365$$

Di mana:

F^{22} : uranium yang diperlukan dalam setahun

F^2 : uranium yang diperlukan dalam sehari

Menghitung arus eksitasi agar dibangkitkan tegangan internal dalam kV

$$E_a = K \cdot \Phi \cdot n$$

$$I = \frac{E_a}{4\pi \times 10^{-7}} \times N \times A$$

Di mana:

E_a : tegangan terminal pada generator (volt)

K : konstanta generator

Φ : fluks (Wb/m²)

n : kecepatan generator tiap menit (rpm)

I : arus eksitasi yang diperlukan untuk membangkitkan E_a (amper)

N : banyak lilitan (lilit)

A : luas penampang (m^2)

Faktor penyusutan

$$FP = \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1}$$

Di mana:

FP : Faktor penyusutan

r : tingkat bunga dalam %

n : lama waktu penyusutan dalam tahun

Jumlah pembangkitan Neto tenaga listrik

$$JPNTL = DT \times FKN$$

Di mana:

JPNTL : jumlah pembangkit neto tenaga listrik

DT : daya terpasang

FKN : faktor kepastian neto x 8760

3.6. Biaya Pembangkitan

$$BP = \frac{\text{biaya investasi}}{\text{kapasitas daya}}$$

Di mana:

BP : Biaya pembangunan

Biaya Modal

$$\text{Biaya Modal} = \frac{BP \times FP}{JPNTL}$$

Di mana:

FP : faktor penyusutan

Biaya bahan bakar

$$\text{Biaya bahan bakar} = \frac{\text{Bahan bakar untuk 1kWh}}{\text{HBB}}$$

Di mana:

HBB : Harga Bahan bakar

Biaya operasi & pemeliharaan (O&M)

$$\text{Biaya O\&M} = \text{BT O\&M} + \text{BV O\&M}$$

Di mana:

BT O&M : Biaya tetap O& M

BV O&M : Biaya variable O&M

Biaya pembangkit Total

$$\text{TC} = \text{Biaya modal} + \text{biaya bahan bakar} + \text{Biaya O\&M}$$

Di mana:

TC: Total *cost* atau biaya pembangkitan total

3.7. Payback Period

$$\text{Keuntungan} = \text{harga jual} - \text{TC}$$

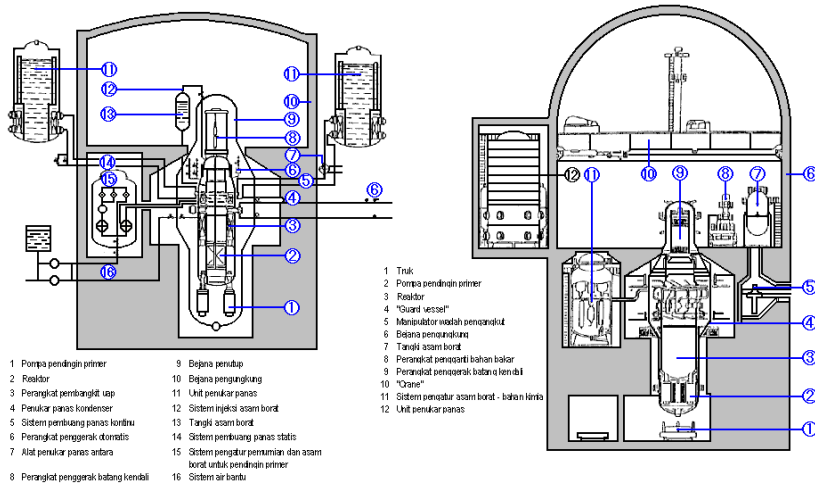
$$\text{Payback period} = \frac{\text{Biaya investasi}}{\text{keuntungan per tahun}}$$

3.8. Contoh PLTN tipe PWR kapasitas 200 MW

PLTN ini dirancang mempunyai daya keluaran sebesar 200 MW dengan tegangan 15 KV, frekuensi 50 Hz. Untuk memenuhi target daya keluaran maka perlu adanya penyesuaian peralatan dan bahan bakar yang digunakan. Dalam sebuah PLTN memiliki beberapa komponen utama dalam pembangkitan energi listrik di antaranya adalah reactor vessel, control rods, steam generator, steam turbine, generator, dan kondensor.

Pembangkit listrik tenaga nuklir ini dirancang dengan tipe PWR (*pressurized water reactor*) dengan memperhatikan tingkat keamanan bagi operator dan lingkungan yang lebih tinggi daripada pembangkit listrik

tenaga nuklir tipe BWR (*boiling water reactor*).



Konstruksi reaktor model VPBER-600

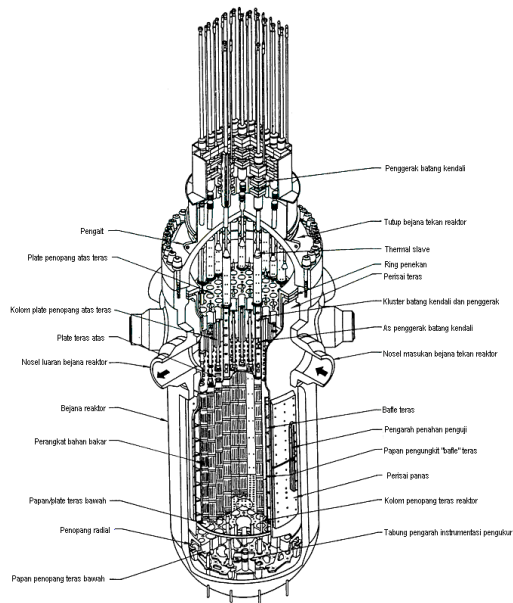
Sumber: <http://ihmet-stm.jit.go.id/images/02/02-01-01-03/15.gif> (Agt 2003)

Gambar 3.6. Konstruksi reaktor vessel

Sumber: *aji,Bintoro.2014 PWR Balai Diklat BAPETEN,Cisarua-Bogor*

Reactor Vessel

Reactor vessel merupakan tempat berlangsungnya reaksi fisi. Reaktor vessel ini didesain sedemikian rupa dengan standar yang ditentukan badan atom international sehingga berfungsi sebagai pengaman utama bagi operator PLTN agar tidak terjadi kebocoran reaktor dan juga merupakan letak *control rods*.



Konstruksi dalam bejana tekan reaktor PWR

Sumber: <http://medialab.jit.go.id/images/02/02-01-01-02/04.gif> (14/11/2003)

Gambar 3.7. Bejana Reactor

Sumber: Bintoro.2014. *pressurized water reactor*. Balai Diklat BAPETEN, Cisarua-Bogor

Control rods

Control rods merupakan alat yang dipakai untuk mengatur besarnya reaksi fisi yang berlangsung, alat ini bekerja pada gambar 3.3.

Steam generator

Berisi air yang nantinya akan dipanaskan. Uap dari air ini digunakan untuk menggerakkan turbin

Steam turbine

Merupakan sebuah turbin uap yang terhubung langsung pada generator sehingga dapat menggerakkan rotor pada generator.

Generator

Merupakan alat yang dapat mengonversi energi mekanik menjadi listrik generator yang digunakan pada PLTN ini merupakan generator sinkron 3 fase.

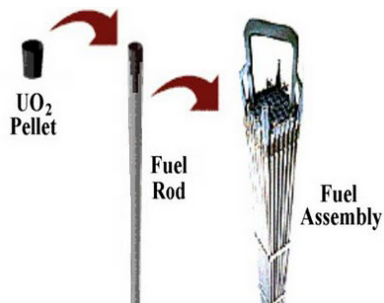
Kondensor

Merupakan alat yang digunakan untuk mengembunkan uap yang telah memutar turbin agar menjadi air dan siap dipanaskan untuk menjadi uap yang akan memutar turbin kembali.

Spesifikasi komponen

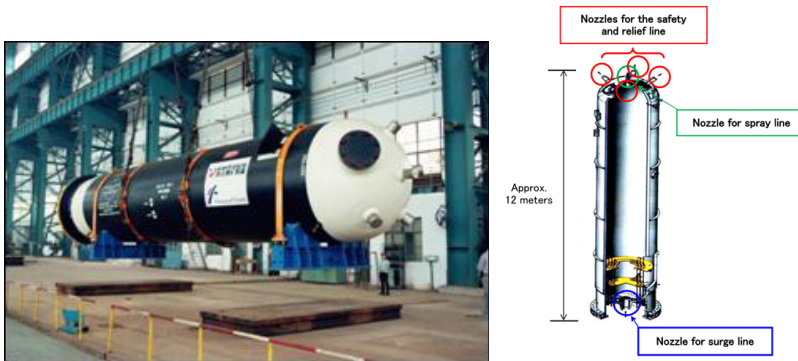
Pada permasalahan kali ini dipilih pembuatan pembangkit listrik tenaga nuklir dengan tipe PWR (*pressurized water reactor*) komponennya adalah:

- Reaktor
- Bahan bakar uranium



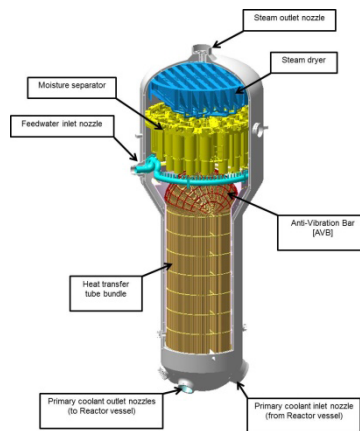
Gambar 3.8. Perancangan bahan bakar uranium

Sumber: *bintoro.2014.pressurized water reactor .balai Dikla BAPETEN.Cisarua-Bogor*



Gambar 3.9. Pressurizer

Pressurizer



Gambar 3.10. steam generator tipe U

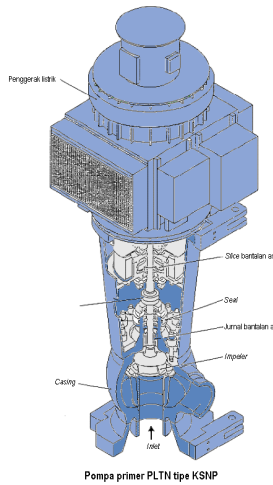
Sumber: Bintoro.2014 Pressurized Water Reactor. Balai Diklat BAPATEN, Cisarua-Bogor

Berfungsi untuk memertahankan tekanan operasi reaktor menjaga fase pendingin. Dilengkapi dengan pemanas untuk meningkatkan tekanan dan penyiram air dingin untuk menurunkan tekanan. Tekanan berlebih dilepaskan melalui safety and relief velves.

Steam generator

Steam generator berfungsi sebagai *boiler*.

Menggunakan air panas dari sisi primer untuk mendidihkan air pada sisi sekunder, air panas melewati tabung-tabung kecil untuk memanaskan air dalam tabung lebih besar.



Gambar 3.11. Pompa sentrifugal pendingin rector

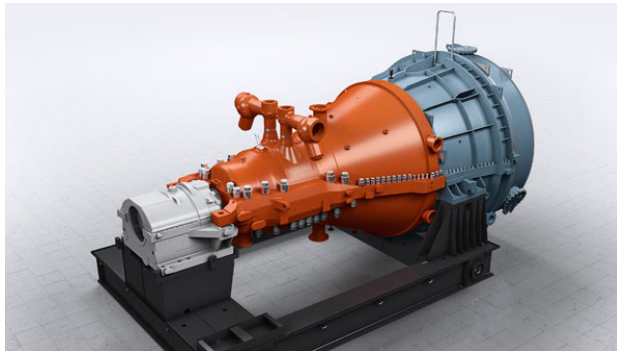
Sumber: Bintoro.2014.Pressurized Water Reactor. Balai Diklat BAPATEN, Cisarua – Bogor

Contoh spesifikasi steam generator adalah:

- Sisi primer tin : 324°C
- Sisi primer tout : 228°C
- Sisi sekunder T : 285°C
- Berat kotor : 312.208 kg
- Shell side design pressure : 53 Bar
- Steam flow at full load : 4,8 x 10⁶ kg/jam
- Steam temperature : 268,9°C

Feedwater temperature : 255,4°C
Heat transfer area : 4,784m²

Pompa pendingin reaktor



Gambar 3.12. Siemens steam turbine SST-800

Sumber: <http://www.energy.siemens.com/hq/en/fossil-power-generation/steam-turbines/sst-800.htm>

Contoh spesifikasi pompa adalah:

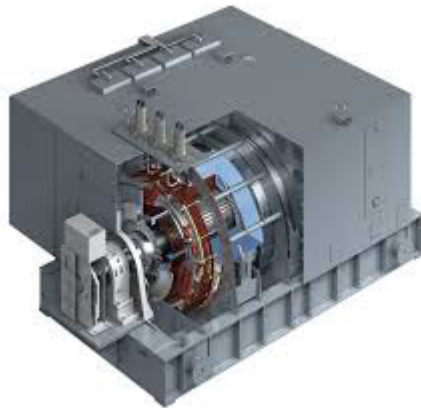
Number and type : one vertical, single stage, shaft-seal, circulating water pump per loop

Design capacity : 6,15 m³/ second
Design head : 280 ft (85,3 m)
Design pressure : 2500 psia (172^obar)
Design temperature : 343°C
Suction temperature at full power : 292°C
Motor type : AC Induction
Motor voltage : 6.600 Volt
Casing diameter : 196 cm
Overall height : 8,5 m
Operating speed : 1189 rpm
Ambient temperature : 49°C

Turbin Uap

Contoh spesifikasi turbin uap adalah :

Name and type	: Siemens steam turbine SST-800
Power aotput	: up to 250 MW, 50 or 60 Hz
Turbine speed	: 3000 rpm
Inlet steam pressure	: up to 165 bar
Inlet steam temperature	: up to 565°C
Uncontrolled extractions	: up to 7, at various pressure levels
Controlled extractions	: Pressure, up to 72 bar /1044 psi
Length	: 20 m
Width	: 8,5 m
Height	: 6 m



Gambar 3.13. Siemens Sgen5-100A-2P Series

Sumber: <http://www.energy.siemens.com/hq/en/fossilpowergeneration/generators/sgen-100a-2p-series.htm>

Generator sinkron

Spesifikasi generator adalah :

Name and type	: siemens Sgen5-100A-2P Series
Frequency	: 50 Hz

Generator speed	: 3000 rpm
Power factor	: designed for 0,8
Apparent power	: up to 320 MVA
Efficiency	: up to 98,94 %
Terminal voltage	: 6,3 kV to 20 KV

Bab 4

Pembangkit Listrik Tenaga Gas

Tujuan Instruksional Umum:

Memberikan wawasan kepada mahasiswa tentang Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG) yang dibahas secara terperinci.

Tujuan Instruksional Khusus:

1. Memberikan pengetahuan kepada mahasiswa tentang pengertian Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG).
2. Memberikan pengetahuan kepada mahasiswa tentang komponen Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG).
3. Memberikan pengetahuan kepada mahasiswa tentang data perkembangan Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG) di Indonesia.
4. Memberikan pengetahuan kepada mahasiswa tentang prospek ekspansi Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG).
5. Memberikan pengetahuan kepada mahasiswa tentang analisis Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG).

4.1. Pengertian Umum

Pada pembangkit listrik atau fasilitas lain yang menggunakan generator, terjadi proses pembangkitan—yang menghasilkan tenaga

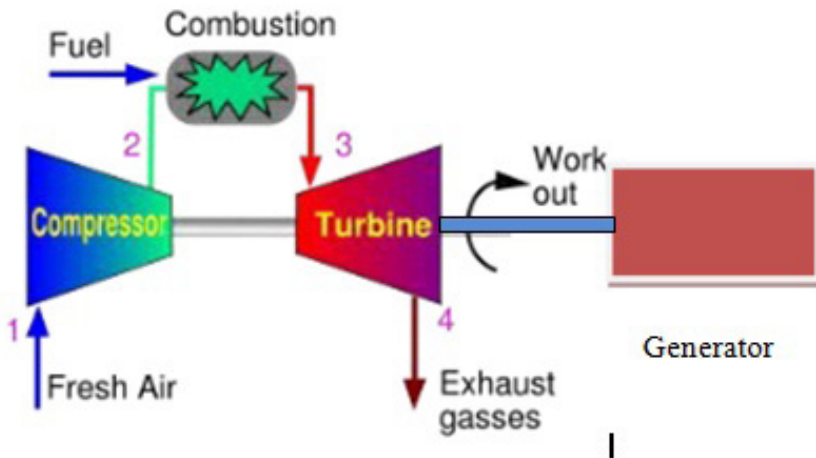
listrik. Gas digunakan sebagai fluida kerja dan turbin gas berfungsi sebagai penggerak utama di pembangkit listrik PLTG. Turbin gas lebih sederhana daripada bentuk pembangkit listrik lainnya karena hanya memiliki empat komponen penting: kompresor, ruang bakar, turbin gas, dan generator.

Perangkat dengan mesin pembakaran internal, seperti pembangkit listrik, adalah pembangkit listrik tenaga nuklir turbin gas. Bahan bakar tersebut dibakar baik sebagai gas alam atau minyak di dalam ruang bakar (*combustor*). Bahan bakar dan udara yang masuk kompresor di bawah tekanan keduanya disemprotkan ke ruang bakar untuk melakukan proses pembakaran dan menghasilkan gas. Gas yang dipanaskan ini menggerakkan turbin gas dengan sudu-sudu yang terpasang pada generator, seperti terlihat pada Gambar 4.1, untuk mengubah energi mekanik menjadi energi listrik.

Mesin PLTG tidak memiliki bagian yang bergerak, sehingga tidak ada getaran (maju mundur). Dibandingkan dengan jenis turbin lainnya, turbin gas memiliki suhu yang jauh lebih tinggi (900—1300 °C). Efisiensi konversi panas 20—30% luar biasa. Beban puncak didukung oleh PLTG karena waktu *start-up* yang cepat.

Di bawah ini adalah ilustrasi dasar pembangkit listrik dengan sistem PLTG. Ruang bakar diisi dengan udara bertekanan yang telah dinaikkan tekanannya oleh kompresor menjadi sekitar 13 kg/cm². Saat menggunakan gas alam terkompresi (CNG), gas dapat langsung dibakar dengan mencampurnya dengan udara. Bahan bakar (bahan bakar minyak) pertama-tama harus digunakan sebagai kabut sebelum dicampur dengan udara bertekanan untuk mencegah pembakaran lebih lanjut. Efisiensi pembakaran secara signifikan dipengaruhi oleh bagaimana bahan bakar dan udara dicampur dalam ruang bakar.

Suatu gas bertemperatur tinggi dengan tekanan 13 kg/cm^2 dan kisaran temperatur $900\text{--}1300 \text{ }^\circ\text{C}$ dihasilkan ketika bahan bakar dibakar di dalam ruang bakar. Gas hasil pembakaran kemudian diumpungkan ke turbin dan disemprotkan ke bilah turbin untuk mengubah energi gas menjadi energi mekanik pada poros turbin gas. Energi mekanik poros mengaktifkan generator, yang menghasilkan energi listrik. Temperatur pembakaran sistem turbin gas dapat melebihi $1300 \text{ }^\circ\text{C}$, sehingga bilah dan poros turbin perlu didinginkan menggunakan udara atau hidrogen. Temperatur yang tinggi inilah yang menjadi penyebab utama keausan saat unit PLTG hidup dan mati.



Gambar 4.1. Diagram PLTG

4.2. Bahan Bakar PLTG

4.2.1. Gas Alam

Karena kualitasnya yang bersih, aman, dan paling efisien jika dibandingkan dengan sumber energi lain, gas alam merupakan komponen

terpenting dari pasokan energi. Gas alam murni juga memiliki sifat tidak berwarna, tidak berbentuk, dan tidak berbau. Selain itu, tidak seperti bahan bakar fosil lainnya, gas alam dapat terbakar dengan bersih dan praktis, tidak pernah mengeluarkan gas buang yang dapat merusak lingkungan.

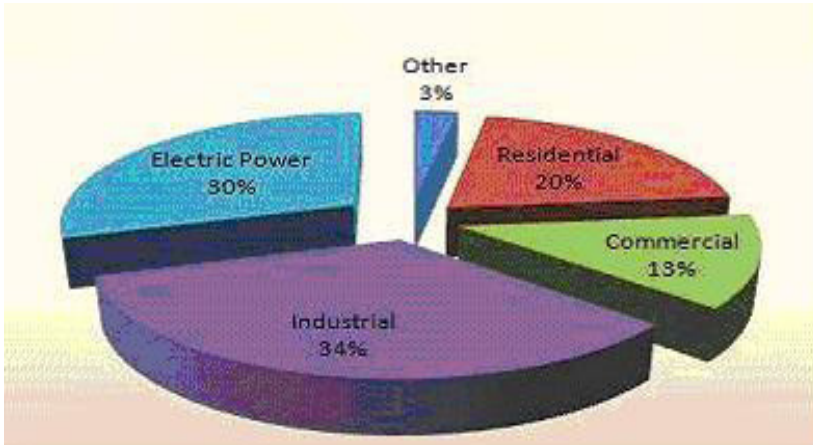
Campuran gas hidrokarbon yang mudah terbakar, terutama metana, membentuk gas alam. Gas yang mengandung etana, propana, butana, pentana, dan belerang juga dapat ditemukan dalam gas alam. Gas alam hadir dalam berbagai komposisi.

Table 4.1 Kandungan Gas alam

Metana	CH ₄	70—90 %
Butana	C ₄ H ₁₀	0—20 %
Etana	C ₂ H ₆	
Propane	C ₃ H ₈	
Karbon dioksida	CO ₂	0—8 %
Oksigen	O ₂	0—0,02 %
Hydrogen sulfida	H ₂ S	0—5 %
Nitrogen	N ₂	0—5 %
Rare gas	A, He, Ne, Xe	trace

Telah jelas terlihat dari Gambar 4.2 bahwa gas alam dapat digunakan di berbagai industri. Penggunaan gas bumi secara garis besar diklasifikasikan ke dalam tiga kategori selain yang telah disebutkan yakni sebagai berikut.

- a) Gas alam sebagai bahan bakar, termasuk bahan bakar untuk kendaraan bermotor, proses industri, dan pembangkit listrik.
- b) Gas alam digunakan sebagai bahan baku untuk barang-barang seperti plastik, pupuk, petrokimia, metanol, dll.
- c) LNG, sejenis gas alam yang digunakan sebagai komoditas energi untuk ekspor.



Gambar 4.2. Pemanfaatan gas alam di berbagai sektor

Karena dapat memberikan pembakaran yang bersih dan tidak terlalu mahal, gas alam menjadi semakin populer, terutama untuk produksi energi listrik. Tidak seperti batu bara, yang meskipun merupakan bahan bakar termurah, juga paling kotor dan menyebabkan pencemaran lingkungan yang cukup besar di seluruh Indonesia.

4.2.2. Minyak Bumi

Minyak bumi, minyak alami yang ditemukan di bawah tanah, adalah tempat sebagian besar bahan bakar fosil berasal. Berbeda dengan diubah menjadi bahan bakar seperti bensin, parafin, minyak tanah, minyak atsiri, dan minyak diesel, itu tidak umum digunakan dalam keadaan alami. Itu diperoleh dengan menggunakan prosedur yang dikenal sebagai distilasi. Seperti bensin, benzol adalah bahan bakar cair yang dapat diubah menjadi gas. Metana, molekul hidrogen dan karbon, adalah bahan bakar yang dikenal sebagai gas alam, yang sering ditemukan di daerah di mana minyak bumi berlimpah. Sekitar setengah dari kebutuhan gas Inggris dipenuhi

oleh gas alam, yang ditemukan di bawah laut utara pada 1965. Meskipun uranium tidak dibakar dalam reaktor nuklir, bahan tersebut tetap disebut sebagai “bahan bakar”. Ketika oksigen dan hidrogen bergabung dalam sel bahan bakar hidrogen, reaksi kimia yang dihasilkan sama seperti jika pembakaran telah terjadi. Salah satu bahan bakar fosil yang banyak digunakan adalah minyak bumi. Artinya adalah “minyak batu”. Minyak dan produknya, seperti bahan bakar motor, minyak tanah, minyak solar, lilin, dll., sangat berharga di masyarakat saat ini. Tentu saja, bensin adalah komponen mobil. Lampu minyak, traktor pertanian, mesin pesawat jet, dan perangkat lain membutuhkan minyak tanah.

Minyak tanah digunakan secara luas di desa-desa untuk berbagai keperluan. Dalam mesin diesel bus, traktor, lori, kapal, dan kendaraan bertenaga diesel lainnya, minyak diesel digunakan. Selain itu, produk sampingan minyak bumi digunakan untuk membuat pelumas. Setiap mesin harus dibuat agar berfungsi dengan mudah dan lancar. Aspal dibuat kedap air menggunakan bitumen.

4.3. Prinsip Kerja PLTG

Metode operasional PLTG memiliki urutan kerja umum sebagai berikut.

1. Proses *starting*

Mesin diesel secara otomatis akan terlepas dan berhenti selama prosedur *start* awal untuk mengoperasikan turbin sampai putaran poros turbin/kompresor mencapai 3.400 rpm.

2. Proses kompresi

Kompresor kemudian menarik udara luar dari saluran masuk udara, yang diatomisasi dengan bahan bakar melalui nosel secara terus-menerus dan cepat untuk memasuki ruang bakar.

3. Transformasi energi termis ke mekanik

Saat pembakaran dimulai, busi menyalakan bahan bakar dan udara, mengatomisasinya di ruang bakar. Pembakaran berikutnya terus-menerus terjadi dan produk sampingan pembakaran—gas bersuhu tinggi, bertekanan tinggi—dimasukkan ke dalam cakram melalui bilah dan kemudian diubah menjadi energi mekanik dengan rotasi sumbu.

4. Transformasi energi mekanik ke energi listrik

Untuk menghasilkan energi, poros generator berputar pada waktu yang sama dengan poros turbin, yang melakukannya pada 5.000 putaran per menit. Roda gigi jalan mengurangi kecepatan turbin dari 5.100 rpm menjadi 3.000 rpm. Selain itu, generator diputar pada kecepatan putaran turbin ini.

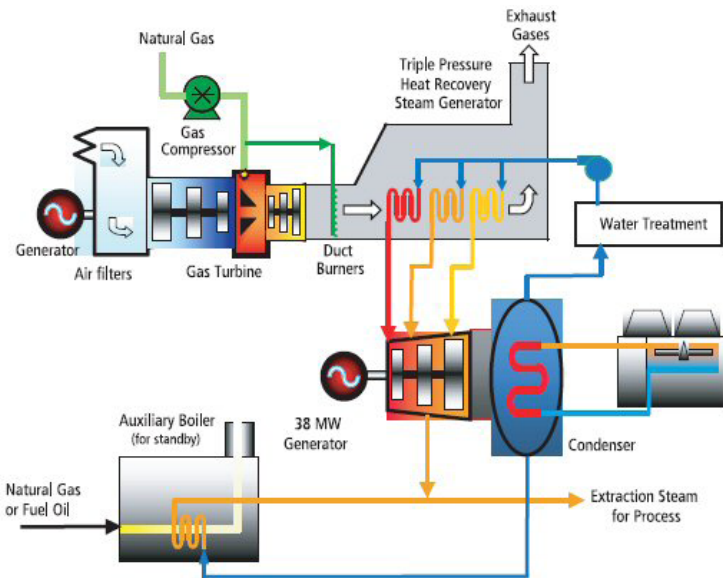
Udara luar memasuki kompresor dan digunakan untuk menciptakan tekanan yang cukup tinggi pada sisi keluaran. Bahan bakar terus diproses bersama dengan udara bertekanan tinggi, dan produk sampingan dari pembakaran berkecepatan tinggi melewati bagian transisi ke nosel dan bilah turbin sebelum akhirnya keluar melalui knalpot dan dilepaskan ke udara terbuka.

4.4. Kelemahan dan Keunggulan PLTG

Karena unit PLTG menggunakan mesin diesel sebagai penggerak awalnya, unit ini dikategorikan sebagai unit yang beroperasi dengan waktu mulai yang singkat yaitu 15 hingga 30 menit dan biasanya dapat dimulai tanpa catu daya eksternal. (Menyalakan mesin diesel) Unit PLTG memiliki periode operasi yang terbatas antara *overhaul*, yaitu antara 400 dan 5000 jam. Selain jumlah start-stop, besarnya jam operasional juga dapat dijadikan pedoman dalam memperkirakan waktu *overhaul*. Unit PLTG harus diperiksa pemeliharannya meskipun belum menyelesaikan

5.000 jam operasi tetapi telah menyelesaikan 300 start-stop. Komponen-komponen yang terkena dampak aliran gas pembakaran yang dapat mencapai suhu 1.300 °C, seperti ruang bakar, jalur gas panas, dan bilah turbin, harus diperhitungkan selama proses pemeriksaan. Komponen-komponen ini biasanya perlu dilas atau diganti karena rusak (retak).

Karena proses start-stop mengakibatkan proses pemuatan dan penyusutan yang tidak sedikit pada bagian-bagian yang disebutkan di atas, akan mempercepat proses kerusakan atau keretakan. Hal ini agar saat unit PLTG panas, suhunya lebih tinggi dibandingkan saat dingin, yaitu sekitar 1.300 °C. Poros unit PLTG yang dimatikan harus berputar perlahan untuk mencegah pembengkokan hingga suhu dianggap aman untuknya.



Gambar 4.3. Skema pembangkit listrik tenaga gas uap (*combined cycle*)

Unit produksi yang paling tidak efisien seringkali adalah unit PLTG, dengan efisiensi hanya 15 sampai 25 persen. Berbeda dengan negara

beriklim dingin, Indonesia menggunakan sistem terbuka untuk PLTG, memungkinkan penggunaan gas buang dari PLTG sebagai pemanas. Di Indonesia, PLTG dapat digunakan dalam sistem tertutup ketika air unit penghasil PLTU dipanaskan menggunakan gas buang dari PLTG. Pembangkit listrik PLTGU adalah jenis yang digambarkan pada Gambar 4.3.

Penggunaan turbin gas penerbangan yang telah diubah menjadi turbin penggerak generator sedang dikembangkan. Hal ini dilakukan karena daya keluaran yang dikurangi dapat dicapai untuk daya masukan yang sama.

4.5. Perencanaan Teknik PLTG

Karena pembangkit PLTG biasanya dibangun dalam sistem yang kompak, perencanaan teknis PLTG lebih didasarkan pada standar produk dari pabrik daripada rencana rekayasa pembangkit listrik lainnya. Masih ada beberapa elemen yang perlu diperhatikan, seperti:

- a. pasokan dan transportasi bahan bakar, yang akan berupa gas atau minyak;
- b. instalasi penyimpanan bahan bakar, terutama jika terjadi kebocoran dan kebakaran;
- c. fondasi unit pembangkit;
- d. instalasi tegangan tinggi dan tegangan rendah serta baterai; serta
- e. *starting method*, *black start*, atau perlu *electric feeding* dari luar.

Bagian-bagian utama PLTG

1. Turbin gas

Saluran masuk udara: filter telah dipasang di saluran ini untuk menghilangkan debu dan noda air. Tujuannya adalah untuk mencegah korosi bilah kompresor yang disebabkan oleh air dan bintik-bintik debu

yang ada di udara yang masuk ke saluran.

2. **Kompresor**

Mesin yang memampatkan banyak udara untuk digunakan dalam pembakaran, pendinginan, dan aplikasi lainnya.

3. **Ruang bakar (*combustar*)**

Sistem pengapian, flame detector, dan cross fire tube merupakan salah satu komponen yang membantu proses pembakaran di ruang bakar. Gas panas yang dihasilkan selama pembakaran bahan bakar digunakan untuk menggerakkan turbin. Komponen terpenting dari perangkat PLTG adalah turbin, yaitu suatu mekanisme yang mengubah energi panas dari hasil pembakaran di ruang bakar pada suhu dan tekanan tinggi menjadi energi segar—energi mekanik.

4. **Saluran gas buang**

Bagian dari sistem turbin dengan gas yang digunakan untuk memutar poros turbin dilepaskan ke atmosfer.

5. **Bantalan**

Bantalan jurnal dan bantalan dorong digunakan sebagai bantalan dalam sistem turbin gas. Bagian ini berfungsi sebagai jembatan antara rotor turbin dan stator, mendukung rotor turbin.

6. *Load gear*



Gambar 4.4. Turbin gas pada PLTG

Kecepatan turbin diperlambat oleh roda gigi beban, sering disebut sebagai roda gigi reduksi atau kopling beban, ke kecepatan yang dibutuhkan oleh generator. Pompa untuk bahan bakar dan pelumas digerakkan oleh roda gigi beban Westinghouse.

7. Generator

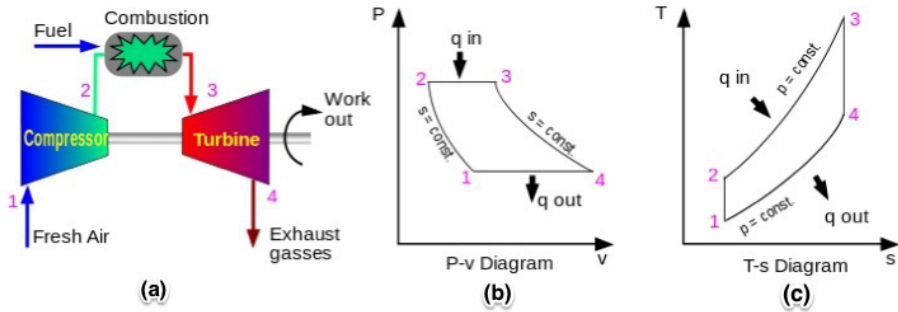
Konstruksi generator sinkron terdiri dari:

- a. Stator adalah bagian dari generator yang diam dan berbentuk silinder
- b. Rotor adalah bagian dari generator yang berputar dan berbentuk silinder
- c. Celah udara adalah ruangan antara rotor dan stator

Konstruksi stator terdiri dari:

- a. Kerangka atau gandar dari besi tuang untuk menyangga inti jangkar
- b. Inti jangkar dari besi lunak/baja silikon
- c. Alur/parit/slot dan gigi tempat meletakkan belitan (kumparan) berbentuk alur terbuka dan setengah tertutup
- d. Belitan jangkar terbuat dari tembaga yang diletakan pada alur siklus turbin gas.

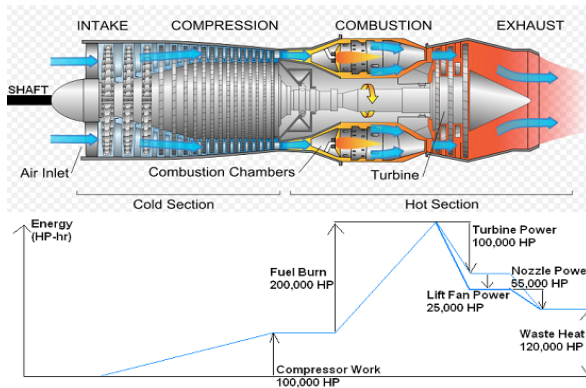
Menurut hipotesis bahwa turbin gas mengikuti siklus Brayton, dalam siklus sederhana, proses kompresi dan ekspansi terjadi terus-menerus sedangkan proses pembakaran atau proses gas buang terjadi pada tekanan konstan. Metodis, prosedur yang sedang berlangsung digambarkan pada Gambar 4.3. di bawah ini.



Gambar 4.5. Siklus Brayton

Pada siklus *brayton* dapat dijelaskan lebih lanjut sebagai berikut.

Pada titik 1, udara ditarik ke dalam kompresor, menstabilkannya dan menciptakan lingkungan bertekanan tinggi. Gas panas bertekanan tinggi dibakar di dalam ruang bakar (*combustion chamber*), yang kemudian diisi dengan udara bertekanan tinggi. Gas panas kemudian dilepaskan ke titik 4 setelah memutar rotor turbin di titik 3.



Gambar 4.6. Bagian utama sebuah turbin gas

4.6. Kendali Daya pada PLTG

4.6.1. Pengaturan Tegangan

Karena beban generator biasanya tidak konsisten, tegangan generator juga berfluktuasi. Tegangan generator perlu diatur agar dapat merespons variasi beban luar. Secara teori, konfigurasi diubah dengan memvariasikan ukuran arus penguat generator. Regulator tegangan otomatis dapat digunakan untuk secara otomatis mengubah tegangan generator (sambil memperkuat arus).

4.6.2. Pengaturan Frekuensi (MW)

Kontrol frekuensi digunakan untuk memastikan bahwa pembangkit listrik aktif dan beban selalu sama. Sistem harus menyediakan atau membangkitkan daya aktif sesuai dengan permintaan pelanggan akan daya aktif untuk menjaga frekuensi dalam batas toleransi yang diizinkan. Gubernur digunakan untuk menyesuaikan pengaturan ini, yang melibatkan perubahan energi utama (bahan bakar) *output governor*.

4.6.3. Pengaturan Daya Reaktif (MVAR)

Untuk memenuhi kebutuhan daya reaktif sistem digunakan regulasi daya reaktif. Daya reaktif diperlukan untuk menurunkan rugi-rugi dari sistem pengaturan daya reaktif, yang diatur melalui arus eksitasi dengan menaikkan tegangan sumber eksitasi. Daya reaktif juga diperlukan untuk meningkatkan biaya Q sistem.

4.7. Perhitungan Kebutuhan Bahan Bakar PLTG

Berikut ini ditampilkan contoh data-data spesifikasi suatu PLTG.

Generator	
Pout	400 MW (470KVA)
Tegangan terminal (Vt)	18 KV
Putaran (ns)	3000 RPM
Efisiensi (n)	95 %
Frekuensi (f)	50 Hz
Power factor (PF)	0,85
Temperatur stator	120 °C
Pendingin	Udara
Turbin	
Putaran	5210 RPM
Turbin stage	5
Compressor stage	21
Inlet filter	900
Bahan bakar	Gas alam
Bahan bakar	Gas alam
Jumlah burner	72
Diesel start	
Ranting/RPM	2200
Diesel start	
Jenis /type	TWIN DISC
Load gear	
Ratio	1 : 2,37

Data Generator

- P_{outG} : daya output generator
- P_{inG} : daya input generator
- P : jumlah kutub
- Vt : tegangan terminal (volt)

N_s : putaran sinkrun (rpm)

n_G : efisiensi generator (%)

F : frekuensi (Hz)

$\cos \phi$: power faktor

Turbin Gas

P_{inT} : daya input generator (MW)

N_T : putaran turbin (rpm)

η_T : efisiensi turbin (%)

Load Gear

Kecepatan turbin : kecepatan generator = 5120 : 3000

Load gear = 1 : 2,37

Perhitungan Siklus Brayton

Data input pada PLTG gas alam

Rasio tekanan P_1 & P_2 : 19,2

Temperatur udara lingkaran (T_1) : 30°C = 303 K

Temperatur gas buang (T_4) : 900 K

Konstanta Adiabatik (γ) : 1,4 untuk udara

Tekanan saringan udara masuk kompresor (pf) : 0,01 Bar

Laju aliran masa udara (m udara) : 869 kg/sec

Rugi2 tekanan pada ruang bakar : 2—3%

Perhitungan dengan Siklus Brayton

Data input pada PLTG

T_a = Temperatur lingkungan (30°)

$T_a = 30 + 273$ K

$T_a = 303$ K

$P_1 = P_a - pf$

$P_1 = 1.013 - 0,01$

$$P_1 = 1.003 \text{ bar}$$

Suhu keluar saringan udara

$$T_1 = 307 (1.003/1.013)^{1.4-1/1.4}$$

$$T_1 = 302.14 \text{ K}$$

Suhu pada ruang bakar

$$T_3 = (P_3/P_4)^{k-1/k} \times T_4$$

$$T_3 = (18.82/1.013)^{1.4-1/1.4} \times 900 \text{ K}$$

$$T_3 = 2896.32 \text{ K}$$

Tekanan udara keluar kompresor

$$P_2 = R_p \times P_1$$

$$P_2 = 19.2 \times 1.003$$

$$P_2 = 19.257 \text{ bar}$$

Suhu yang keluar dari kompresor

$$T_2/T_1 = [P_2/P_1]^{k-1/k}$$

$$T_2 = [R_p]^{1.4-1/1.4}$$

$$T_2 = 702.85 \text{ K}$$

P_3 (tekanan pada ruang bakar)

$$P_3 = p_2 - \Delta P_b$$

$$P_3 = 19.256 - (0.03 \times 19.257)$$

$$P_3 = 18.82 \text{ bar}$$

Kerja kompresor aktual:

$$W_c = C_p (T_2 - T_1)$$

$$= 1,005 \text{ KJ}/(\text{Kg.K}) \times (702,85^\circ\text{K} - 302,14^\circ \text{ K})$$

$$= 402,710 \text{ KJ}/\text{Kg}$$

Kerja turbin aktual

$$W_T = C_p (T_3 - T_4)$$

$$= 1,005 \text{ Kg}/(\text{Kg.K}) \times (2896,32^\circ\text{K} - 900^\circ \text{ K})$$

$$= 2006,3 \text{ KJ}/\text{Kg}$$

Kerja bersih sistem aktual

$$\begin{aligned} W_{\text{net}} &= W_T - W_c \\ &= 2006,3 - 402,71 \text{ Kj/ Kg} \\ &= 1603,59 \text{ Kj/Kg} \end{aligned}$$

Panas masuk sistem aktual:

$$\begin{aligned} Q_{\text{in}} &= C_p(T_3 - T_2) \\ &= 1,005 \text{ Kj/(Kg.K)} \times (2892,32^\circ \text{K} - 702,85^\circ \text{K}) \\ &= 2200,417 \text{ K} \end{aligned}$$

Panas keluar sistem aktual:

$$\begin{aligned} Q_{\text{out}} &= C_p(T_4 - T_1) \\ &= 1,005 \text{ Kj/(Kg.K)} \times (900^\circ \text{K} - 302,14^\circ \text{K}) \\ &= 600,85 \text{ K} \end{aligned}$$

Efisiensi termal siklus brayton:

$$\begin{aligned} \eta_{\text{TH}} &= \frac{W_{\text{net}}}{Q_{\text{in}}} \% \\ &= 1603,59 / 2200,417 \% \\ &= 0,728 \% \end{aligned}$$

Menghitung kebutuhan gas per jam

$$1 \text{ ton/h} = 12.547 \text{ kW}$$

$$\begin{aligned} P_{\text{inT}} &= 421.000 \text{ kW} / 0,78 \\ &= 539.811 \text{ kW} \end{aligned}$$

Banyaknya gas yang digunakan untuk pembakaran:

$$P_{\text{inT}} (1 \text{ ton/h}) = 539.811 \text{ kW} / 12.547 \text{ kW} = 43 \text{ ton/h}$$

Tabel 4.2 Persamaan untuk acuan beberapa besaran-besaran

Equivalences typical reference values		
1	1 kWh	0,860 Mcal
2	1 cal	4,1868 joules
3	1 tonne of oil	10.000 Mcal
4	1 tonne of coal	7000 Mcal
5	1 tonne of natural gas	10 790 Mcal
Electricity equivalent of 1 tonne of fuel		
1	1 tonne of oil	11 628 kWh
2	1 tonne of coal	8 140 kWh
3	1 tonne of natural gas	12 547 kWh

4.8. Perhitungan Biaya Pembangunan PLTG dengan Bahan Bakar Gas Alam

$$V = m/\rho = 43.000 \text{ kg}/0,717\text{m}^3 = 59.972 \text{ m}^3$$

$$1 \text{ Mmbtu} = 29,41 \text{ liter}$$

$$1 \text{ US \$} = \text{Rp}13.000,00$$

$$1 \text{ mmbtu} = 2,6 \text{ Dollar}$$

Biaya pembangunan per jam:

$$59972/29,41 = 2039,17 \times 2,6 = \$ 5.301,84 \text{ USD}$$

Bila pembangkit beroperasi 5 jam per hari, maka:

$$\$ 5.301,84 \text{ USD} \times 5 = \$ 26.509,21 \text{ USD}$$

Untuk 1 bulan (30 hari)

$$\$ 26.509,21 \text{ USD} \times 30 = \$ 795.276,43 \text{ USD}$$

Keterangan simbol:

$P_{out G}$: daya output generator(MVA)

$P_{in G}$: daya input generator(MW)

Pole : jumlah kutub

V_t : tegangan terminal(KV)

NS : putaran generator sinkron(rpm)

- n_G : efisiensi generator sinkron(%)
- $\text{Cos } Q$: faktor daya
- P_{inT} : daya input turbin(MW)
- N_t : putaran turbin(rpm)
- n_T : efisiensi turbin(%)
- P_1 : tekanan pada udara kompresor(bar)
- P_2 : tekanan udara keluar kompresor(bar)
- P_3 : tekanan pada ruang bakar(bar)
- P_a : tekanan barometer(bar)
- P_f : tekanan pada saringan masuk kompresor(bar)
- T_a : temperatur lingkungan(K)
- T_1 : suhu keluar saringan udara(K)
- T_2 : suhu yang keluar dari kompresor(K)
- T_3 : suhu pada ruang bakar(K)
- T_4 : temperatur gas buang(K)
- W_c : kerja kompresor aktual(Kj/Kg)
- W_T : kerja turbin actual(Kj/Kg)
- W_{net} : kerja bersih sistem actual(Kj/Kg)
- Q_{in} : panas masuk sistem actual(K)
- Q_{out} : panas keluar sistem actual(K)
- n_{TH} : efisiensi termal siklus brayton(%)

Daftar Pustaka

- [1] B. M. Weedy, B. J. Cory, N. Jenkins, Janaka B. Ekanayake, Goran Strbac, "Electric Power Systems, 5th Edition," John Wiley and Sons, 2012.
- [2] Alexandra von Meier, "Electric Power Systems: A Conceptual Introduction", John Wiley and Sons, 2006.
- [3] J.J. Grainger dan W.D. Stevenson, "Power System Analysis", **McGraw-Hill**, Singapore, 1994.
- [4] J. Paul Guyer, "An Introduction to Steam Power Plant Design (Power Plants Engineering)", The Clubhouse Press, California, 2017.
- [5] D. Sarkar, "Thermal Power Plant Design and Operation", Elsevier, 2015.
- [6] Jun Wang, Xin Li, Chris Allison, Judy Hohorst, "Nuclear Power Plant Design and Analysis Codes", Elsevier, 2020.
- [7] N. Awwad, "Nuclear Power Plants—The Processes from the Cradle to the Grave", London: IntechOpen; 2021.
- [8] P. Breeze, "Gas Turbine Power Generation", AP Press, 2016.
- [9] S. Gulen, "Gas Turbine Combined Cycle Power Plants", CRC Press, 2020.