

BAB II

DASAR TEORI

II.1 Landasan teori

Energi adalah kapasitas untuk melakukan kerja, menghasilkan panas, dan memancarkan cahaya. Persamaan untuk usaha adalah gaya, yaitu waktu massa gravitasi kali jarak.

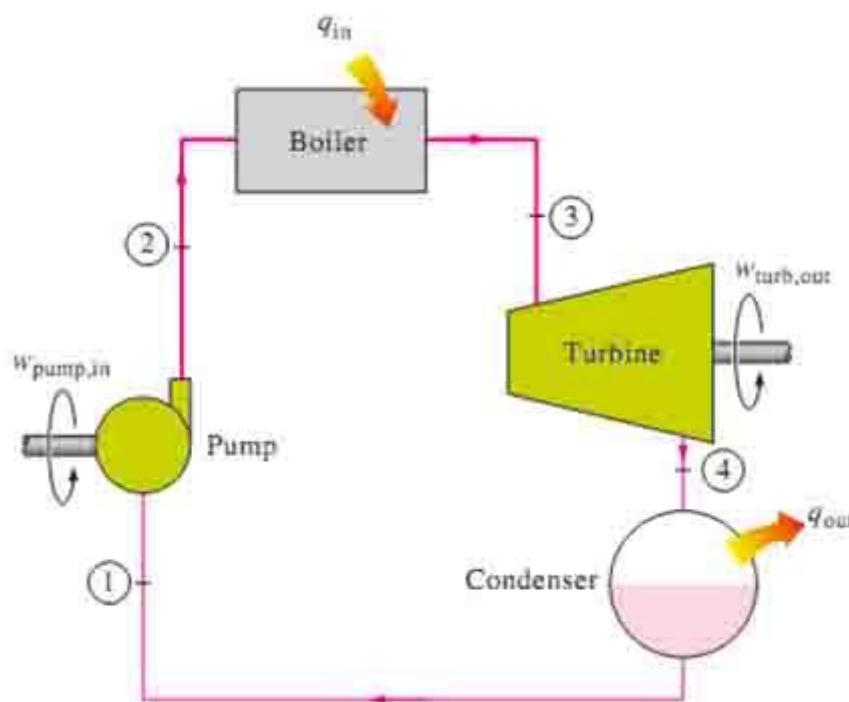
Kalor adalah kemampuan untuk mengubah suhu suatu benda atau fase suatu zat. Sebagai contoh, kalor mengubah zat padat menjadi cair atau zat cair menjadi uap. Kalor adalah bagian dari definisi energi. Bagian lain dari pengertian energi adalah radiasi, yaitu cahaya dan energi yang dipancarkan dalam bentuk gelombang yang merambat dengan kecepatan cahaya.

Energi diukur dalam satuan kalori, quad, dan joule. Satu kilokalori adalah jumlah energi atau panas yang diperlukan untuk menaikkan suhu 1 kilogram air dari 14,5°C menjadi 15,5°C. Unit quad digunakan untuk mengukur energi yang dibutuhkan untuk negara-negara besar. Pengukuran akhir energi adalah joule.

Energi merupakan input penting untuk pembangunan ekonomi dan peningkatan kualitas hidup. Konsumsi Energi Komersial per kapita India (yaitu batu bara, minyak bumi, dan listrik) hanya seperdelapan dari Rata-Rata Global dan akan meningkat seiring pertumbuhan Produksi Domestik Bruto (PDB) dan peningkatan standar hidup. Energi Komersial menyumbang sedikit lebih dari setengah dari total energi yang digunakan dalam Negara, sisanya berasal dari sumber daya non-komersial seperti kotoran sapi, kayu bakar, dan limbah pertanian. Meskipun bagian dari sumber-sumber non-komersial ini telah menurun, konsumsi telah meningkat hampir dua kali lipat sejak tahun 1953. Sumber-sumber non-komersial yang terbarukan ini telah digunakan secara ekstensif selama ratusan tahun tetapi dengan cara yang primitif dan tidak efektif. Penggunaan sumber energi non-komersial yang sembarangan menyebabkan krisis energi di daerah pedesaan. Rencana Ketujuh menitikberatkan pada pengembangan dan percepatan pemanfaatan sumber energi terbarukan di pedesaan dan perkotaan. Kebijakan utama Pemerintah diarahkan untuk meningkatkan penggunaan batubara di rumah tangga dan listrik di sektor transportasi guna mengurangi ketergantungan terhadap minyak bumi yang semakin lama semakin langka [32]

II.2 PLTU

Gambar 4 menunjukkan diagram garis pembangkit listrik turbin uap. Di pembangkit ini, uap dihasilkan di dalam ketel (proses. 4-1) dengan membakar bahan bakar fosil dan diekspansi di turbin uap dari 1 menjadi 2 yang memberikan kerja mekanis ke poros turbin sehingga menghasilkan tenaga. Uap buangan dari turbin uap dikondensasikan di kondensor dari 2 menjadi 3 dan diumpungkan kembali ke boiler. Efisiensi pembangkit listrik turbin uap cukup tinggi (sekitar 35 hingga 40%) dan biaya pemeliharaannya rendah dibandingkan dengan mesin uap. Juga, output yang jauh lebih besar hingga 1000 MW dari pembangkit listrik turbin uap tunggal dimungkinkan. Pemasangan dan penyelesaian pembangkit listrik turbin uap membutuhkan waktu sekitar 3 tahun yang jauh lebih singkat dibandingkan dengan pembangkit listrik tenaga air. Listrik yang dihasilkan oleh pabrik ini lebih mahal daripada hydel, tetapi mengingat meningkatnya permintaan akan daya dan waktu penyelesaian yang singkat serta kemudahan pemasangan dan lokasinya, kami lebih memilih pabrik ini.



Gambar 4 .Sistem Kerja Pembangkit Listrik Tenaga Uap

Sumber: (<http://tutorialteknik.blogspot.com/2011/05/siklus-rankine-ideal.html> ,2015)

II.3 Boiler

Boiler adalah bejana tertutup di mana panas yang dihasilkan oleh pembakaran bahan bakar dipindahkan ke air umpan untuk menghasilkan uap. Boiler adalah alat penukar panas.

Ketel merupakan bejana tertutup yang digunakan pada umumnya untuk menghasilkan uap. [33]

Untuk perpindahan panas yang efektif, suatu unit perpindahan panas akan disusun dengan cara yang berbeda. Persyaratan tekanan tinggi dan uap suhu tinggi di pembangkit listrik saat ini untuk menggerakkan turbin uap telah membuat desain boiler menjadi kompleks. Boiler berkapasitas tinggi dioperasikan di atas kisaran tekanan kritis (221,2 bar). Boiler yang baik harus memiliki beberapa kualitas penting. Ini adalah sebagai berikut:

- Mampu memenuhi fluktuasi beban yang besar
- Hemat bahan bakar atau untuk menghasilkan uap maksimum dengan konsumsi bahan bakar minimum
- Mampu memulai pembakaran dengan cepat
- Mudah untuk pemeliharaan dan pemeriksaan
- Menempati lebih sedikit ruang lantai
- Kehilangan gesekan lebih sedikit di sirkuit air dan gas buang
- Membutuhkan sedikit *monitoring* untuk pengoperasian dan pemeliharaan

Boiler terutama berisi sistem berikut:

- Sistem air umpan
- Sistem uap
- Sistem udara
- Sistem gas buang
- Sistem penanganan bahan bakar
- Sistem penanganan abu

Spesifikasi boiler PLTU XYZ:

- | | | |
|-----|--------------------------------------|------------------------------------------|
| 1. | <i>Manufacture</i> | : China western power industrial Co. LTd |
| 2. | <i>Type</i> | : <i>Circulating fluidized Bed</i> |
| 3. | <i>Capacity</i> | : 120 t/h |
| 4. | <i>Superheated steam pressure</i> | : 9,8 MPa |
| 5. | <i>Superheated steam temperature</i> | : 540 Deg C |
| 6. | <i>Drum Working temperature</i> | : 325 Deg C |
| 7. | <i>Drum working Pressure</i> | : 10,5 Mpa |
| 8. | <i>Feed water temperature</i> | : 215 Deg C |
| 9. | <i>Boiler efficiency</i> | : 82,5 % |
| 10. | <i>Fuel Type</i> | : <i>Lignite</i> |

I.1.1. Klasifikasi Boiler

Jenis boiler telah berkembang mengikuti zaman dan kemajuan teknologi dan evaluasi dari produk-produk boiler sebelumnya yang dipengaruhi oleh gas buang boiler yang mempengaruhi lingkungan dan produk steam yang dibutuhkan. Berdasarkan jenis bahan bakarnya boiler dibagi menjadi 3 yakni pulverize, Circulating fluidized bed dan stocker.

I.1.1.1. *Pulverized Firing (PF) Boiler*

Pembakaran tangensial (tangential firing) yaitu menggunakan 4 (empat) burner yang dipasang disudut ruang bakar sehingga dapat menghasilkan bola api dipusat tungku. Pembakaran Dinding (Wall Fired) yaitu pembakaran dengan menggunakan beberapa burner yang disusun sebaris disalah sisi dinding ruang bakar

I.1.1.2. *Fluidized Bed Boiler*

Fluidized adalah penghembusan udara primer terhadap material bed dan batubara di ruang bakar / Furnace dengan tujuan agar material bed tersebut tetap melayang - layang diruang bakar. Proses pembakaran lebih cepat dengan dibantu penyalaan bahan bakar gas / HSD. Boiler CFB merupakan boiler yang ramah lingkungan.

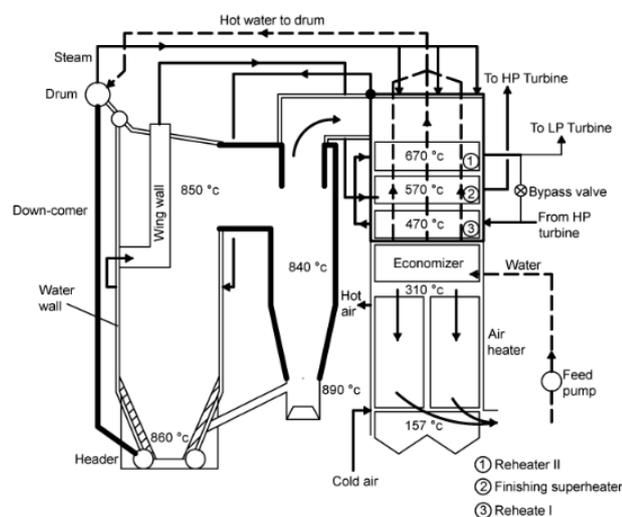
I.1.1.3. *Boiler stocker*

Stoker Type Boiler adalah sistem pembakaran dengan memasukan bahan bakar padat pada bed pembakaran yang tetap, udara yang digunakan untuk proses pembakaran dengan kecepatan yang kecil, ukuran untuk tipe boiler ini terbatas sehingga kemampuan untuk menghasilkan uap maksimum $\pm 50,4$ kg/s. Keuntungan tipe boiler ini adalah dapat merespon secara tiba-tiba perubahan beban dan dapat membakar bahan bakar dalam jumlah besar sekaligus. Bahan metal tipe ini harus mempunyai ketahanan terhadap panas yang tinggi karena pembakaran di ruang bakar melebihi 1093C.

II.3 Boiler CFB

Boiler CFB adalah perangkat untuk menghasilkan uap dengan membakar bahan bakar fosil dalam tungku yang dioperasikan di bawah kondisi hidrodinamik khusus di mana bahan bakar halus diangkut melalui tungku dengan kecepatan melebihi kecepatan terminal partikel rata-rata, namun ada tingkat refluks padatan yang memadai untuk memastikan keseragaman suhu dalam tungku. Tungku atau ruang pembakaran boiler CFB menampung persediaan besar padatan tidak mudah terbakar yang diangkat dan dibawa oleh gas pembakaran berkecepatan

tinggi yang melewati tungku. Fraksi utama padatan keluar dari *furnace* dan ditangkap oleh pemisah gas-padat dan disirkulasikan kembali di dekat dasar *furnace* pada laju yang cukup tinggi untuk menyebabkan tingkat refluks padatan yang minimum di dalam tungku. Gambar 2.1 menunjukkan skema tipikal boiler CFB. Pembakaran bahan bakar dalam suspensi padat padatan disimpan dalam hidrodinamika khusus kondisi di dalam tungku. Sebagian kecil dari panas pembakaran diserap oleh permukaan berpendingin air/uap yang terletak di dalamnya, dan sisanya diserap di bagian konvektif yang terletak lebih jauh ke hilir tungku yang dikenal sebagai jalur belakang. Penciptaan kondisi hidrodinamik khusus, yang dikenal sebagai Fast bed, adalah kunci pengoperasian boiler CFB. Kombinasi khusus kecepatan gas, resirkulasi padat



Gambar 5. Boiler Circulating Fluidized Bed

Sumber : (https://www.linkedin.com/posts/miswar-alamyah-lubis-1b8841125_economizer-cfbboiler-activity-6869178646935015424-N2vJ?trk=public_profile_like_view , 2023)

laju, karakteristik zat padat, inventaris zat padat, dan geometri sistem memunculkan kondisi hidrodinamik khusus ini di mana partikel padat terfluidisasi pada kecepatan yang lebih besar daripada kecepatan terminal partikel individual. Meskipun partikel terangkut dalam kecepatan gas yang melebihi kecepatannya terminalnya, partikel tidak segera terbawa seperti yang diharapkan dalam sistem transportasi pneumatik vertikal. Sebaliknya, padatan

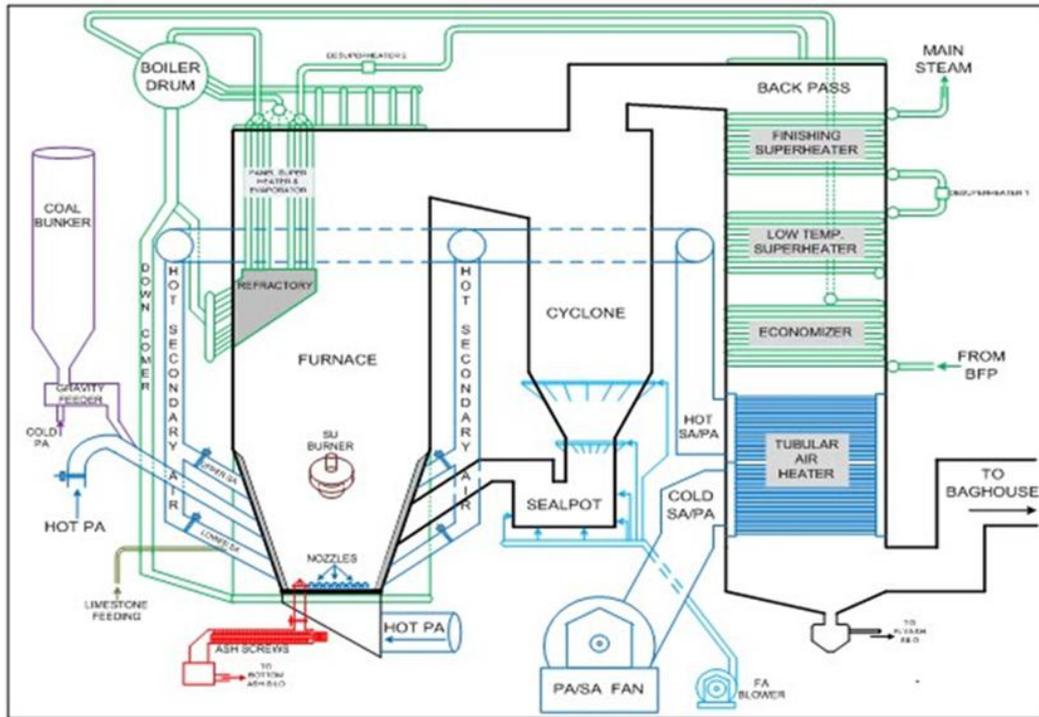
ditemukan bergerak ke atas dan ke bawah dalam bentuk agregat, menyebabkan tingkat refluks yang tinggi di dalam tungku. Di atas aglomerat padat, yang disebut cluster, panjang dan ramping dan bergerak secara vertikal, ke samping, dan ke bawah. Mereka dibentuk terus menerus, dibubarkan, dan direformasi lagi. Proses pengangkutan khusus ini juga mampu mengangkut secara terbatas jumlah partikel besar, yang kecepatan terminalnya lebih tinggi dari kecepatan rata-rata gas melalui tungku. Tabel 1.1 membandingkan karakteristik gelembung terfluidisasi, terfluidisasi sirkulasi, dan unggun transportasi pneumatik. Gambar 1.4 memplot kecepatan gas rata-rata melalui tungku bersama dengan kecepatan rata-rata padat yang sesuai. Di sini, kami mencatat bahwa sementara kecepatan gas meningkat dari satu rezim perasi ke yang lain, kecepatan padat tidak meningkat sebanyak itu. Akibatnya, kecepatan slip gas-padat meningkat ketika seseorang bergerak dari gelembung ke unggun cepat, tetapi di luar unggun cepat, kecepatan slip tiba-tiba turun menjadi sekitar kecepatan terminal partikel.

Boiler CFB adalah perangkat untuk menghasilkan uap dengan membakar bahan bakar fosil di dalam tungku dioperasikan dalam kondisi hidrodinamik khusus: di mana padatan halus (diangkut melalui tungku dengan kecepatan melebihi terminal kecepatan partikel rata-rata, namun ada tingkat refluks padatan yang cukup untuk memastikan keseragaman suhu dalam tungku. Tungku atau ruang pembakaran boiler CFB menyimpan persediaan besar padatan yang tidak mudah terbakar yang diangkat dan terbawa oleh pembakaran kecepatan tinggi gas yang melewati tungku. Fraksi utama padatan meninggalkan tungku

Pada furnace boiler tipe CFB kecepatan gas lebih cepat daripada boiler fluidized bed yang sistem bubling. Agar kepadatan yang ada didalam furnace yaitu bed material dapat terangkat, dan mengalir maka diperlukan nilai kecepatan gas minimum agar partikel dapat terangkat dan keluar furnace. Pembakaran bahan bakar padat didalam furnace terjadi akibat turbelensi, berbenturan dengan material bed yaitu pasir. Sisa bahan bakar padat yang belum terbakar akan sirkulasi melalui cyclone/compact separator.

- *circulating*: proses sirkulasi bed material dan batubara yang belum habisterbakar dari furnace masuk cyclone kemudian turun ke seal pot dan kembali ke furnace.
- *Fluidized*: penghembusan udara primer untuk menjaga bed material dan batubara tetap melayang didalam furnace.

- Bed : material berupa partikel-partikel kecil (pasir kuarsa, bottom ash) yang digunakan sebagai media transfer panas dari pembakaran hsd ke pembakaran batubara.



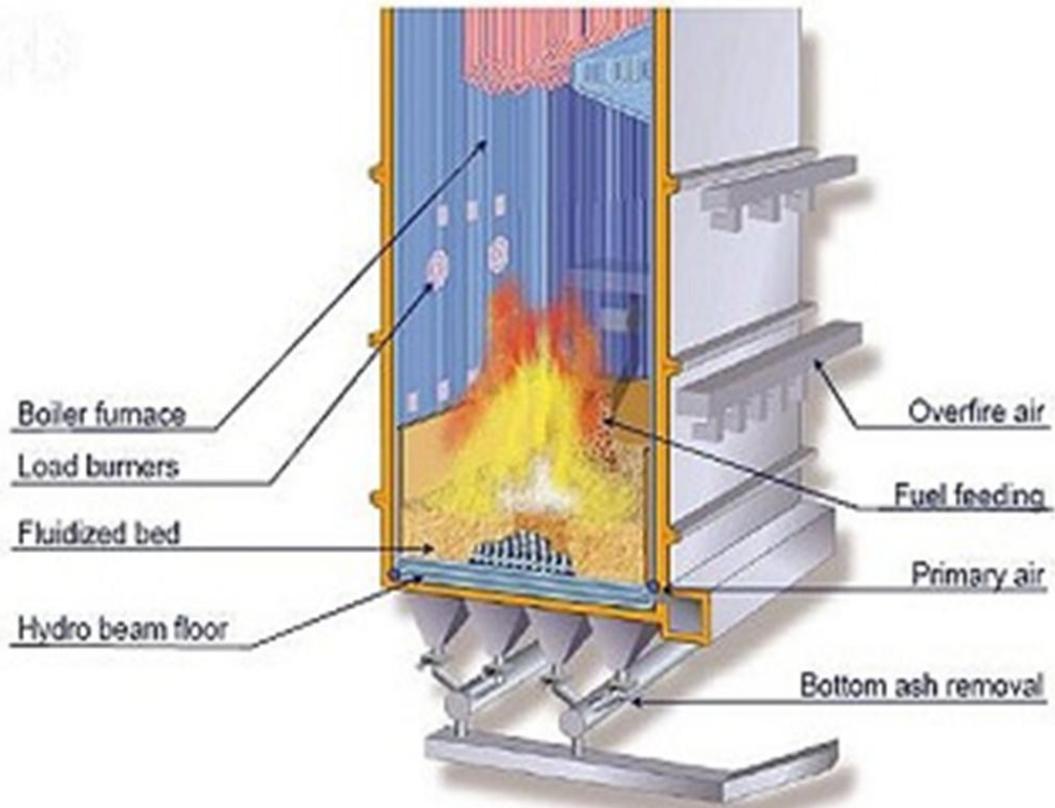
Gambar 6. Komponen Utama Boiler CFB

Sumber : (<https://www.caesarvery.com/2015/04/bagian-bagian-furnace-boiler.html> , 2015)

II.4 Bagian Boiler CFB

I.1.2. Furnace

Furnace berfungsi sebagai tempat terjadinya proses pembakaran bahan bakar batubara. Komponen yang ada. Bagian furnace dikelilingi oleh tube yang didalamnya terisi air. Tube ini seringkali disebut dengan istilah walltube. Pada walltube terjadi proses pembakaran. Bagian tube menerima panas dari pembakaran pada furnace melalui proses konveksi dan radiasi. Di dalam furnace terdapat tube dengan nama Wall tube, Evaporator dan Superheater.

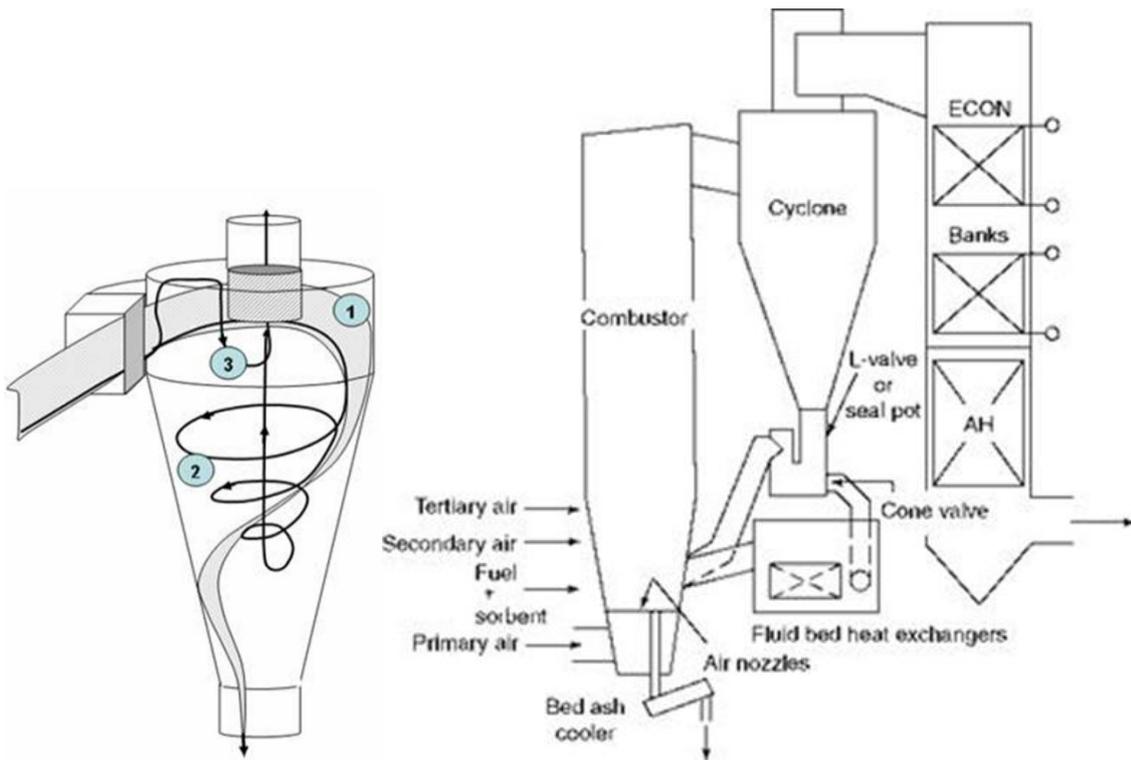


Gambar 7. Bagian Furnace Boiler CFB

Sumber : (<https://www.caesarvery.com/2021/04/catatan-lengkap-pembakaran-batubara.html> , 2021)

I.1.3. Cyclone / Seal Pot / J-Valve

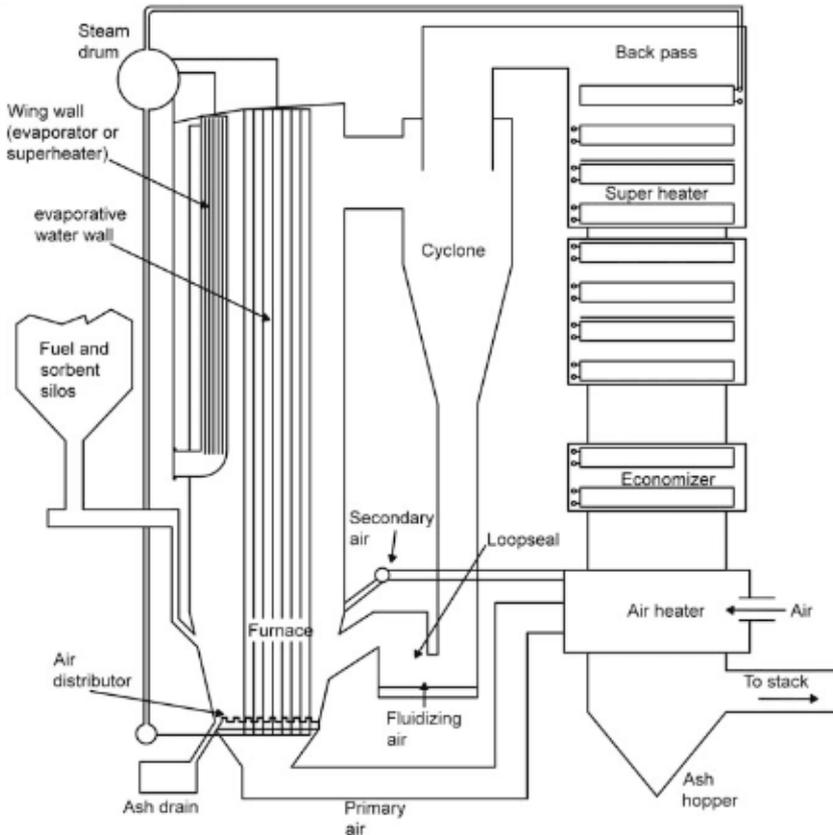
Pada boiler CFB Untuk memisahkan batubara yang belum terbakar dengan abu (ash) sisa pembakaran dan mengembalikan ke Furnace. Komponen utama Cyclone yaitu Cyclone, Seal Pot dan Seal Pot Duct. Material yang terbakar, semakin lama semakin naik ke bagian atas Furnace karena massanya berkurang dan masuk Cyclone Separator melalui transition piece sehingga flue gas dan fly ash terpisah dari material. Material solid yang belum terbakar masuk kembali ke dalam Cyclone Outlet Cone dengan bantuan udara dari fluidizing air blower menuju Seal Pot dan diinjeksikan kembali ke melalui Seal Pot Return duct Furnace. Hal tersebut terjadi secara berulang.



Gambar 8. Komponen Cyclone Boiler CFB
 Sumber : (http://www.utc.fr/ergun/cyclone_cfb.html , 2022)

I.1.4. Backpass

Backpass Berfungsi sebagai ruang pemanfaatan kalor yang terdapat dalam flue gas. Komponen utama di Backpass: Finishing Superheater, Low temperature Superheater, Economizer, dan Air Heater. Pemanfaatan kalor terjadi Ketika gas buang ditarik oleh id fan, Ketika melewati komponen komponen tersebut terjadilah proses perpindahan panas antara flue gas dengan superheater, economizer serta air heater.



Gambar 9. Komponen Backpass Boiler CFB

Sumber : (<https://www.caesarvery.com/2018/11/penampakan-didalam-boiler-pltu.html> , 2018)

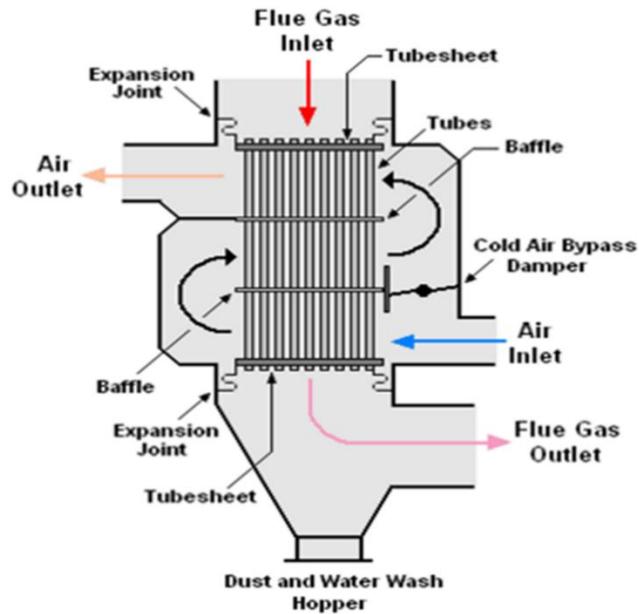
I.1.5. *Air Preheater*

Air Preheater (APH) merupakan peralatan bantu yang berfungsi sebagai pemanas awal udara baik udara primer (Primary air) maupun sekunder (Secondary air), sampai ke tingkat temperatur tertentu sehingga dapat terjadi pembakaran optimal dalam boiler. Dalam prosesnya, Air Preheater ini menggunakan gas buang (flue gas) hasil pembakaran di boiler sebagai sumber panasnya, kemudian mentransfer panas tersebut ke aliran udara melalui elemen pemanas berputar (rotating heat exchanger). Ada dua jenis reheater yang paling umum yaitu jenis:

- Regenerative air heater dan
- Recuperatif air heater.

Perbedaan tersebut adalah jenis:

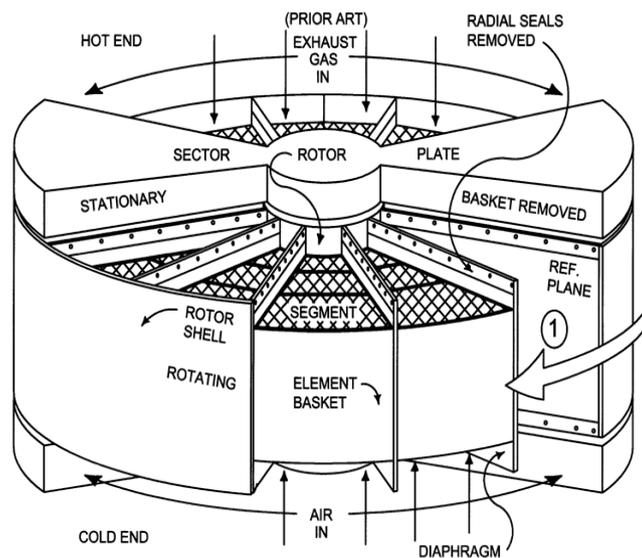
- Regenerative berupa rotor yang berputar
- Recuperative rotor tidak berputar hanya flue gas yang mengalir.



1.

Gambar 10. Air Heater dengan Tipe Recuperatif

Sumber : (<https://www.quconboilers.com/air-pre-heaters> , 2023)



Gambar 11. Air Heater dengan Tipe Regenerative

Sumber : (<https://www.semanticscholar.org/paper/Preliminary-Design-and-Analysis-of-Regenerative-Kilkovsk%C3%BD-Jegla/c7267fafa8c68dfec75d8beed15c0590e647900c> , 2023)

I.1.5.1. Bagian-Bagian *Air Preheater*

I. Elemen Pemanas (Heating Surface)

Elemen pemanas yang berupa lempengan-lempengan plat metal yang terbagi menjadi 2 bagian secara vertikal yaitu:

- sisi atas Hot End layer dan
- sisi bawah Cold End layer.

Plat itu terpasang pada suatu poros yang di susun pada kompartemen silindris yang terbagi secara radial yang semua bagiannya di sebut sebagai rotor. Rotor ini berputar dalam ruangan yang memiliki sambungan duct di kedua sisinya satu sisi di aliri gas buang, sisi lain berisi udara baik primer maupun sekunder. Saat rotor diputar, setengah bagiannya memasuki saluran gas buang dan menyerap energi panas yang terkandung di dalamnya sedangkan setengah bagian yang lain mentransfer panas dari elemen ke udara pada sisi saluran udara sehingga menghasilkan udara panas yang selanjutnya akan dipasok ke furnace.

II. Penggerak Rotor

Rotor di gerakan oleh motor listrik yang diletakan di luar elemen pemanas. Penggerak rotor dihubungkan pada central, dan terdapat dua motor penggerak yang mempunyai kecepatan 1455 rpm. Dua motor tersebut dihubungkan dengan central melalui gearbox dengan rasio tranmisi 9.110/1 yang dihubungkan oleh kopling feksibel pada gearbox kedua. Gearbox kedua menggunakan roda gigi cacing (worm gear) dengan dua langkah, yang pertama dengan rasio 43/4 dan yang kedua 59/4. Setelah kecepatan berkurang dengan dua gearbox, rasionya menjadi 1444.5/1, keluaran main motor menjadi 1,07 rpm dan auxilliary menjadi 0,5 rpm.

III. Seal Rotor

Seal (perapat) berfungsi sebagai pencegah kebocoran fluida baik udara maupun gas buang yang melewati elemen panas pada saat operasi. Pada kondisi normal aliran udara memiliki level tekanan yang lebih tinggi dari aliran gas hal inilah yang rawan akan kebocoran. Seal rotor dalam APH terdiri dari:

a. Radial Seal

Seal radial terpasang sesuai dengan posisi rotor yang posisinya terhadap plate rotor dapat di setting dan mempunyai standar sesuai dengan desain manufaktur. Dalam mensetting juga memperhatikan ekspansi rotor akibat temperature tinggi. Radial seal berfungsi untuk mereduksi kebocoran langsung dari area udara ke gas buang.

b. Axial Seal

Axial seal dipasang pada sisi luar dari rotor memanjang dari sisi hot end sampai dengan cold end. Seal bekerja sama dengan radial seal untuk meminimalkan gap antara rotor dengan seal.

c. Circumferential seal

Letaknya disekeliling dan pusat rotor. Fungsi utama adalah mencegah kebocoran udara atau gas buang saat berputarnya rotor, dalam melakukan fungsi ini dibantu axial seal.

IV. Bearing

Pada sisi bagian atas dan bawah rotor inner drum, terdapat roller guide bearing (SKF C3172M/C4 dan auto-centered roller thrust bearing (SKF 29480EM) yang dipasang untuk menahan beban rotor arah horizontal dan beban axial vertical.

Efisiensi

Seperti yang telah kita maklumi bahwa hasil keluaran (*output*) dari PLTU adalah berupa energi listrik sedang sebagai masukan (*input*) nya adalah energi kimia yang terkandung dalam bahan bakar. Idealnya, kita menghendaki agar energi kimia (*input*) dapat diubah seluruhnya menjadi energi listrik (*output*). Tetapi pada kenyataannya, hal ini tidak mungkin dapat dilaksanakan karena adanya berbagai kerugian (*losses*) yang terjadi hampir disetiap komponen PLTU. Akibat kerugian-kerugian tersebut, maka energi listrik yang dihasilkan PLTU selalu lebih kecil dari energi kimia yang masuk ke sistem PLTU. Dalam kaitannya dengan output dan input, seringkali kita mendengar istilah efisiensi. Secara umum, efisiensi didefinisikan sebagai perbandingan antara output terhadap input dalam suatu proses. Efisiensi suatu pembangkit dalam kaitannya dengan input, PLTU dirancang untuk menghasilkan output berupa energi listrik dalam besaran tertentu untuk sejumlah input berupa bahan bakar dalam jumlah tertentu pula. Bila seluruh komponen PLTU memiliki efisiensi yang tinggi, maka unjuk kerja (*performance*) PLTU tersebut dikatakan tinggi sehingga biaya operasi PLTU juga menjadi rendah. Seandainya karena suatu sebab unjuk kerja PLTU turun, berarti PLTU memerlukan lebih banyak bahan bakar untuk menghasilkan output energi listrik sesuai desain. Akibatnya biaya operasi menjadi semakin tinggi. Umumnya PLTU hanya mampu mengubah sekitar 35% dari energi input dalam bahan bakar menjadi energi listrik. Sisa energi lainnya berubah menjadi kerugian-kerugian (*losses*) yang terjadi pada berbagai tahapan proses transformasi energi.

Audit energi

Audit energi dilakukan dengan cara yang berbeda untuk objek yang berbeda. Cakupan audit energi, kompleksitas perhitungan, dan tingkat evaluasi ekonomi adalah semua masalah yang dapat ditangani secara berbeda oleh masing-masing auditor dan harus ditentukan sebelum memulai aktivitas audit. Audit energi secara sederhana dapat diartikan sebagai proses untuk mengevaluasi di mana bangunan atau pabrik dalam menggunakan energi sehari harinya dan mengidentifikasi peluang untuk mengurangi konsumsi pemakaiannya [34]

Audit energi berhubungan langsung dengan biaya audit, berapa banyak data yang akan dikumpulkan dan dianalisis serta jumlah peluang konservasi yang teridentifikasi. Dengan demikian, perbedaan antara biaya audit yang menentukan jenis audit yang akan dilakukan. Perbedaan kedua dibuat antara jenis fasilitas. Sebagai contoh, audit bangunan mungkin menekankan persyaratan selubung bangunan, pencahayaan, pemanasan, dan ventilasi. Di sisi lain, audit pabrik industri menekankan pada scope proses pemakaian energi.

Akibat adanya perubahan di dalam pasar energi saat ini peran audit energi telah berkembang pesat. Ada kebutuhan yang meningkat dalam dunia bisnis dan industri untuk mengelola penggunaan energi secara lebih efektif. Mengurangi biaya operasional masih merupakan salah satu strategi yang paling efektif dan dapat dicapai untuk menurunkan biaya produksi.

Saat ini, banyak konsumen energi besar yang mengontrak penyedia layanan energi untuk mengimplementasikan proyek energi. Pengaturan ini memerlukan penetapan penggunaan energi dasar serta penghitungan penghematan yang dihasilkan dari pelaksanaan proyek. Audit energi yang akurat dan lengkap sangat penting sebagai sarana untuk menilai dan memverifikasi keberhasilan proyek dalam memenuhi tujuan yang dikontrak.

Berdasarkan derajat Analisa dari audit energi maka dibagi menjadi 3 jenis yakni:

1. *Walk-through* audi (level 1):

Audit walk-through, seperti yang tersirat dari namanya, maka pada level ini adalah audit energi untuk memeriksa secara visual setiap sistem yang menggunakan energi. Hal ini biasanya akan mencakup evaluasi data konsumsi penggunaan energi untuk menganalisis kuantitas dan pola penggunaan energi serta memberikan perbandingan dengan rata-rata industri atau tolok ukur untuk fasilitas yang serupa. Level ini adalah audit energi yang paling murah tetapi dapat menghasilkan perkiraan awal potensi penghematan dan memberikan daftar peluang penghematan biaya rendah melalui perbaikan dalam operasional dan pemeliharaan suatu sistem. Audit tingkat satu juga merupakan peluang untuk mengumpulkan informasi untuk audit yang lebih rinci di kemudian hari jika potensi penghematan awal dirasa perlu untuk melakukan audit energi yang lebih details.

2. *Standart Audit* (Level 2):

Audit standar melanjutkan untuk menghitung penggunaan dan kehilangan energi melalui tinjauan dan analisis yang lebih rinci terhadap peralatan, sistem, dan karakteristik operasional. Analisis ini juga dapat mencakup beberapa pengukuran dan pengujian di lokasi untuk menghitung penggunaan energi dan efisiensi berbagai sistem. Kalkulasi teknik energi standar digunakan untuk menganalisis efisiensi dan menghitung penghematan energi dan

biaya berdasarkan perbaikan dan perubahan pada setiap sistem. Audit standar juga akan mencakup analisis ekonomi dari langkah-langkah konservasi yang direkomendasikan [34].

3. *Computer simulation* (level 3)

Audit energi tingkat tiga akan mencakup penggunaan energi per fungsi yang lebih rinci dan evaluasi pola penggunaan energi yang lebih menyeluruh. Ini dicapai melalui penggunaan perangkat lunak simulasi komputer. Auditor akan mengembangkan simulasi komputer dari sistem bangunan yang akan menghitung cuaca dan variabel lain serta memprediksi penggunaan energi sepanjang tahun. Tujuan auditor adalah untuk membangun dasar perbandingan yang konsisten dengan konsumsi energi sebenarnya dari fasilitas tersebut. Setelah baseline ini dibangun, auditor selanjutnya akan melakukan perubahan untuk meningkatkan efisiensi berbagai sistem dan mengukur pengaruhnya dibandingkan dengan baseline tersebut. Metode ini juga memperhitungkan interaksi antara sistem untuk membantu mencegah estimasi penghematan yang berlebihan. Karena waktu yang dibutuhkan untuk mengumpulkan informasi peralatan yang terperinci, data operasional, dan menyiapkan model komputer yang akurat, ini adalah tingkat audit energi yang paling mahal, tetapi dapat dibenarkan jika fasilitas atau sistem bersifat lebih kompleks.

Listrik Pemakaian Sendiri

Generator merupakan peralatan yang berfungsi untuk mengkonversi energi mekanik menjadi energi listrik. Energi mekanik dihasilkan oleh panas, air, uap, dll sedangkan Energi listrik dihasilkan oleh generator bisa berupa Listrik AC (listrik bolak-balik) maupun Listrik DC (listrik searah). Hal ini bergantung dari design generator yang digunakan pada pembangkit tenaga listrik. Generator sangat berkaitan erat dengan hukum faraday. Hukum faraday mengatakan “bahwa apabila ada sepotong kawat penghantar listrik berada dalam medan magnet berubah-ubah, maka dalam kawat tersebut akan terbentuk Gaya Gerak Listrik ”

Beberapa energi listrik yang dihasilkan oleh generator PLTU akan digunakan untuk menggerakkan motor-motor yang ada pada pembangkit melalui Auxiliary Transformer, kebutuhan listrik tersebut dikenal juga sebagai listrik pemakaian sendiri. Listrik pemakaian sendiri dikategorikan ke dalam listrik pemakaian untuk unit dan untuk common. Listrik pemakaian untuk unit adalah daya yang digunakan untuk menggerakkan peralatan pada masing-masing unit sedangkan pemakaian listrik common adalah daya yang digunakan untuk menjalankan alat bantu umum dan peralatan lainnya [35]

Perhitungan daya pemakaian sendiri dapat ditunjukkan dengan persamaan berikut ini

$$P_{neto} = P_{gen} - P_{aux} - GT_{loss} - UAT_{loss} \dots\dots\dots(1)$$

Dengan

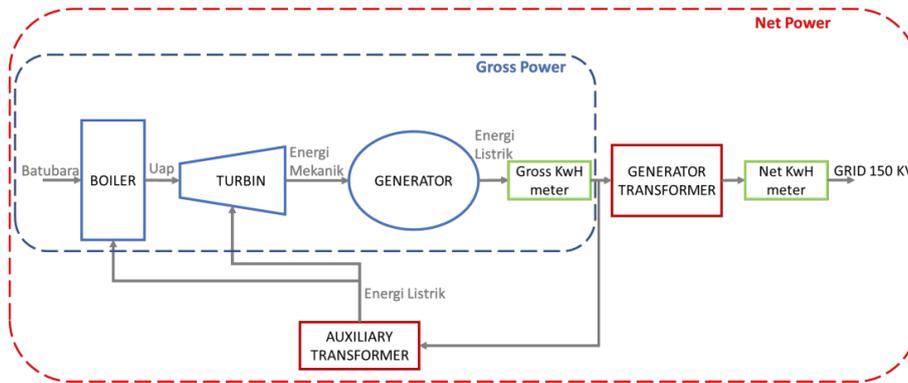
P_{neto} : daya neto pembangkit (kW)

P_{gen} : daya generator (kW)

P_{aux} : daya pemakaian sendiri (kW)

GT_{loss} : kerugian GT (kW)

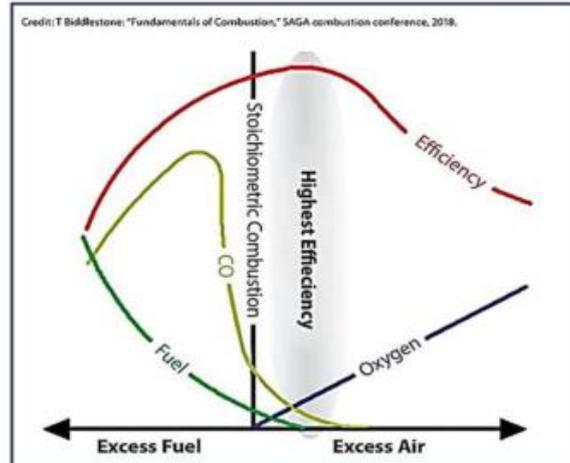
UAT_{loss} : kerugian UAT (kW)



Gambar 12. Skema Daya Neto dan Daya Gross Power Plant [36]

Analisa Efisiensi Boiler

Efisiensi Boiler merupakan perbandingan antara energi termal yang dihasilkan oleh boiler dengan energi yang dimiliki oleh bahan bakar boiler. Ada 2 metode untuk menganalisis efisiensi boiler yakni dengan metode tidak langsung dan metode langsung. Efisiensi boiler merupakan parameter yang menunjukkan korelasi antara supply energi masuk ke dalam boiler dengan energi keluaran yang diproduksi oleh boiler. Efisiensi Pembakaran Boiler secara umum menunjukkan kemampuan sebuah boiler untuk membakar keseluruhan bahan bakar yang masuk ke dalam ruang bakar boiler. Efisiensi boiler diperoleh dari jumlah bahan bakar yang tidak terbakar bersamaan dengan jumlah udara sisa pembakaran. Pembakaran boiler dapat dikatakan efisien jika tidak ada bahan bakar yang tersisa di ujung keluaran ruang bakar boiler, begitu pula dengan jumlah udara sisa [37]



Gambar 13. Efisiensi Thermal Boiler

Sumber : (<https://artikel-teknologi.com/cara-menghitung-efisiensi-boiler/> ,2023)

I.1.6. Efisiensi Boiler Metode Langsung

Metode langsung (dikenal juga sebagai metode input-output) membandingkan antara perolehan energi dari fluida kerja (air dan uap) dengan kandungan energi bahan bakar, yang hanya membutuhkan keluaran panas (uap) dan input panas (yaitu bahan bakar) untuk mengevaluasi efisiensi. Efisiensi ini didefinisikan sebagai rasio keluaran panas dengan masukan panas. Efisiensi Ini juga didefinisikan sebagai rasio penambahan panas uap terhadap panas kotor bahan bakar. Pengukuran input panas untuk bahan bakar batubara membutuhkan nilai kalor bahan bakar dan laju alirannya dalam hal massa. Ada kebutuhan untuk menyiapkan peralatan besar di lantai ruang ketel. Selama pengujian, sampel disimpan dalam kantong tertutup dikirim ke laboratorium untuk analisis dan evaluasi nilai kalor. Masalah ini dapat disederhanakan dengan memasang hopper di atas boiler pada load cell terkalibrasi [38]. Ada beberapa metode untuk mengukur output panas. Pengukuran output panas membutuhkan flow meter untuk mencatat tingkat pembangkitan uap. Efisiensi ketel uap (η_d) didefinisikan sebagai :

$$\eta_d = \frac{(m_{MS} \cdot h_{MS}) + (m_{MU} \cdot h_{MU}) - (m_{FW} \cdot h_{FW}) - (m_{SHS} \cdot h_{SHS})}{mf \times HHV} \times 100\% \dots\dots\dots (2)$$

dimana :

m_{MS} : laju aliran massa main steam (t/h)

h_{MS} : entalpi main steam (kCal/kg)

mMU : laju aliran massa make-up water (t/h)

hMU : entalpi make-upwater (kCal/kg)

mFW : laju aliran massa feedwater (t/h)

hFW : entalpi feedwater (kCal/kg)

Mshs : laju aliran massa spray superheater (t/h)

hSHS : entalpi spray superheater (kCal/kg)

mf : laju aliran massa bahan bakar (t/h)

HHV : High Heating Value bahan bakar (kCal/kg)

Metode langsung merupakan cara yang paling cepat dan mudah untuk menghitung efisiensi boiler. Dalam metode ini, persentase keluaran panas total dikomparasikan dengan panas input dihitung untuk mengetahui nilai efisiensi boiler. Dimana perolehan energi fluida kerja (air dan uap) dibandingkan dengan kandungan energi bahan bakar boiler. Metode ini juga dikenal sebagai metode input-output, karena metode ini hanya membutuhkan keluaran energi uap dan masukan panas bahan bakar untuk menghitung efisiensi boiler. Pengukuran masukan panas membutuhkan data nilai kalori bahan bakar dan laju aliran bahan bakar dalam satuan massa atau volume, sesuai dengan sifat bahan bakar [39]

I.1.7. Efisiensi Boiler Metode Tidak Langsung

Perhitungan efisiensi dengan metode tidak langsung dapat didefinisikan, efisiensi merupakan perbedaan antara energi yang hilang dan masukan energi. Dalam metode perhitungan efisiensi tidak langsung, efisiensi dapat diukur dengan mudah dengan mengukur semua kerugian yang terjadi pada boiler dengan menggunakan prinsip-prinsip heat loss balance. Kelemahan metode langsung dapat diatasi dengan metode ini, yang menghitung berbagai kehilangan panas yang terkait dengan boiler. Efisiensi boiler dapat diperoleh dengan mengurangi persentase kehilangan panas dari 100%. Keuntungan penting dari metode ini adalah bahwa kesalahan dalam pengukuran tidak membuat perubahan efisiensi yang signifikan. Metode tidak langsung tidak memperhitungkan kerugian Siaga, kerugian Blow down, kerugian energi pada *sootblow*, dan kerugian energi yang menjalankan peralatan bantu

seperti *burner, fan*, dan pompa [40] Kerugian yang valid termasuk ke boiler berbahan bakar batubara:

$$n(\%) = 100 - (L1 + L2 + L3 + L4 + L5 + L6 + L7 + L8 + L9 + L10) \dots\dots\dots (3)$$

1. kerugian panas pada gas buang kering seperti panas sensible (L1).
2. kerugian panas karena adanya kandungan air pada batubara (L2).
3. kerugian panas karena adanya kandungan hydrogen pada batubara (L3).
4. kerugian panas karena adanya kandungan air pada udara pembakaran (L4).
5. kerugian panas karena adanya carbon yang tidak terbakar (L5).
6. kerugian panas karena panas seninsible pada *bottom ash* (L6).
7. kerugian panas karena panas seninsible pada *fly ash* (L7).
8. kerugian panas karena radiasi dan konvensi pada permukaan boiler , nilainya sudah ditetapkan oleh pabrikan boiler (L8)

Perhitungan kerugian panas karena gas buang kering menggunakan persamaan 4.

$$L1 (\%) = \frac{HDFgLvCr \times MFrDFg}{HHV} * 100 \dots\dots\dots (4)$$

Dengan :

HDFgLvCr : Entalpi gas kering keluar dari air pre heater (tidak termasuk kebocoran udara pada air pre heater) (kJ/kg)

MFrDFg : Massa gas kering keluar dari boiler (kg/kg-bahan bakar)

HHV : High Heating Value batubara (kJ/kg-bahan bakar)

Perhitungan kerugian panas karena kadar air dalam batubara menggunakan persamaan 5.

$$L2 (\%) = \frac{MFrWF * (HstLvCr - Hw)}{HHV} * 100 \dots\dots\dots 5)$$

Dengan :

- MFrWF : kandungan air pada batubara (kg/kg- bahan bakar)
- HStLvCr : entalpi uap (penguapan air) keluar dari air pre heater (tidak termasuk kebocoran udara pada air pre heater) pada 1 psia (kJ/kg)
- HW : entalpi air pada temperature udara refrensi 33°C (kJ/kg)
- HHV : High Heating Value batubara (kJ/kg- bahan bakar)

Perhitungan kerugian panas karena kadar hidrogen pada batubara menggunakan persamaan 6.

$$L3 (\%) = \frac{MfrWH2F \times (HstLvCr - Hw)}{HHV} * 100 \dots\dots\dots (6)$$

(6)

Dengan:

- MfrWH2F : kandungan air dari pembakaran hidrogen pada batubara(kg/kg-bahan bakar)
- HStLvCr : entalpi uap (penguapan air) keluar dari air pre heater (tidak termasuk kebocoran udara pada air pre heater) pada 1 psia (kJ/kg)
- HW : entalpi air pada temperature udara refrensi 33°C (kJ/kg)
- HHV : High Heating Value batubara (kJ/kg- bahan bakar)

Perhitungan kerugian panas kadar air dalam udara pembakaran menggunakan persamaan 7.

$$L4 (\%) = \frac{MFrWA * HWvLvCr}{HHV} * 100 \dots\dots\dots (7)$$

Dengan ;

- MFrWA : kandungan air pada udara (kg/kg-bahan bakar)
- HWvLvCr : entalpi dari uap air saat keluar dari air pre heater tanpa kebocoran udara (kJ/kg)
- HHV : High Heating Value batubara (kJ/kg-bahan bakar)

Perhitungan kerugian panas karena karbon yang tidak terbakar dalam batubara menggunakan persamaan 8.

$$L5 (\%) = MpUbC \times \frac{HHVCRs}{HHV} \times 100 \dots\dots\dots (8)$$

Dengan

- MpUbC : karbon tidak terbakar pada batubara, % mass

HHVCRs : heating value dari karbon yang dihasilkan sebagai residusebesar 33.700 kJ/kg

HHV : High Heating Value batubara (kJ/kg-bahan bakar)

Perhitungan kerugian panas karena panas sensibel pada bottom ash menggunakan persamaan 9.

$$L6 (\%) = xUcb * \frac{xUcb+MFrR+Hcba}{HHV} * 100 \dots\dots\dots (9)$$

Dengan

xUcb : rasio bottom ash terhadap total ash

MFrR : massa residu abu hasil pembakaran (kg/kg-fuel)

Hcba : entalpi bottom ash (kJ/kg)

HHV : High Heating Value batubara (kJ/kg-fuel)

Perhitungan kerugian panas karena panas sensibel pada fly ash menggunakan persamaan 10.

$$L7 (\%) = xUcf * \frac{xUcf+MFrR+Hcfa}{HHV} * 100 \dots\dots\dots (10)$$

Dengan

xUcf : rasio fly ash terhadap total ash

MFrR : massa residu abu hasil pembakaran (kg/kg-fuel)

Hcfa : entalpi fly ash (kJ/kg)

HHV : High Heating Value batubara (kJ/kg-fuel)

Analisa Turbine Heat Rate

Turbine heat rate merupakan akumulasi kalor yang dibutuhkan untuk menghasilkan energi listrik sebesar 1 kWh dan dinyatakan dalam satuan Kcal/kWh. Turbin heat rate adalah perbandingan dari energi total yang dibutuhkan untuk menggerakkan turbin dengan energi listrik yang diproduksi oleh generator [41].

Perhitungan *Turbine Heat Rate* ada 2 basis, yakni dengan memakai basis daya gross dan daya netto pada pembangkit listrik. *Gross Turbine Heat Rate* (GTHR) merupakan jumlah energi yang dibutuhkan generator dan turbin untuk memproduksi satu kWh listrik

gross. Beberapa dari daya listrik yang diproduksi oleh generator dipakai untuk memberikan energi kepada motor-motor yang ada di suatu pembangkit. Energi listrik yang dibutuhkan untuk menggerakkan motor-motor tersebut disebut sebagai daya pemakaian sendiri. Daya netto dari suatu pembangkit merupakan perbedaan antara daya generator dikurangi dengan daya pemakaian sendiri. *Net Turbine Heat Rate* (NTHR) merupakan jumlah energi yang dibutuhkan generator dan turbin untuk memproduksi satu kWh listrik netto. GTHR dan NTHR adalah indikator utama yang merepresentasikan proses konversi energi pada siklus air dan uap di suatu pembangkit listrik [36]. Perhitungan GTHR menggunakan persamaan 11, sedangkan perhitungan NTHR menggunakan persamaan 12.

$$GTHR = \frac{(m_{MS} \cdot h_{MS}) + (m_{MU} \cdot h_{MU}) - (m_{FW} \cdot h_{FW}) - (m_{SHS} \cdot h_{SHS})}{P_g} \quad \text{-----}$$

.....(11)

$$NTHR = \frac{(m_{MS} \cdot h_{MS}) + (m_{MU} \cdot h_{MU}) - (m_{FW} \cdot h_{FW}) - (m_{SHS} \cdot h_{SHS})}{P_g - P_{aux}} \quad \text{-----}$$

.....(12)

Dengan ;

m_{MS} : laju aliran massa main steam (t/h)

h_{MS} : entalpi main steam (kCal/kg)

m_{MU} : laju aliran massa make-up water (t/h)

h_{MU} : entalpi make-upwater (kCal/kg)

m_{FW} : laju aliran massa feedwater (t/h)

h_{FW} : entalpi feedwater (kCal/kg)

m_{SHS} : laju aliran massa spray superheater (t/h)

h_{SHS} : entalpi spray superheater (kCal/kg)

P_g : daya generator (kW)

P_{aux} : daya pemakaian sendiri (kW)

Analisa Plant Heat Rate

Kebutuhan energi untuk memproduksi 1 kWh energi listrik merupakan pengertian dari Plant heat rate. Nilai ini merupakan salah satu parameter utama bagaimana efisiensi di suatu unit pembangkit listrik. Apabila nilai *plant heat rate* lebih tinggi maka unit tersebut semakin tidak efisien. Selain itu nilai plant heat rate dapat mencerminkan Kesehatan sebuah unit pembangkit listrik. Perhitungan plant heat rate ada 2 metode yakni dengan menggunakan

data daya *gross* dan daya *net*. Kebutuhan energi untuk memproduksi 1 kwh energi listrik *gross* adalah pengertian dari GPHR, sedangkan kebutuhan energi untuk memproduksi 1 kwh energi listrik net adalah pengertian dari NPHR. Perhitungan plant heat rate menggunakan 2 metode yakni metode input output dan metode kesetimbangan energi [42]

Nilai plant heat rate diperoleh dengan metode langsung didapatkan dari penjumlahan energi bahan bakar yang masuk ke boiler dibagi dengan daya neto pembangkit. Perhitungan GPHR dengan metode langsung menggunakan persamaan 13, msedangkan perhitungan NPHR dengan metode langsung menggunakan persamaan 14.

$$GPHR \text{ (kCal/kWh)} = \frac{mf \times HHV}{P_g} \dots\dots\dots(13)$$

$$NPHR \text{ (kCal/kWh)} = \frac{mf \times HHV}{P_g - P_{aux}} \dots\dots\dots(14)$$

Dengan

mf : laju aliran massa bahan bakar (t/h)

HHV : High Heating Value bahan bakar (kCal/kg)

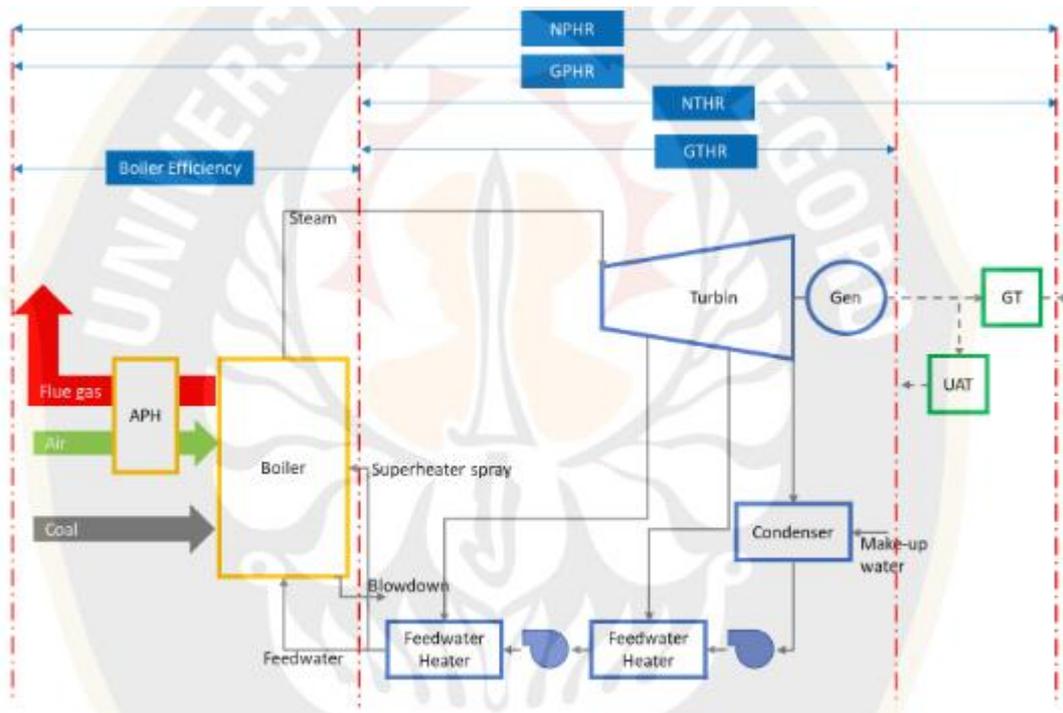
Pg : daya generator (kW)

Paux : daya pemakaian sendiri (kW)

Kalkulasi nilai plant heat rate dengan metode kesetimbangan energi didapatkan dari turbine heat rate dibagi boiler efisiensi dengan metode kerugian panas. Perhitungan GPHR dengan metode kesetimbangan energi menggunakan persamaan 15, sedangkan untuk kalkulasi NPHR dengan metode kesetimbangan energi menggunakan persamaan 16.

$$GPHR \text{ (kCal/kWh)} = \frac{GTHR}{\text{Efisiensi Boiler dengan metode kerugian panas}} \dots\dots\dots(15)$$

$$NPHR \text{ (kCal/kWh)} = \frac{NTHR}{\text{Efisiensi Boiler dengan metode kerugian panas}} \dots\dots\dots(16)$$



Gambar 14. Ruang Lingkup Perhitungan NPHR dan GPHR Serta Efisiensi Boiler [36]

Tabel II.1 Nilai NPHR Sebelum Dilakukan Overhaul

	nilai kalor hhv kcal/kg	beban MW	power gross kW	power netto kW	power UAT kW	efisiensi boiler %	konsumsi bb kg/jam	THR kcal/kg	GPHR IO kcal/kwh	NPHR IO kcal/kwh	GPHR HHV kcal/kwh	NPHR HHV kcal/kwh
1	4.022	12,5	12.650	10.550	2.100	84,95	12.420	2831,91	3948,87	4734,9	3333,8	3993,16
2	4.121	18	17.750	15.450	2.300	85,48	16.295	2809,2	3783,19	4346,39	3286,21	3773,98
3	4.038	25	24.450	21.775	2.675	84,53	21.702	2738,62	3584,24	4024,56	3239,97	3638,28

Perubahan Parameter Operasi dan Kinerja Peralatan Utama Terhadap NPHR

Perusahaan pembuat pembangkit listrik tidak mengeluarkan kurva koreksi NPHR untuk semua parameter operasi pembangkit, oleh karena itu perlu adanya referensi lain untuk mengetahui perubahan parameter operasi dan kinerja peralatan utama yang tidak disediakan kurva koreksi NPHR oleh pabrikan. Southern Company telah melakukan penelitian tentang perubahan berbagai parameter operasi pembangkit dan kinerja peralatan utama pada PLTU terhadap NPHR. Hasil studi tersebut dapat digunakan apabila data kurva koreksi NPHR tidak disediakan pabrikan. Faktor perubahan NPHR akibat perubahan nilai parameter operasi dan kinerja peralatan utama PLTU terlihat pada tabel 2.1.

Tabel II.2 Faktor Perubahan NPHR Akibat Perubahan Nilai Parameter Operasi (Southern Company, 2004)

No	Parameter	Factor	
		Change	% HR
A OPERATOR CONTROLLABLE			
1	Flue Gas outlet APH, °C	5,55	0,350
2	O ₂ in APH, %	1,00	0,290
3	Main Steam Temperature, °C	5,55	-0,150
4	Main Steam Pressure, bar	0,69	-0,040
5	Water spray to DeSH, % of MS Flow	1,00	0,025
B BOILER PERFORMANCE			
1	Air Heater Leakage , (%)	1,00	0,050
2	Air Heater Effectiveness , (%)	1,00	-0,150
3	FDI Inlet temperature, °C	5,55	-0,050
4	Mill Air Outlet temperature, °C	5,55	-0,040
5	Unburn Carbon, %	1,00	1,000
C TURBINE PERFORMANCE			
1	HP Turbine Efficiency, %	1,00	-0,60
2	LP Turbine Efficiency, %	1,00	-0,450
3	Final Temperature FW Heater, °C	2,52	-0,100
4	Condenser Vacuum, kPa	1,00	0,800
5	TTD HPH 1, °C	2,52	0,100
6	TTD HPH 2, °C	2,52	0,030
7	TTD HPH 3, °C	2,52	0,030
8	TTD LPH 5, °C	2,52	0,030
9	TTD LPH 6, °C	2,52	0,030
10	TTD LPH 7, °C	2,52	0,030
11	DCA HPH 1, °C	0,56	0,005
12	DCA HPH 2, °C	0,56	0,005
13	DCA HPH 3, °C	0,56	0,005
14	DCA LPH 5, °C	0,56	0,005
15	DCA LPH 6, °C	0,56	0,005
16	DCA LPH 7, °C	0,56	0,005
D COAL QUALITY			
1	Moisture in Fuel (%)	1,00	0,170
2	H in Fuel (%)	1,00	1,200
E OTHER			
1	Auxiliary Power, %	1,00	1,000
2	Make Up Water, % of MS Flow	1	0,370

Analisis Tekno Ekonomi

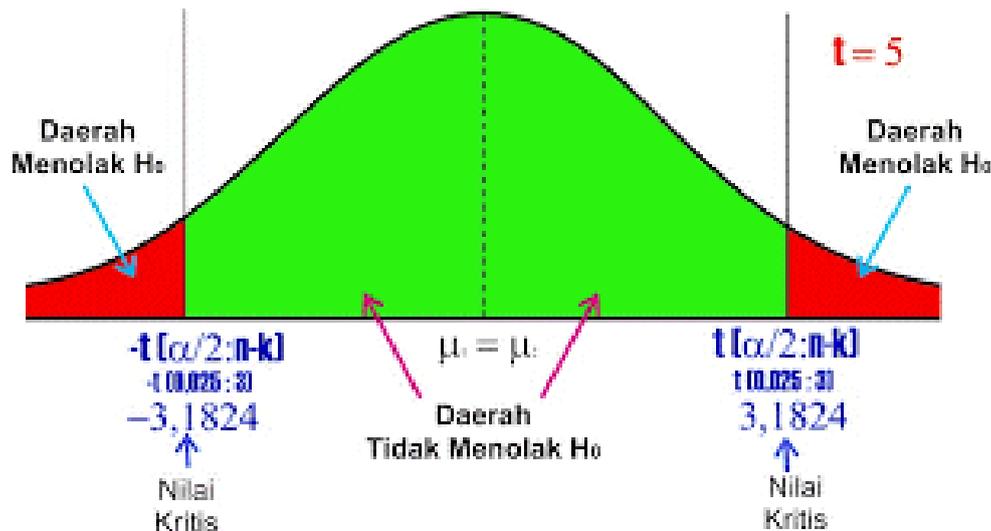
Tekno ekonomi merupakan suatu ilmu pengetahuan yang berorientasi pada pengungkapan dan perhitungan nilai-nilai ekonomi yang terkandung dalam suatu rencana kegiatan Teknik Analisis tekno ekonomi dibutuhkan guna mendapatkan informasi aspek teknis, teknologi dan aspek finansial pada kegiatan *overhaul*. Analisis tekno ekonomi adalah metode untuk menganalisis kinerja ekonomi dari suatu usaha berdasarkan aspek teknis, teknologi dan keuangan [43].

Tabel II.3 Tabel Informasi Harga Pekerjaan Serious Inspection PLTU XYZ #2

NO	ITEM	VOL	SAT	HARGA (Rp)		
				HARGA SAT	JUMLAH	TOTAL
A	MANPOWER	1	Lot	510.200.000	510.200.000	510.200.000
B	AKOMODASI DAN TRANSPORTASI	1	Lot	523.450.000	523.450.000	523.450.000
C	SEWA TOOLS	1	Lot	60.000.000	60.000.000	60.000.000
	1 General Tools	1	Lot			
	2 Sewa Tenda	1	Lot			
	3 Sewa Toilet	1	Lot			
	4 Purifier Trafo					
D	JASA LAINNYA	1	Lot			4.823.867.000
E	MATERIAL	1	lot			6.543.934.960
F	CONSUMABLE MATERIAL					
	1 Consumable	1	Lot	74.439.200	74.439.200	74.439.200
	2 LK3	1	Lot	15.898.000	15.898.000	15.898.000
G	ADMINISTRASI					
	1 Pengurusan Adminstrasi dan pembuatan laporan	1	Lot	10.000.000	10.000.000	10.000.000
Terbilang : <i>Empat belas milyar sembilan ratus juta tiga puluh ribu seratus dua puluh depan rupiah</i>				Jumlah		13.518.233.320
				PPN 11%		1.381.796.808
				Total		14.900.030.128

Uji T

Uji t dilakukan untuk menguji hipotesis penelitian mengenai pengaruh dari masing-masing variabel bebas secara parsial terhadap variabel terikat. Uji T (Test T) adalah salah satu test statistik yang dipergunakan untuk menguji kebenaran atau kepalsuan hipotesis yang menyatakan bahwa diantara dua buah mean sampel yang diambil secara random dari populasi yang sama, tidak terdapat perbedaan yang signifikan (Sudjiono, 2010). T-statistics merupakan suatu nilai yang digunakan guna melihat tingkat signifikansi pada pengujian hipotesis dengan cara mencari nilai T-statistics melalui prosedur bootstrapping. Pada pengujian hipotesis dapat dikatakan signifikan ketika nilai T-statistics lebih besar dari 1,96, sedangkan jika nilai T-statistics kurang dari 1,96 maka dianggap tidak signifikan (Ghozali, 2016).



Gambar 15. Uji T

Sumber : (<https://accounting.binus.ac.id/2021/08/12/memahami-uji-t-dalam-regresi-linear/> , 2021)

Pengambilan keputusan dilakukan dengan melihat nilai signifikansi pada tabel Coefficients. Biasanya dasar pengujian hasil regresi dilakukan dengan tingkat kepercayaan sebesar 95% atau dengan taraf signifikannya sebesar 5% ($\alpha = 0,05$). Adapun kriteria dari uji statistik t :

Jika nilai signifikansi uji $t > 0,05$ maka H_0 diterima dan H_a ditolak. Artinya tidak ada pengaruh antara variabel independen terhadap variabel dependen. Jika nilai signifikansi uji $t < 0,05$ maka H_0 ditolak dan H_a diterima. Artinya terdapat pengaruh antara variabel independen terhadap variabel dependen.

Pada penelitian ini akan dilakukan uji t sampel berpasangan yang bertujuan untuk mengetahui apakah sebelum dan sesudah *overhaul* terjadi perubahan yang signifikan terhadap parameter yang mempengaruhi berubahnya nilai NPHR.

II.15 Analisis Air Heater Performance

Pada Air heater PLTU Amurang terdapat kebocoran pada tube air heater sehingga efisiensi boiler menjadi menurun nilainya. Udara luar yang masuk pada sisi inlet air heater akan menyebabkan nilai temperature flue gas menjadi turun sehingga perlu dilakukan perbaikan agar nilai efisiensi boiler menjadi normal Kembali.

Air heater leakage (AHL) merupakan persentase banyaknya flue gas yang masuk kedalam air heater. Perhitungan nilai AHL memakai persamaan 17

$$\text{Air heater leakage (AHL \%)} = \frac{O_2 \text{ outlet} - O_2 \text{ inlet}}{20,9 - O_2 \text{ outlet}} \times 90 \dots\dots\dots$$

(17)

Dengan :

Oksigen outlet : persentase oksigen yang terdapat pada flue gas outlet air heater (%)

Oksigen inlet : persentase oksigen yang terdapat pada inlet air heater (%)

Sesudah nilai Air heater leakage diketahui maka Langkah selanjutnya adalah menghitung temperature flue gas outlet air heater setelah mengetahui nilai koreksi kebocoran udara pada persamaan 18.

$$T_{gnl} \text{ (Deg C)} = \frac{AHL \times (T_{gl} - T_{ref})}{100\%} \times T_{gl} \dots\dots\dots$$

(18)

Dengan :

T_{gnl} : flue gas temperature outlet Air heater pasca koreksi kebocoran udara (deg C)

T_{gl} : flue gas temperature outl air heater hasil pengukuran (deg C)

AHL : persentase tingkat kebocoran udara pada air heater (%)

T_{ref} : Temperature udara inlet air heater (deg C)

Sesudah nilai temperature flue gas outlet air heater sesudah dikoreksi kebocoran udara maka Langkah berikutnya adalah menghitung nilai air heater effectiveness menggunakan persamaan 19

$$\text{Air heater effectiveness (\%)} = \frac{T_{gi} - T_{gnl}}{T_{gi} - T_{ref}} \times 100\% \dots\dots\dots$$

(19)

Dengan :

T_{gi} : inlet flue gas temperature air heater (deg C)

T_{gnl} : outlet flue gas temperature air heater (deg C)

T_{ref} : Temperature udara masuk air heater (deg C)

Kenaikan Biaya bahan bakar karena kenaikan heat rate

Kenaikan nilai NPHR pada suatu pembangkit listrik akan mengakibatkan naiknya nilai bahan bakar untuk menghasilkan jumlah daya listrik dengan neto yang sama. Nilai kenaikan biaya bahan bakar sangat dipengaruhi oleh nilai NPHR, harga rupiah batubara, nilai kalor batubara dan daya neto pada pembangkit listrik serta nilai capacity factor (CF) pembangkit. Perhitungan naiknya biaya bahan bakar pada pembangkit listrik selama 1 tahun menggunakan persamaan 20, sedangkan perhitungan kenaikan biaya bahan bakar karena naiknya nilai NPHR selama satu tahun menggunakan persamaan 21.

$$\text{Biaya bahan bakar} = \frac{\text{Harga batubara}}{\text{nilai kalor HHV batubara}} \times \text{NPHR} \times \text{DN} \times \text{CF} \times 8760 \dots\dots\dots$$

(20)

$$\Delta\text{Biaya bahan bakar} = \frac{\text{Harga batubara}}{\text{nilai kalor HHV batubara}} \times \Delta\text{NPHR} \times \text{DN} \times \text{CF} \times 8760 \dots\dots\dots$$

(21)

Dengan :

- Biaya batubara : biaya bahan bakar batubara (Rp/tahun)
- ΔBiaya batubara : biaya bahan bakar batubara (Rp/tahun)
- NPHR : nilai Net plant heat rate (kcal /kwh)
- ΔNPHR : selisih nilai Net plant heat rate (kcal /kwh)
- Harga batubara : harga batubara (Rp/kg)
- HHV batubara : nilai high heating value batubara (RP/kg)
- DN : daya neto pembangkit listrik (MW)
- Cf : CAPACITY FAKTOR (%)