BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kajian Terdahulu

Berikut beberapa tinjauan pustaka yang telah dilakukan oleh beberapa peneliti terdahulu sebagai referensi dari penelitian yang dilakukan penulis:

a. Menurut penelitian Abdul Hadi (2012) yang meneliti tentang "Analisa Pengaruh Nilai Kalori dan *Heat Rate* (laju kalor) Batubara Terhadap Efisiensi Termal PLTU-Embalut 2 × 25 MW PT Cahaya Fajar Kaltim". Nilai rata-rata kalori yaitu sebesar 4.547,14 kcal/kg, dengan nilai kalori maksimum sebesar 4.991 kcal/kg dan nilai minimum sebesar 4.337,82 kcal/kg. Diperoleh *specific fuel cosumption* (pemakaian bahan bakar spesifik) batu bara *Boiler* Unit 2 rata-rata sebesar 0,89 kg/kWh. Adapun nilai *heat rate* (laju kalor) rata-rata sebesar 4.051,69 kcal/kWh dan nilai efisiensi termal rata-rata yang dicapai adalah sebesar 21,29 % [7].

b. Menurut penelitian Bono (2017) yang meneliti tentang "Analisis Konsumsi Batubara Spesifik Ditinjau dari Nilai Kalor Batubara dan Perubahan Beban di PLTU Tanjung Jati B Unit 2". Karakteristik konsumsi batu bara spesifik PLTU Tanjung Jati B unit 2 cenderung turun seiring peningkatan beban hingga 87,7% beban maksimum, dengan nilai pembebanan maksimum sebesar 712 MW. Nilai konsumsi batu bara spesifik terendah adalah 0,3443 kg/kWh yang diperoleh saat unit pembangkit beroperasi pada beban 625 MW untuk batu bara dengan nilai kalori 6216 kcal/kg. Sehingga semakin tinggi nilai kalori batu bara maka semakin rendah konsumsi batu bara spesifiknya [8].

c. Menurut penelitian Napianus Budianto (2018) yang meneliti tentang "Analisa Pengaruh Laju Kalor Terhadap Efisiensi Termal PLTU Sintang (3 × 7 MW)". Pada saat pembangkit beroperasi pada beban 3764 kW konsumsi bahan bakar spesifik (SFC) *bruto* dan *netto* akan meningkat sebesar 1,84 kg/kWh dan 2,21 kg/kWh dan akan menurun pada beban 6978 kW sebesar 1,41 kg/kWh dan 1,6 kg/kWh. Laju kalor berbanding lurus dengan konsumsi bahan bakar spesifik (SFC) batu bara dimana pada beban 3764 kW laju kalor *bruto* dan

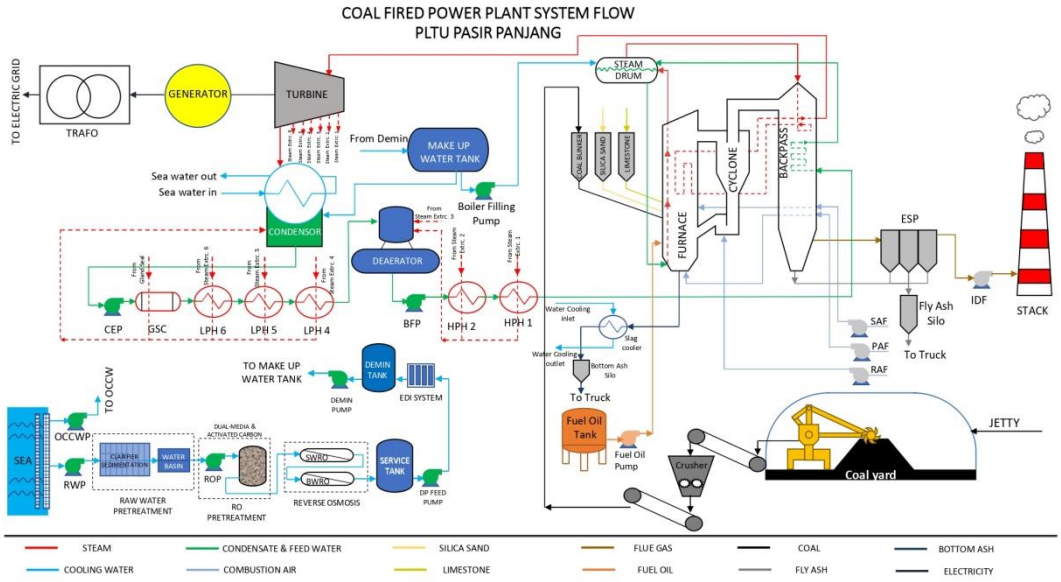
netto sebesar 7001,96 kkal/kWh dan 8422,45 kkal/kWh dan efisiensi termal berbanding terbalik dengan konsumsi bahan bakar batu bara spesifik (SFC), hasil perhitungan didapat efisiensi termal PLTU Sintang (3 x 7 MW) *bruto* dan *netto* pada beban 3764 kW sebesar 12,28% dan 10,21% dan pada beban 6978 kW sebesar 16,01% dan 13,98% [9].

Penelitian yang dilakukan ini berkaitan dengan tinjauan pustaka yang telah dilakukan dari penelitian terdahulu yaitu dengan judul "Analisis Pengaruh *Overhaul* Terhadap Efisiensi Termal PLTU Bengkayang $2 \times 50\ MW$" yang ditinjau dari besarnya hasil perhitungan nilai konsumsi spesifik bahan bakar (SFC) batu bara, laju kalor (*heat rate*) dan efisiensi termal.

2.2 Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU)

PLTU merupakan salah satu pembangkit listrik utama yang ada di Indonesia karena dapat menghasilkan energi listrik yang besar dengan bahan baku air dan bahan bakar yang fleksibel, yaitu bisa dengan batu bara, minyak, sawit, bahkan sampah, hal ini menjadikan PLTU sebagai pembangkit listrik dengan biaya produksi yang murah. Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) merupakan jenis pembangkit yang menggunakan uap sebagai media pemutar sudu-sudu turbin. Dimana uap yang digunakan adalah uap kering (*superheated steam*). Siklus kerja PLTU sama seperti siklus *Rankine* yang sudah dimodifikasi, dimana siklus dimulai dari air masuk ke *economizer* dan *boiler furnace*, kemudian terjadi pembakaran dan air berubah menjadi uap jenuh, uap jenuh dikirim ke *superheater* yang memanfaatkan panas radiasi di *furnace* untuk mengubah uap jenuh menjadi uap kering. Uap kering ini dikirim ke turbin dan dimanfaatkan kecepatan uapnya untuk menggerakkan sudu turbin dan memutar generator [10].

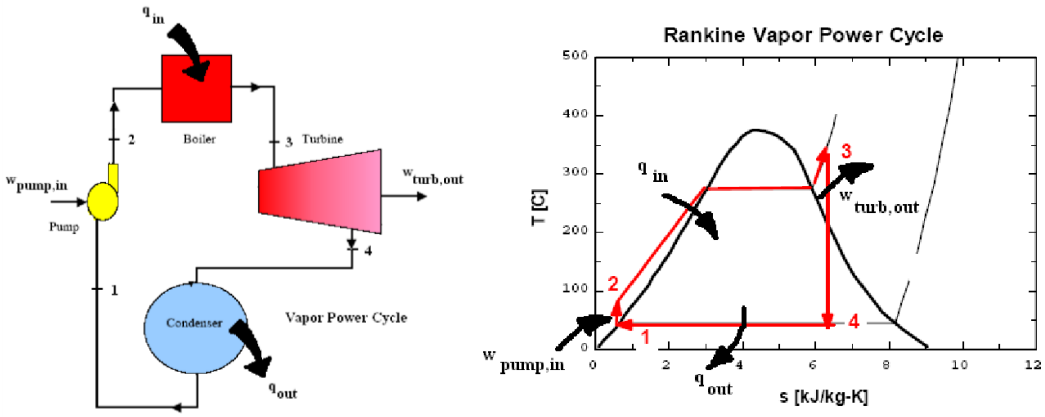
Pada prinsipnya, menghasilkan listrik dengan sistem tenaga uap adalah dengan mengambil energi panas yang terkandung di dalam bahan bakar batu bara yang terbakar di dalam *boiler* untuk produksi uap, kemudian dipindahkan ke dalam turbin, kemudian turbin tersebut akan mengubah energi panas yang diterima menjadi energi mekanis dalam bentuk gerak putar. Gerakan putar ini kemudian seporos dengan generator yang akhirnya dapat menghasilkan listrik [1].



Gambar 2.1 Siklus kerja pada PLTU Bengkayang

2.3 Siklus *Rankine*

Siklus *Rankine* merupakan rangkaian sebuah proses dimana dimulai dari suatu tingkat kondisi yang akan kembali ke tingkat kondisi semula dan selalu berulang. Pada pembangkit tenaga uap, fluida yang mengalami proses-proses tersebut adalah air. Air berfungsi sebagai fluida kerja. Air dalam siklus kerjanya mengalami proses pemanasan, penguapan, ekspansi, pendinginan,dan kompresi. Siklus standar pembangkit tenaga uap adalah siklus *Rankine*. Siklus *Rankine* sederhana terdiri dari empat komponen utama yaitu pompa, *boiler*, turbin, dan *condenser*[4]. Siklus *Rankine* merupakan siklus ideal untuk pembangkit listrik tenaga uap dapat dilihat pada gambar dibawah.



Gambar 2.2. Siklus *Rankine Ideal*

Pada gambar di atas menunjukkan proses terjadinya produksi listrik, dimana air murni yang berasal dari kondenser di pompa menuju *boiler* untuk dipanaskan, di dalam *boiler* air dipanaskan sampai terjadi perubahan fase dari air menjadi uap jenuh (evaporasi) selanjutnya uap jenuh tersebut dipanaskan lanjut (*superheated*) hingga menjadi uap kering untuk mendorong sudu-sudu turbin selanjutnya turbin menggerakan generator dan menghasilkan energi listrik, kemudian uap dari turbin masuk ke dalam kondensor untuk proses pendinginan.
Proses siklus *Rankine* sederhana yang dapat dilihat dari diagram di atas adalah sebagai berikut :

1 – 2 : Air dari *condenser* dipompakan ke dalam *boiler*.

2 – 3 : Di dalam *boiler*, air dipanaskan dan berubah menjadi uap jenuh. Proses ini terjadi di *boiler* yaitu pada *wall tube*.

3 – 4 : Uap panas lanjut memutar sudut rotor turbin sekaligus memutar generator (dikopel), merubah energi panas (uap) menjadi energi mekanik (turbin) dan dari putaran generator menghasilkan energi listrik.

4 – 1 : Pelepasan energi panas di *condenser*, sehingga uap kembali menjadi air.

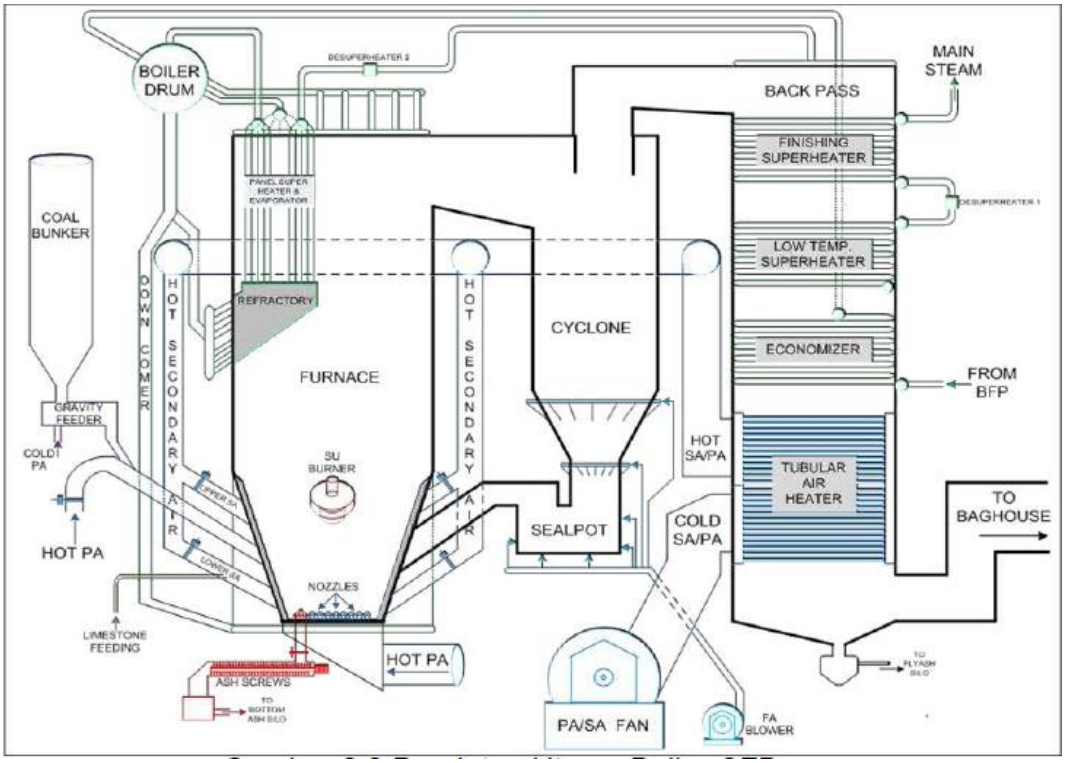
Air masuk pompa pada kondisi 1 sebagai cairan jenuh (*saturated liquid*) dan dikompresi *isentropic* karena menurunnya spesifik air. Air memasuki *boiler* sebagai cairan terkompresi (*compressed liquid*) pada kondisi 2 dan akan menjadi uap *superheated* pada kondisi 3. Uap *superheated* pada kondisi 3 kemudian akan memasuki turbin untuk diekspansi secara *isentropic* dan akan menghasilkan kerja untuk memutar *shaft* yang terhubung dengan generator sehingga menghasilkan energi listrik. Tekanan dan temperatur dari *steam* akan turun selama proses ini menuju keadaan 4 *steam* akan masuk kondensor dan biasanya sudah berupa uap jenuh. *Steam* ini akan dicairkan pada tekanan konstan di dalam kondensor dan akan meninggalkan kondensor sebagai cairan jenuh yang akan masuk pompa untuk melengkapi siklus [11].

2.4 Komponen Pembangkit Listrik Tenaga Uap

2.4.1. *Boiler*

Boiler atau ketel uap adalah suatu sebuah perangkat mesin yang memiliki fungsi untuk mengubah air menjadi uap. Proses perubahan air menjadi uap terjadi dengan cara memanaskan air yang berada di dalam pipa-pipa dengan cara

memanfaatkan panas dari hasil pembakaran bahan bakar. Pembakaran dilakukan dengan secara kontinyu pada ruang bakar dengan cara mengalirkan bahan bakar dan udara dari luar [12].



Gambar 2.3 Peralatan Utama *Boiler*

1. *Economizer*

Dalam ketel uap, ini adalah perangkat penukar panas yang memanaskan cairan atau memulihkan panas sisa dari produk pembakaran yaitu gas buang di pembangkit listrik termal sebelum dilepaskan melalui cerobong asap. Gas buang adalah gas buang hasil pembakaran yang dihasilkan pada pembangkit listrik yang sebagian besar terdiri dari nitrogen, karbondioksida, uap air, jelaga karbon monoksida dan lain-lain. Oleh karena itu, *economizer* pada pembangkit listrik tenaga panas digunakan untuk menghemat proses pembangkitan tenaga listrik, sesuai dengan namanya perangkat sugestif. Panas yang diperoleh pada gilirannya digunakan untuk memanaskan awal air umpan *boiler*, yang pada akhirnya akan diubah menjadi uap super panas. Dengan demikian, penghematan konsumsi bahan bakar dan penghematan proses sebagian besar, karena pada dasarnya kita mengumpulkan panas limbah dan menerapkannya ke tempat yang diperlukan.

Selain itu, panas yang tersedia dalam gas buang-buang dapat dipulihkan secara ekonomis menggunakan *Air Preheater* yang sangat penting dalam semua *boiler* berbahan bakar batu bara [13].

Economizer terdiri dari pipa – pipa air yang ditempatkan pada lintasan gas asap sebelum meninggalkan ketel. Pipa – pipa *economizer* dibuat dari bahan baja atau besi tuang yang sanggup menahan panas dan tekanan tinggi. Korosi yang mungkin terbentuk sebelah sisi air dapat dihindarkan dengan jalan melunakkan air pengisi terlebih dahulu, dan korosi di sebelah luar (sisi gas asap) diatasi dengan mempertahankan temperatur gas asap tinggi di atas titik embun gas *sulfur*. Konduktivitas panas dan tahanan aliran gas yang disebabkan oleh abu/debu yang melekat pada pipa – pipa dicegah dengan pembersihan pipa – pipa secara berkala. Dengan menggunakan *economizer*, efisiensi termis ketel naik diperkirakan penghematan pemakaian bahan bakar dapat berkurang 1% tiap kenaikan temperatur air pengisi 5℃. Agar pemakaian ruangan kecil, maka permukaan pipa-pipa biasanya dibuat polos (licin) dan berliku dan dipasang horizontal serta sejajar satu sama lain dalam saluran gas buang. Di kedua ujung pipa dibuat kotak pengumpul (*header*) atas dan bawah dan juga sejajar satu sama lain. Penyerapan panas dari gas – gas kepada air akan lebih bermanfaat bila gas asap mengalir ke bawah dan air mengalir berliku– liku ke atas [14].

3. *Superheater*

Pemanas lanjut uap atau *superheater* ialah alat untuk memanaskan uap basah menjadi uap yang dipanaskan lanjut (kering). Uap yang dipanaskan lanjut bila digunakan untuk melakukan kerja dengan jalan ekspansi di dalam turbin atau mesin uap tidak akan (segera) mengembun, sehingga mengurangi kemungkinan timbulnya bahaya yang disebabkan terjadinya pukulan balik atau *back stroke* yang diakibatkan mengembunnya uap belum pada waktunya sehingga menimbulkan vakum di tempat yang tidak semestinya di daerah ekspansi [14].

Superheater adalah peralatan yang berfungsi untuk menaikkan temperatur uap jenuh sampai menjadi uap panas lanjut sesuai dengan kebutuhan untuk menggerakkan turbin. Karena uap yang terbentuk dari pemanasaan di dalam pipa pipa di ruang bakar berada dalam wujud kenyang (jenuh) atau basah maka uap

yang demikian jika digunakan atau diekspansikan dalam turbin, akan menimbulkan pengembunan yang cepat [14].

4. *Reheater*

Reheater adalah peralatan yang berfungsi untuk menaikkan temperatur uap dari turbin tekanan tinggi untuk dipanaskan ulang sesuai dengan kebutuhan untuk menggerakkan turbin tingkat tekanan berikutnya. Uap yang telah digunakan untuk memutar turbin tekanan tinggi (HP *Turbine*) mengakibatkan tekanan dan temperaturnya turun. Dengan memanfaatkan gas bekas maka uap tersebut dipanaskan ulang untuk menaikkan temperaturnya dengan tekanan tetap, sehingga mendapatkan entalpi yang lebih tinggi. Sesuai analisis Termodinamika, baik *superheater* maupun *reheater*, efisiensi termis suatu instalasi akan naik apabila menggunakan uap panas lanjut. Dengan menggunakan uap basah, akan menimbulkan erosi pada sudu-sudu turbin. *Superheater* (pemanas uap lanjut) dan *reheater* terpasang di saluran gas buang dalam ketel uap. Di dalam *superheater* uap jenuh atau basah yang berasal dari *drum* ketel temperaturnya dinaikkan pada tekanan tetap sampai temperatur yang diinginkan. Energi panas diambil dari gas-gas bekas, berlangsung secara radiasi dan atau konveksi. Sebagaimana halnya pada pipa-pipa air lainnya. Temperatur uap dibuat sedemikian tinggi sehingga material ketel harus mampu menahan suhu maupun tekanan kerjanya [14].

5. *Boiler Drum*

Bentuk drum mempengaruhi jalannya fluida melalui ketel, dan bentuknya tergantung dari fungsinya, variasi di dalamnya disesuaikan dengan instalasi di dalam *drum* ketel. *Boiler drum* adalah bejana tempat menampung air yang datang dari *economizer* dan uap hasil penguapan dari *wall tube* (*riser*). Kira-kira setengah dari *drum* berisi air dan setengahnya lagi berisi uap. Level air di dalam *drum* harus dijaga agar selalu tetap kira-kira setengah dari tinggi *drum*. Banyaknya air pengisi yang masuk ke dalam *drum* harus sebanding dengan banyaknya uap yang meninggalkan *drum*, sehingga level air terjaga konstant. Pengaturan level di dalam *boiler drum* dilakukan dengan mengatur besarnya pembukaan *flow control valve*. Apabila level di dalam air *drum* terlalu rendah/tidak terkontrol akan menyebabkan terjadinya *overheating* pada pipa-pipa *boiler*, sedangkan bila level *drum* terlalu tinggi, kemungkinan butir-butir air terbawa ke turbin dan

mengakibatkan kerusakan pada turbin. Untuk mengamankannya pada *boiler drum* dipasang alarm untuk level *high* dan level *low* serta trip untuk level *very low* dan *very high*. Level air di dalam *boiler drum* dapat dimonitor dengan menggunakan peralatan level *gauge* atau level indikator yang terdapat di dekat *boiler drum* lokal), atau dengan cara *remote* (jarak jauh) di *control room*, juga dicatat pada level *recorder*. Uap akan mengalir ke arah puncak *boiler drum* melewati *steam* separator dan *screen dryer* lalu keluar dari dalam *drum* dalam keadaan kering menuju separator dan akhirnya ke turbin. Butir-butir air yang terpisah dari uap akan jatuh dan bersirkulasi kembali bersama air yang baru masuk [14].

2.4.2. Turbin Uap

Turbin adalah suatu sebuah peralatan pemutar yang dilengkapi dengan sudu-sudu (*blade*). Uap kering (*superheated steam*) bertekanan dari hasil pembakaran akan menggerakan turbin untuk berputar. Perputaran turbin ini akan digunakan untuk memutar generator listrik yang dikopel atau digandengkan sehingga diperoleh listrik. Pengaturan tegangan dan arus listrik akan dilakukan dengan menggunakan transformator (trafo) *step up/down*. Uap air yang lepas setelah memutar turbin akan mengalir ke kondenser untuk dirubah menjadi air kembali [12].

2.4.3. Kondensor

Kondensor adalah suatu sebuah alat yang berfungsi untuk mengembunkan uap bekas menjadi air kembali dengan menggunakan air pendingin. Kondensor yaitu suatu alat untuk mengembunkan atau mengkondensasi uap bekas dari turbin menjadi air kondensat yang berkualitas tinggi untuk dipakai lagi di dalam siklus. Hal ini dilakukan dengan cara melalui proses pendinginan uap oleh air pendingin yang mengalir di bagian dalam pipa-pipa kondenser. Intinya kondenser merupakan sekumpulan pipa-pipa pendingin di mana uap bekas berada di bagian luar pipa (disebut sisi uap) sedangkan air pendingin mengalir di dalam pipa (disebut sisi air) [12].

2.4.4. Generator

Generator adalah mesin yang mengelola energi mekanik menjadi energi listrik. Prinsip kerja generator adalah rotor generator yang digerakan oleh turbin sehingga menimbulkan tenaga listrik. Sumber energi untuk menggerakkan turbin

terdiri dari berbagai macam sumber, antara lain adalah uap, air, gas, mesin diesel dan lain-lain. Kegunaan dari generator adalah sebagai sumber tenaga listrik untuk kebutuhan penggunaan alat atau beban seperti pompa air, pompa minyak, penerangan dan lain-lain [10].

2.5 *Overhaul*

Overhaul merupakan proses pemulihan dan perawatan peralatan, mesin, atau sistem. *Overhaul* melibatkan pembongkaran sebagian atau keseluruhan item. Pada *overhaul* juga terdapat inspeksi untuk mendeteksi komponen yang rusak, cacat, atau aus, perbaikan atau penggantian suku cadang tersebut, dan perakitan kembali, pengujian, dan uji coba sebelum untuk mengembalikan item ke tingkat pengoperasian penuh. Selain terdapat inspeksi. Pada kegiatan *overhaul* juga terdapat pengecekan performa alat, atau dapat di sebut *performance test* [13].

Pengertian dari *overhaul* pada *boiler* merupakan suatu kegiatan pemulihan dan perawatan peralatan, mesin, atau sistem pada *boiler* dimana melibatkan pembongkaran sebagian atau keseluruhan item dari *boiler* tersebut. Ada berapa jenis dari *overhaul* khususnya pada unit pembangkitan listrik tenaga uap [13],[14].

a. *Simple Inspection* (SI) dilaksanakan bila unit telah beroperasi 8000 jam sesudah pelaksanaan *Medium Inspection* atau 8000 jam sesudah pelaksanaan *serius Inspection, overhaul* dilaksanakan selama 15-20 hari.
b. *Mean Inspection* (ME) dilaksanakan bila unit telah beroperasi 16.000 jam sesudah pelaksanaan *Serious Inspection, overhaul* dilaksanakan selama 30-35 hari.
c. *Serious Inspection* (SE) dilaksanakan setelah unit beroperasi 8000 jam dari *start* awal dan selanjutnya setelah unit beroperasi 32.000 jam, *overhaul* dilaksanakan selama 45-50 hari.

Overhaul dilakukan dengan tujuan untuk:

a. Meningkatkan kesiapan, keandalan dan efisiensi unit pembangkit
b. Menurunkan persentase pemeliharaan *emergency*

2.6 Nilai Kalor Batu Bara

Nilai kalor merupakan indikasi langsung dari kandungan panas (nilai energi) batu bara dan mewakili gabungan panas pembakaran karbon, hidrogen, nitrogen, dan *sulfur* dalam bahan organik dan *sulfur* dalam *pyrite* dan merupakan

nilai kalor atas, nilai kalor bawah ditentukan dengan koreksi yang diterapkan. Nilai kalor biasanya dinyatakan sebagai *Gross Calorific Value* (GCV) atau *Higher Heating Value* (HHV) dan *Net Calorific Value* (NCV) atau *Lower Heating Value* (LHV). Selisih antara nilai kalor atas dan nilai kalor bawah adalah panas laten kondensasi uap air yang dihasilkan selama proses pembakaran [15].

Batu bara memiliki nilai kalor yang berbeda-beda tergantung dari jenis batu bara yang ada. Nilai kalori batu bara tercantum pada tabel berikut [8]:

Tabel 2.1. Tingkat Kualitas Batu bara

Tingkat kualitas batu bara		
No.	Jenis Batu bara	Nilai kalori (kkal/kg)
1	*Gambut*	300-2200
2	*Lignit*	2400-4800
3	*Subbituminous*	4600-6400
4	*Bituminous*	5700-8300
5	*Anthracite*	6200-7900

2.6.1. *Higher heating value* (HHV)

Nilai kalor atas mengasumsikan bahwa semua uap yang dihasilkan selama proses pembakaran sepenuhnya terkondensasi. *Higher heating value* (HHV) atau nilai kalor atas didapat dengan cara membakar bahan bakar tersebut sebanyak 1 kg dan mengukur kalor yang didapat dengan menggunakan kalorimeter pada suhu 15℃ sehingga uap air yang didapat dari pembakaran ini (hasil pembakaran) mengembun dan melepaskan kalor di pengembunannya [15], [16].

2.6.2. *Lower heating value* (LHV)

Lower heating value (LHV) atau nilai kalor bawah mengasumsikan bahwa air dihilangkan dengan produk pembakaran tanpa sepenuhnya terkondensasi. Nilai kalor bawah didapat dengan cara mengurangi nilai kalor atasnya dengan kalor pengembunan air yang dikandungnya [15], [16].

2.7 Standar Dalam Melakukan Analisis

Standar yang digunakan dalam melakukan analisis pengaruh *overhaul* terhadap efisiensi termal PLTU Bengkayang 2×50 MW adalah dengan menggunakan Standar Perusahaan Listrik Negara (SPLN) No. 80 Tahun 1989.

2.7.1. *Specific Fuel Consumption* (SFC)

Konsumsi bahan bakar spesifik merupakan parameter unjuk kerja mesin yang berhubungan langsung dengan nilai ekonomi suatu mesin. Dengan parameter ini maka jumlah bahan bakar yang dibutuhkan untuk menghasilkan sejumlah daya dalam selang waktu tertentu dapat dihitung dengan berdasarkan SPLN No. 80 tahun 1989. Berikut persamaan yang digunakan untuk menghitung konsumsi spesifik bahan bakar adalah [1], [17]:

a. Perhitungan konsumsi spesifik bahan bakar *bruto* (SFC_B)

$$SFC_B = \frac{Qf}{kWh\ B} \quad (2.1)$$

b. Perhitungan konsumsi spesifik bahan bakar *netto* (SFC_N)

$$SFC_N = \frac{Qf}{kWh\ B - kWh\ PS} \quad (2.2)$$

Dimana:

SFC_B = Konsumsi spesifik bahan bakar *bruto* (kg/kWh)
SFC_N = Konsumsi spesifik bahan bakar *netto* (kg/kWh)
Qf = Jumlah bahan bakar batu bara yang dipakai (kg)
kWh B = Energi listrik yang dibangkitkan generator (kWh)
kWh PS = Energi listrik yang untuk pemakaian sendiri (kWh)

2.7.2. Laju Kalor (*Heat Rate*)

Heat Rate merupakan perbandingan antara jumlah energi yang diberikan kepada suatu sistem dan hasil yang diperoleh dari sistem tersebut dalam suatu periode tertentu. Pada PLTU, *heat rate* (laju kalor) tersebut dapat berupa *heat rate* (laju kalor) untuk turbin generator. Salah satu cara menilai kinerja PLTU secara keseluruhan adalah dengan menghitung berapa *heat rate* PLTU tersebut. *Heat rate* dapat juga didefinisikan sebagai banyaknya panas yang diperlukan untuk membangkitkan satu kWh listrik. *Heat rate* diperoleh dengan cara membagi konsumsi panas per jam dengan *output* energi listrik dalam satu jam. Karena itu *heat rate* dinyatakan dalam satuan kJ/kWh, BTU/kWh atau kcal/kWh. Secara umum dikenal dua macam *heat rate* yaitu *heat rate bruto* dan *heat rate netto*.

Pada *heat rate bruto*, maka *output* energi listrik yang diukur adalah energi listrik yang dihasilkan oleh generator. Sedangkan untuk *heat rate netto*, energi

listrik yang diukur adalah energi listrik yang dihasilkan generator dikurangi energi listrik yang dipakai untuk menggerakkan alat-alat bantu PLTU (energi listrik yang dibangkitkan generator – pemakaian sendiri) dan juga ditambah dengan *losses* trafo. Berikut persamaan yang digunakan untuk menghitung *heat rate* adalah [1], [17]:

a. Perhitungan laju kalor (*heat rate*) *bruto*

$$HR_B = \frac{Qf \times HHV}{kWh\ B} \quad (2.3)$$

b. Perhitungan laju kalor (*heat rate*) *netto*

$$HR_N = \frac{Qf \times HHV}{kWh\ B - kWh\ PS} \quad (2.4)$$

Dimana:

HR_B = Laju kalor *bruto* (kkal/kWh)
HR_N = Laju kalor *netto* (kkal/kWh)
Qf = Jumlah batu bara yang dipakai (kg)
HHV = Nilai kalor atas bahan bakar (kkal/kg)
kWh B = Energi listrik yang dibangkitkan generator (kWh)
kWh PS = Energi listrik untuk pemakaian sendiri (kWh)

2.7.3. Efisiensi Termal

Efisiensi merupakan perbandingan antara energi yang dihasilkan dengan energi dimasukkan dalam suatu sistem dalam periode yang ditentukan. Besarnya efisiensi termal tergantung pada beban, semakin tinggi beban maka semakin besar efisiensinya. Efisiensi termal unit (ηth) adalah presentase keluaran energi terhadap masukan kalor [1].

Secara umum efisiensi diartikan sebagai perbandingan antara *output* terhadap *input* dalam suatu proses. Efisiensi merupakan salah satu persamaan yang penting dalam termodinamika untuk mengetahui seberapa baik konversi energi atau proses transfer terjadi. PLTU dirancang untuk menghasilkan *output* berupa energi listrik dalam besaran tertentu untuk sejumlah *input* berupa bahan bakar dalam jumlah tertentu. Bila seluruh komponen PLTU memiliki efisiensi yang tinggi, maka unjuk kerja (*performance*) PLTU tersebut dikatakan tinggi sehingga biaya operasi PLTU juga rendah. Seandainya karena suatu alasan

tertentu kinerja PLTU turun, berarti PLTU memerlukan bahan bakar lebih banyak untuk menghasilkan *output* energi listrik sesuai desain. Akibatnya biaya bahan bakar operasi menjadi semakin tinggi. Idealnya, kita menghendaki agar energi kimia (*input*) dapat diubah seluruhnya menjadi energi listrik (*output*). Pada kenyataannya, hal ini tidak mungkin dapat dilaksanakan karena adanya berbagai kerugian (*losses*) yang terjadi hampir disetiap komponen PLTU. Akibat kerugian tersebut , maka energi listrik yang dihasilkan PLTU selalu lebih kecil dari energi kimia yang masuk ke PLTU. Para insinyur terus berusaha meningkatkan efisiensi perangkat ini karena peningkatan efisiensi berarti konsumsi bahan bakar yang lebih sedikit dan dengan demikian menurunkan tagihan bahan bakar dan mengurangi polusi [5], [18].

Adapun efisiensi energi termal adalah bentuk dasar energi. Artinya, semua bentuk efisiensi energi yang lain dapat secara sempurna dikonversi menjadi efisiensi termal. Sebenarnya, semua efisiensi energi akhirnya akan dikonversikan menjadi efisiensi termal, kecuali bila disimpan dalam bentuk lain. Pengkonversian efisiensi energi termal menjadi bentuk efisiensi energi yang lain adalah terbatas hingga suatu harga yang lebih kecil dari 100% [6].

Dalam termodinamika, efisiensi termal adalah ukuran tanpa dimensi yang menunjukkan performa peralatan termal seperti mesin pembakaran dalam dan sebagainya. Panas yang masuk adalah energi yang didapatkan dari sumber energi. *Output* yang diinginkan dapat berupa panas atau kerja, atau mungkin keduanya [5].

Ketika ditulis dalam persentasi, efisiensi termal harus berada diantara 0% dan 100%. Karena inefisiensi seperti gesekan, hilangnya panas, dan faktor lainnya, efisiensi termal mesin tidak pernah mencapai 100%. Seperti contoh, mesin mobil bensin memiliki efisiensi 25%, artinya mesin mobil mengubah sekitar 25% energi kimia bensin menjadi kerja mekanik. Mesin diesel memiliki efisiensi maksimum 40% dan efisiensi untuk pembangkit listrik tenaga gas-uap gabungan yang besar adalah 60%. Jadi, bahkan dengan mesin panas paling efisien yang tersedia saat ini, hampir setengah dari energi yang dipasok berakhir di sungai, danau, atau atmosfer sebagai limbah atau energi yang tidak berguna [7],

[6]. Persamaan yang digunakan untuk menghitung efisiensi termal adalah sebagai berikut [17]:

a. Perhitungan efisiensi termal *bruto*

$$\eta_{th\,B} = \frac{859{,}845}{\mathrm{HR_B}} \times 100\% \quad (2.5)$$

b. Perhitungan efisiensi termal *netto*

$$\eta_{th\,N} = \frac{859{,}845}{\mathrm{HR_N}} \times 100\% \quad (2.6)$$

Dimana:

HR_B = laju kalor (*heat rate*) *bruto* (kkal/kWh)

HR_N = laju kalor (*heat rate*) *netto* (kkal/kWh)

$\eta_{th\,B}$ = efisiensi termal *bruto* (%)

$\eta_{th\,N}$ = efisiensi termal *netto* (%)

Catatan:

1 kJ = 0,2388 kkal
= 0,2948 BTU
= 0,000277 kWh

1 kCal = 0,001163 kWh = 4,187 kJ

1 kWh = 859,845 kkal

1 kg = 2,205 lb