

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Penelitian yang Relevan

Penelitian terdahulu merupakan bahan perbandingan dan acuan dalam membuat suatu penelitian terbaru. Adapun tujuannya adalah untuk menghindari adanya plagiasi serta memperbarui ilmu pengetahuan yang terus berkembang. Oleh sebab itu dalam tinjauan pustaka ini, peneliti mencantumkan beberapa hasil penelitian yang berkaitan dengan judul yang digunakan sebagai penelitian.

1. Eng, Riza, dan Tanujaya (2021) meneliti pengaruh rasio udara–bahan bakar (*air-fuel ratio*) terhadap distribusi temperatur pada boiler *pulverized coal* menggunakan simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Hasil penelitian menunjukkan bahwa perubahan AFR menyebabkan perubahan distribusi temperatur ruang bakar secara signifikan, yang selanjutnya memengaruhi pola perpindahan panas ke permukaan pemanas. Kondisi ini berpengaruh terhadap besarnya panas yang diserap fluida kerja dan efisiensi boiler. Penelitian ini menunjukkan bahwa pengaturan AFR dan kadar O₂ gas buang memiliki peran penting dalam menentukan kinerja termal boiler.
2. Saidur, Ahamed, dan Masjuki (2010) melakukan analisis energi dan eksergi pada boiler industri dan menyimpulkan bahwa kehilangan panas terbesar umumnya berasal dari gas buang dan *moisture* bahan bakar. Peningkatan kehilangan panas tersebut secara langsung menyebabkan penurunan efisiensi boiler. Hasil penelitian ini menegaskan bahwa kualitas bahan bakar dan kondisi pembakaran sangat menentukan besarnya heat loss dan kinerja boiler secara keseluruhan.
3. Zhang et al. (2015) meneliti pengaruh kualitas batubara terhadap efisiensi boiler pada pembangkit listrik tenaga uap subcritical. Hasil penelitian menunjukkan

bahwa penurunan nilai kalor (*Gross Calorific Value/GCV*) dan peningkatan kandungan moisture batubara menyebabkan meningkatnya konsumsi bahan bakar serta meningkatnya kehilangan panas akibat *moisture*. Kondisi tersebut mengakibatkan penurunan efisiensi boiler secara signifikan. Penelitian ini menunjukkan bahwa perubahan kualitas batubara merupakan faktor utama yang memengaruhi kinerja termal boiler.

4. Rayaprolu (2016) menyatakan bahwa penerapan *coal switching* dari batubara berkalori tinggi ke batubara berkalori lebih rendah menyebabkan perubahan karakteristik nyala api dan distribusi panas di dalam furnace. Apabila perubahan tersebut tidak diikuti dengan penyesuaian sistem pembakaran, maka pembakaran dapat menjadi kurang sempurna, yang ditandai dengan meningkatnya kandungan karbon tidak terbakar (*unburned carbon*) pada abu. Kondisi ini meningkatkan kehilangan panas akibat karbon tidak terbakar dan berkontribusi terhadap penurunan efisiensi boiler.
5. Ganapathy (2014) menjelaskan bahwa kenaikan temperatur gas buang dan kelebihan udara pembakaran (*excess air*) merupakan penyebab utama meningkatnya kehilangan panas melalui gas buang kering (*dry flue gas loss*). Semakin besar kadar O₂ gas buang dan temperatur gas buang, maka semakin besar fraksi panas yang terbangun ke lingkungan. Penelitian ini menegaskan bahwa pengendalian *excess air* dan optimasi proses perpindahan panas sangat penting untuk mempertahankan efisiensi boiler pada sistem pembakaran batubara.
6. Mubarok dan Nurhasanah (2024) meneliti pengaruh variasi nilai kalor batubara terhadap efisiensi boiler pada PLTU Bolok Unit 2 menggunakan metode tidak langsung (*indirect method*) berbasis komponen kehilangan panas (*heat loss*). Hasil penelitian menunjukkan bahwa perbedaan nilai kalor batubara menyebabkan perubahan nilai efisiensi boiler, di mana batubara dengan nilai kalor lebih rendah menghasilkan efisiensi yang lebih rendah. Analisis *heat loss*

menunjukkan bahwa kehilangan panas terbesar berasal dari *moisture* bahan bakar dan *moisture* hasil pembakaran hidrogen. Penelitian ini menegaskan bahwa variasi kualitas batubara, khususnya nilai kalor dan kandungan *moisture*, memiliki pengaruh signifikan terhadap kinerja termal boiler dan efisiensi pembakaran

Berdasarkan penelitian-penelitian tersebut, dapat disimpulkan bahwa penurunan nilai kalor batubara, peningkatan kandungan *moisture*, meningkatnya *excess air*, serta naiknya kandungan karbon tidak terbakar merupakan faktor-faktor utama yang menyebabkan peningkatan *heat loss* dan penurunan efisiensi boiler. Penelitian ini melengkapi kajian sebelumnya dengan menganalisis pengaruh *coal switching* dari *High Rank Coal* (HRC) ke dua variasi *Medium Rank Coal* (MRC-1 dan MRC-2) terhadap efisiensi boiler menggunakan metode langsung (*direct method*) dan metode tidak langsung (*indirect method*) berdasarkan komponen kehilangan panas (*heat loss*).

Table 1. Perbandingan Hasil Penelitian dengan Literatur

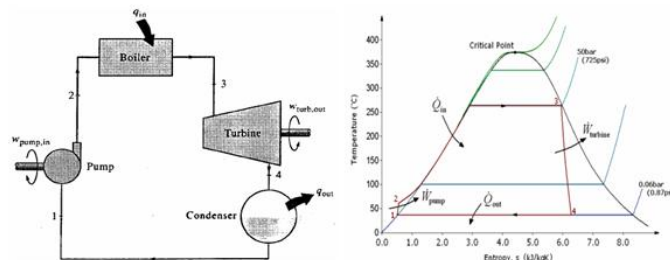
No	Peneliti & Tahun	Objek Penelitian	Metode	Variabel Utama	Temuan Utama	Kesesuaian dengan Penelitian Ini
1	Eng, Riza, dan Tanujaya (2021)	Boiler pulverized coal	Simulasi CFD	Air–Fuel Ratio (AFR), distribusi temperatur, O ₂ gas buang	Perubahan AFR menyebabkan perubahan distribusi temperatur furnace yang signifikan dan memengaruhi perpindahan panas ke permukaan pemanas. Pengaturan AFR dan O ₂ gas buang berperan penting dalam menentukan efisiensi boiler.	Relevan karena menunjukkan pengaruh AFR dan excess air terhadap distribusi panas dan efisiensi boiler, yang juga berpengaruh pada hasil efisiensi dalam penelitian ini.
2	Saidur, Ahamed, dan Masjuki (2010)	Boiler industri	Analisis energi dan eksergi	Gas buang, moisture bahan bakar, heat loss	Kehilangan panas terbesar berasal dari gas buang dan moisture bahan bakar. Peningkatan heat loss tersebut menyebabkan penurunan efisiensi boiler secara signifikan.	Relevan karena sama-sama menegaskan peran komponen heat loss dalam menentukan efisiensi boiler, khususnya akibat moisture dan gas buang.
3	Zhang et al. (2015)	PLTU subcritical	Analisis kinerja termal boiler	Nilai kalor (GCV), moisture batubara, konsumsi bahan bakar	Penurunan GCV dan peningkatan moisture menyebabkan konsumsi bahan bakar meningkat dan kehilangan panas akibat moisture bertambah, sehingga efisiensi boiler menurun.	Relevan karena membahas pengaruh kualitas batubara terhadap efisiensi boiler, sejalan dengan fokus penelitian ini pada coal switching.
4	Rayaprotu (2016)	Boiler PLTU batubara	Studi operasional dan evaluasi pembakaran	Coal switching, karakteristik nyala api, unburned carbon	Coal switching ke batubara berkalori lebih rendah mengubah karakteristik nyala api dan distribusi panas. Tanpa penyesuaian sistem pembakaran, karbon tidak terbakar meningkat dan efisiensi boiler menurun.	Relevan karena menjelaskan mekanisme penurunan efisiensi akibat coal switching melalui peningkatan karbon tidak terbakar.
5	Ganapathy (2014)	Boiler pembakaran batubara	Analisis kehilangan panas	Excess air, temperatur gas buang, dry flue gas loss	Kenaikan excess air dan temperatur gas buang meningkatkan dry flue gas loss. Semakin tinggi O ₂ gas buang, semakin besar panas yang terbuang sehingga efisiensi boiler menurun.	Relevan karena mendukung analisis L ₁ (gas buang kering) dalam penelitian ini sebagai penyebab penurunan efisiensi.
6	Mubarak & Nurhasanah (2024)	Boiler PLTU Blok Unit 2 (16,5 MW)	Metode tidak langsung (indirect method) berbasis heat loss	Nilai kalor batubara (GCV), moisture batubara, komponen heat loss	Variasi nilai kalor batubara menyebabkan perbedaan efisiensi boiler. Batubara dengan GCV lebih rendah dan moisture lebih tinggi menghasilkan efisiensi lebih rendah. Heat loss terbesar berasal dari moisture bahan bakar dan moisture hasil pembakaran hidrogen.	Relevan karena menggunakan metode tidak langsung dan menganalisis pengaruh kualitas batubara terhadap efisiensi boiler. Penelitian ini melengkapi dengan membandingkan HRC dan dua variasi MRC.
7	Penelitian ini (2026)	PLTU Ombilin Unit 1 (100 MW)	Direct & Indirect Methode (ASME PTC 4)	GCV, Moisture, O ₂ gas buang, LOI	Coal switching dari HRC ke MRC meningkatkan heat loss akibat moisture, excess air, dan karbon tidak terbakar sehingga menurunkan efisiensi boiler. Variasi kualitas dalam kelompok MRC mempengaruhi besar penurunan efisiensi	Memperkuat temuan literatur dengan studi kasus nyata pada PLTU Ombilin dan menunjukkan sensitivitas terhadap variasi kualitas MRC

2.2. Landasan Teori

Landasan teori pada penelitian ini mencakup sistem kerja PLTU dan boiler batubara, proses pembakaran batubara pada boiler *pulverized coal*, serta karakteristik batubara berdasarkan analisis *proximate* dan *ultimate* yang berpengaruh terhadap nilai kalor, kebutuhan udara pembakaran, dan kesempurnaan pembakaran. Selanjutnya dibahas konsep *Air Fuel Ratio* (AFR), *excess air*, serta keterkaitannya dengan parameter operasi seperti kadar O_2 gas buang dan temperatur gas buang yang digunakan dalam perhitungan kehilangan panas. Selain itu, landasan teori juga memuat prinsip perhitungan efisiensi boiler menggunakan metode langsung sebagai pembanding dan metode tidak langsung berdasarkan komponen kehilangan panas (L_1 – L_8) sesuai standar ASME PTC 4-1, serta peran sistem kontrol pembakaran di PLTU Ombilin dalam mempengaruhi besarnya *heat loss* dan efisiensi boiler.

2.2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU)

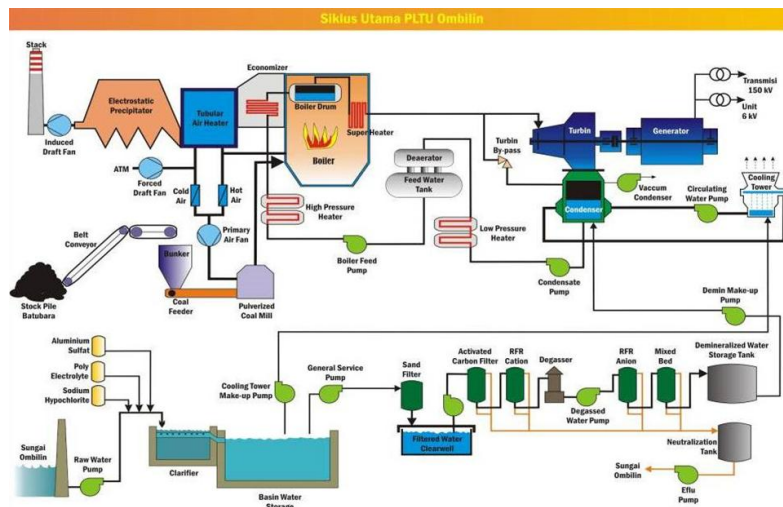
Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) merupakan pembangkit listrik yang memanfaatkan energi panas dari hasil pembakaran bahan bakar untuk menghasilkan uap. Uap tersebut digunakan untuk memutar turbin uap yang terhubung dengan generator sehingga menghasilkan energi listrik. Sistem kerja PLTU pada umumnya mengikuti siklus *Rankine*, yang terdiri dari beberapa tahapan utama, yaitu pemanasan air di boiler, ekspansi uap di turbin, kondensasi uap di kondensor, dan pemompaan kembali air umpan ke boiler.



Gambar 2. Siklus Rankine (Sumber: Çengel & Boles, *Thermodynamics: An Engineering Approach*, McGraw-Hill)

Pada tahap pertama, air umpan (*feedwater*) dipompa oleh pompa air umpan dari kondensor menuju boiler dengan tekanan yang lebih tinggi. Di dalam boiler, air tersebut dipanaskan oleh panas hasil pembakaran batubara hingga mencapai kondisi uap jenuh atau uap panas lanjut (*superheated steam*). Proses ini mengubah energi kimia bahan bakar menjadi energi panas, kemudian menjadi energi internal fluida kerja. Selanjutnya, uap bertekanan dan bertemperatur tinggi dialirkan menuju turbin uap. Di dalam turbin, energi panas dan tekanan uap diubah menjadi energi mekanik melalui proses ekspansi. Energi mekanik ini digunakan untuk memutar poros turbin yang terhubung langsung dengan generator, sehingga menghasilkan energi listrik.

Setelah keluar dari turbin, uap bekas turbin dialirkan menuju kondensor untuk mengalami proses kondensasi. Di dalam kondensor, uap didinginkan oleh air pendingin hingga berubah fase kembali menjadi air. Proses ini bertujuan untuk menurunkan tekanan uap di sisi keluar turbin agar efisiensi ekspansi meningkat, sekaligus mengembalikan fluida kerja ke bentuk cair. Air hasil kondensasi kemudian dikumpulkan di *hotwell* dan dipompa kembali menuju boiler melalui pompa air umpan. Dengan demikian, siklus kerja ini berlangsung secara terus-menerus membentuk suatu siklus tertutup yang dikenal sebagai siklus *Rankine*.



Gambar 3 Diagram Siklus Utama PLTU Ombilin

Kinerja PLTU sangat dipengaruhi oleh performa boiler karena boiler berfungsi sebagai pengubah energi kimia bahan bakar menjadi energi panas. Apabila efisiensi boiler menurun, maka konsumsi bahan bakar akan meningkat untuk menghasilkan daya listrik yang sama, sehingga kinerja pembangkit secara keseluruhan menjadi kurang optimal.

Komponen utama dalam sistem PLTU antara lain:

1. Boiler

Boiler merupakan salah satu peralatan utama pada PLTU, dimana terdapat beberapa komponen didalamnya, antara lain : *Furnace* (Ruang Bakar), *Cyclone* dan *Heat Recovery Area*. Fungsi Boiler adalah untuk menghasilkan uap dengan memanfaatkan energi panas yang diperoleh dari pembakaran bahan bakar batubara. Adapun Boiler memiliki beberapa tipe, diantaranya :

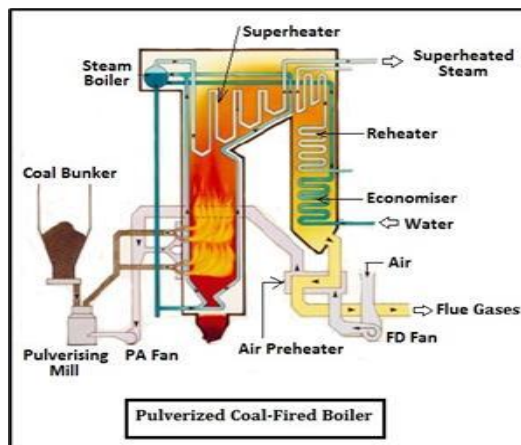
a. Boiler PC (*Pulverized Boiler*)

Boiler tipe *Pulverized Coal* (PC boiler) menggunakan batubara sebagai bahan bakar yang umumnya berasal dari kelompok *High Rank Coal* (HRC) maupun *Medium Rank Coal* (MRC). Sebelum dibakar di dalam ruang bakar (*furnace*), batubara terlebih dahulu digiling hingga menjadi serbuk halus menggunakan *pulverizer* atau *mill*. Proses penggilingan ini bertujuan untuk memperbesar luas permukaan batubara sehingga reaksi pembakaran dapat berlangsung lebih cepat dan lebih sempurna.

Di dalam *mill*, batubara tidak hanya digiling tetapi juga dikeringkan menggunakan udara panas yang berasal dari *air heater* atau gas buang boiler. Udara panas ini berfungsi mengurangi kandungan *moisture* dalam batubara sekaligus membawa serbuk batubara menuju *burner*. Campuran antara serbuk batubara dan udara primer kemudian dialirkan ke ruang bakar melalui burner dan disemprotkan ke dalam furnace dalam bentuk partikel-partikel halus.

Pembakaran batubara dalam bentuk serbuk memungkinkan terjadinya pembakaran yang lebih stabil dan merata karena setiap partikel batubara dapat

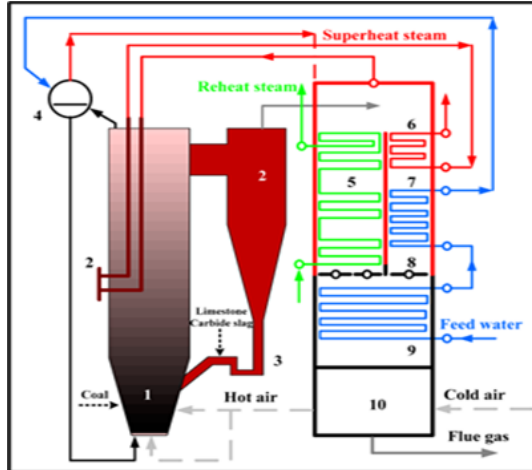
dengan mudah bereaksi dengan oksigen di udara. Dengan sistem ini, panas hasil pembakaran dapat didistribusikan secara lebih uniform di dalam *furnace* sehingga proses perpindahan panas ke pipa-pipa pemanas (*water wall*, *superheater*, *reheater*, dan *economizer*) dapat berlangsung secara efektif. Oleh karena itu, kualitas penggilingan batubara dan kesesuaian karakteristik batubara (HRC atau MRC) sangat mempengaruhi kestabilan pembakaran serta efisiensi boiler secara keseluruhan.



Gambar 4 Skema Boiler Tipe *Pulverized Coal* (Sumber: El-Wakil, *Powerplant Technology*)

b. Boiler CFB (*Circulating fluidized bed*)

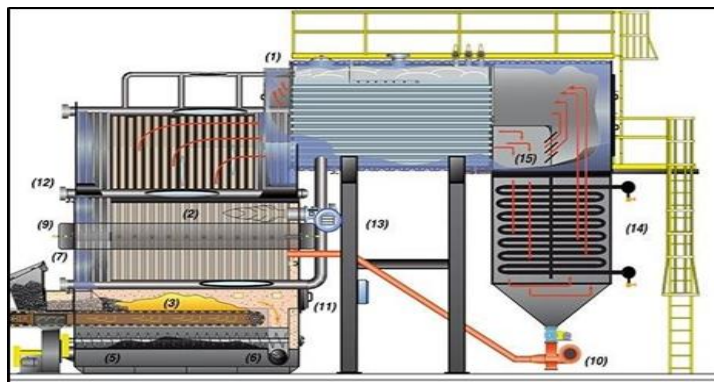
Boiler CFB ini menggunakan tumpukan (*bed*) partikel pasir dan silika yang diletakan di dalam ruang bakar sebagai media penyimpan energi panas yang memacu batubara untuk terus terbakar. Udara dengan tekanan dan kecepatan yang tinggi dihembuskan dari *nozzle* / *windcap* yang berada pada dasar ruang bakar. Udara inilah yang akan membuat bed (partikel pasir dan silika) dan bahan bakar terus bersirkulasi di dalam ruang bakar untuk mencapai efisiensi pembakaran yang baik. Dengan kualitas batubara *Low Rank Coal* atau *Medium Rank Coal*.



Gambar 5 Skema Boiler Tipe *Circulating Fluidized Bed* (Sumber: Diadaptasi dari Basu, *Circulating Fluidized Bed Boilers*)

c. Boiler *Stoker*

Boiler Stoker ini menggunakan *chain grate* sebagai tempat pembakaran bahan bakar yang umumnya berupa padatan. Udara panas ditiupkan dari bawah *chain grate* hingga bahan bakar terbakar. Boiler jenis ini dapat menggunakan bahan bakar batubara *low rank coal*, limbah kayu, ataupun sampah anorganik.



Gambar 6 Skema Boiler Tipe *Stoker* (Sumber: Diadaptasi dari Basu, *Circulating Fluidized Bed Boilers*, Springer)

Hal mendasar yang membedakan antara PC Boiler dan CFB Boiler serta *Stoker* Boiler adalah pada bentuk ruang bakarnya, kalau di Boiler CFB terdapat

tambahan berupa *cyclone* yang mana alat ini nantinya berguna untuk memisahkan bed material dan partikel batubara yang terbawa keluar furnace bersama *flue gas* untuk disirkulasikan kembali menuju furnace. Hal ini bertujuan untuk mengontrol *temperatur furnace*, meningkatkan efisiensi pembakaran, dan menjaga ketinggian *fluidized bed*

2. Turbin Uap

Turbin uap berfungsi mengonversi energi termal dan tekanan uap menjadi energi mekanik melalui proses ekspansi pada sudu-sudu turbin. Secara ideal, proses ekspansi uap mendekati proses *isentropik*, sehingga energi kinetik uap dapat dimanfaatkan secara maksimal untuk memutar rotor.

Daya yang dihasilkan turbin secara langsung bergantung pada laju aliran massa uap serta selisih entalpi antara uap masuk dan keluar turbin. Penurunan efisiensi boiler akan menurunkan kualitas uap (tekanan dan temperatur) atau meningkatkan konsumsi bahan bakar untuk mempertahankan kondisi uap yang sama. Dengan demikian, kinerja turbin uap sangat dipengaruhi oleh kemampuan boiler dalam menyediakan uap dengan kondisi termodinamika yang stabil.



Gambar 7 Turbin Uap PLTU Ombilin Unit 1

Apabila efisiensi boiler menurun akibat *coal switching*, maka energi panas yang tersedia untuk menghasilkan uap berkurang, sehingga kerja ekspansi turbin juga menurun atau membutuhkan suplai bahan bakar yang lebih besar untuk menghasilkan daya yang sama.

3. Generator

Generator berfungsi mengubah energi mekanik dari poros turbin uap menjadi energi listrik melalui prinsip induksi elektromagnetik. Putaran rotor generator yang digerakkan oleh turbin akan memotong garis-garis gaya magnet pada stator sehingga menghasilkan gaya gerak listrik (GGL). Daya listrik yang dihasilkan generator secara langsung bergantung pada daya mekanik yang disuplai oleh turbin serta efisiensi elektromekanis generator itu sendiri.



Gambar 8. Generator PLTU Ombilin Unit 1

Secara sistem, daya mekanik turbin merupakan hasil konversi energi termal uap yang diproduksi oleh boiler. Oleh karena itu, kinerja generator sangat dipengaruhi secara tidak langsung oleh efisiensi boiler. Penurunan efisiensi boiler akibat meningkatnya kehilangan panas (*heat loss*) akan menurunkan jumlah energi panas yang tersedia untuk menghasilkan uap, sehingga energi mekanik yang dapat dikonversi oleh turbin dan generator juga berkurang atau memerlukan konsumsi

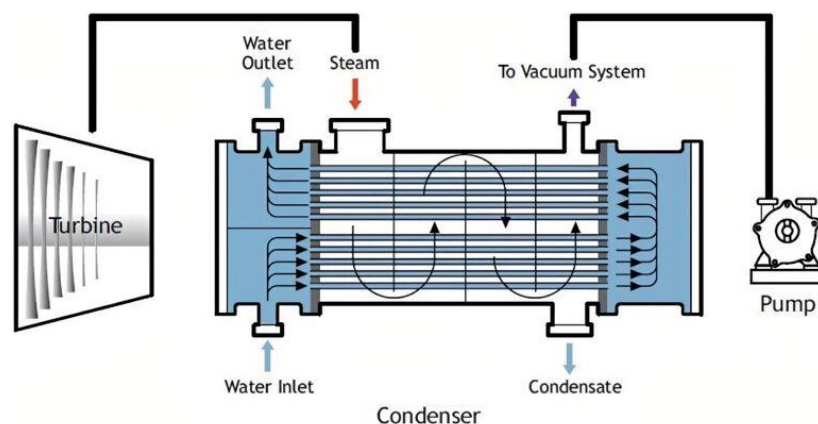
bahan bakar yang lebih besar untuk mempertahankan daya keluaran yang sama.

Selain itu, fluktuasi kondisi uap akibat pembakaran yang kurang stabil (misalnya karena kualitas batubara menurun) dapat menyebabkan variasi torsi pada poros turbin. Kondisi ini dapat mempengaruhi kestabilan putaran rotor generator dan berpotensi menurunkan kualitas daya listrik yang dihasilkan. Dengan demikian, generator merupakan komponen akhir dalam rantai konversi energi yang kinerjanya sangat bergantung pada kestabilan proses pembakaran dan efisiensi boiler sebagai sumber energi termal utama.

4. Kondensor

Kondensor berfungsi mengubah uap bekas turbin menjadi air dengan cara melepaskan panas laten penguapan uap ke media pendingin. Proses ini bertujuan menciptakan tekanan rendah (*vacuum*) pada sisi keluaran turbin sehingga meningkatkan rasio ekspansi uap dan kerja turbin.

Secara termodinamika, kinerja kondensor dinyatakan melalui tekanan kondensasi dan temperatur air kondensat. Semakin rendah tekanan kondensor, semakin besar selisih tekanan antara inlet dan outlet turbin, sehingga efisiensi turbin meningkat. Namun, apabila efisiensi boiler menurun dan beban panas sistem meningkat, maka beban termal yang harus dilepaskan di kondensor juga meningkat.



Gambar 9. Skema Kondensor (Sumber: El-Wakil, *Powerplant Technology*)

Dengan demikian, penurunan efisiensi boiler tidak hanya berdampak pada peningkatan konsumsi bahan bakar, tetapi juga meningkatkan beban perpindahan panas pada kondensor, yang berpotensi menurunkan kinerja siklus secara keseluruhan.

5. Pompa Air Umpan (*Feedwater Pump*)

Pompa air umpan berfungsi menaikkan tekanan air hasil kondensasi agar dapat dialirkan kembali ke boiler. Pompa ini bekerja melawan tekanan tinggi di dalam boiler sehingga memerlukan daya mekanik yang relatif besar dibandingkan pompa pada sistem fluida biasa.

Secara sistem, pompa air umpan menjaga keseimbangan antara laju pembentukan uap di boiler dan suplai air yang masuk. Ketidakstabilan aliran air umpan dapat menyebabkan fluktuasi level drum dan mengganggu proses perpindahan panas di dalam boiler.

Apabila efisiensi boiler menurun dan konsumsi bahan bakar meningkat, maka laju pembentukan uap juga harus ditingkatkan untuk mempertahankan daya keluaran. Kondisi ini menyebabkan pompa air umpan bekerja pada beban yang lebih tinggi, sehingga konsumsi daya bantu (*auxiliary power*) meningkat dan efisiensi sistem pembangkit secara keseluruhan menurun.

6. Sistem Udara dan Gas Buang

Sistem udara dan gas buang berfungsi menyediakan oksigen untuk proses pembakaran dan mengalirkan gas hasil pembakaran keluar dari boiler. Sistem ini terdiri dari *Primary Air Fan (PA Fan)* untuk mengeringkan dan mengangkut batubara ke *burner*, *Forced Draft Fan (FD Fan)* untuk memasok udara sekunder, serta *Induced Draft Fan (ID Fan)* untuk menarik gas buang menuju cerobong.

Secara pembakaran, rasio udara-bahan bakar menentukan kesempurnaan reaksi oksidasi karbon dan hidrogen dalam batubara. Kekurangan udara akan

menyebabkan pembakaran tidak sempurna yang ditandai dengan meningkatnya karbon tidak terbakar. Sebaliknya, kelebihan udara (*excess air*) akan meningkatkan massa gas buang sehingga panas yang terbuang melalui cerobong bertambah.

Kadar O₂ gas buang digunakan sebagai indikator besarnya *excess air*. Peningkatan kadar O₂ menunjukkan bahwa udara yang masuk melebihi kebutuhan stoikiometri, sehingga meningkatkan kehilangan panas melalui gas buang kering. Dengan demikian, sistem udara dan gas buang berperan langsung dalam menentukan besarnya kehilangan panas (L₁ dan L₄) dan nilai efisiensi boiler.

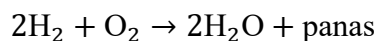
2.2.2 Proses Pembakaran pada PLTU Batubara

Proses pembakaran merupakan inti dari operasi PLTU. Pada sistem *pulverized coal firing*, batubara digiling halus menggunakan *coal mill* kemudian dicampur dengan udara primer dari *PA Fan* dan disemprotkan ke ruang bakar melalui burner.

Secara umum reaksi pembakaran karbon dalam batubara dapat ditulis sebagai:



Sedangkan pembakaran hidrogen dan sulfur dalam batubara adalah:



(Perry & Green, *Chemical Engineers' Handbook*, 2008)

Jika udara tidak mencukupi, maka reaksi tidak sempurna akan membentuk karbon monoksida (CO) dan hidrokarbon (HC) yang menandakan efisiensi pembakaran rendah.

Kualitas pembakaran dipengaruhi oleh:

- Ukuran partikel batubara hasil penggilingan.
- Rasio udara primer dan sekunder.
- Distribusi aliran udara di ruang bakar.
- Karakteristik bahan bakar seperti *volatile matter* (VM) dan *fixed*

carbon (FC).

Pada PLTU Ombilin, sistem udara terdiri dari:

- *Primary Air* (PA) Fan, mengangkut batubara halus dari mill ke burner.
- *Forced Draft* (FD) Fan, memasok udara sekunder ke ruang bakar.
- *Induced Draft* (ID) Fan, menarik gas buang keluar dari furnace.

2.2.3 Sistem Kontrol Pembakaran di PLTU Ombilin

Sistem kontrol memiliki peran penting dalam menentukan nilai efisiensi boiler karena mempengaruhi langsung besarnya kehilangan panas. Pengaturan AFR yang tidak tepat akan meningkatkan *excess air* dan kehilangan panas melalui gas buang. Kontrol pembakaran yang kurang stabil akan meningkatkan karbon tidak terbakar pada abu. Selain itu, pengendalian temperatur dan tekanan uap yang tidak optimal dapat menyebabkan distribusi panas di dalam boiler tidak merata, sehingga temperatur gas buang meningkat dan efisiensi menurun. Peralatan utama yang dikendalikan meliputi:

a. *Primary Air Fan (PA Fan)*

PA Fan dikendalikan untuk memasok udara primer yang berfungsi mengeringkan dan mengangkut serbuk batubara dari *mill* ke *burner*. Aliran udara primer harus cukup untuk membawa partikel batubara dan menjaga kestabilan nyala api. Pengaturan *PA Fan* yang tidak tepat dapat menyebabkan pembakaran tidak stabil atau peningkatan *excess air* yang berdampak pada kenaikan kehilangan panas melalui gas buang.

b. *Forced Draft Fan (FD Fan)*

FD Fan dikendalikan untuk memasok udara sekunder sebagai sumber oksigen utama pembakaran. Besarnya aliran udara sekunder diatur berdasarkan sinyal beban unit dan kadar O₂ gas buang.

Pengendalian FD Fan sangat berpengaruh terhadap rasio udara–bahan bakar dan kesempurnaan reaksi pembakaran. Kelebihan udara akan meningkatkan kehilangan panas sensibel, sedangkan kekurangan udara akan meningkatkan karbon tidak terbakar.

c. *Induced Draft Fan (ID Fan)*

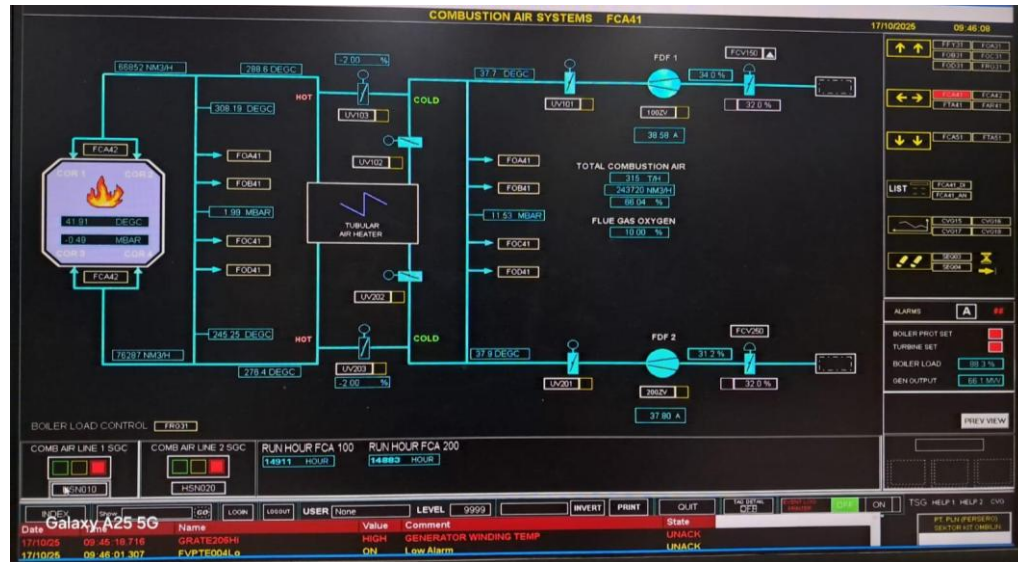
ID Fan dikendalikan untuk menjaga tekanan *furnace* tetap sedikit negatif (*draft negatif*) dan menarik gas hasil pembakaran menuju sistem pemanas lanjut dan cerobong. Pengaturan ID Fan mempengaruhi kecepatan aliran gas buang dan temperatur gas keluar boiler. Apabila aliran gas buang terlalu besar, panas yang terbuang meningkat dan efisiensi boiler menurun.

d. *Coal Feeder dan coal mill*

Coal feeder dikendalikan untuk mengatur laju aliran batubara ke *coal mill* sesuai kebutuhan beban unit. *Coal mill* digerakkan dan diawasi untuk memastikan batubara digiling hingga ukuran yang sesuai dan dikeringkan oleh udara primer. Laju aliran batubara yang terlalu besar atau terlalu kecil akan menyebabkan ketidakseimbangan rasio udara–bahan bakar, yang dapat menurunkan kualitas pembakaran dan meningkatkan kehilangan panas akibat karbon tidak terbakar.

e. *O₂ dan CO analyzer*

O₂ analyzer merupakan instrumen pengukuran yang digunakan untuk menentukan kadar oksigen sisa (*residual oxygen*) pada gas buang hasil pembakaran di boiler. Pada sistem pembakaran batubara, nilai *O₂* gas buang digunakan sebagai indikator besarnya *excess air* yang diberikan ke ruang bakar. Informasi ini sangat penting dalam sistem kontrol pembakaran karena menjadi sinyal umpan balik (*feedback*) untuk pengaturan aliran udara primer dan sekunder.



Gambar 10 Sistem Kontrol Udara Pembakaran (DCS) PLTU Ombilin Unit 1

Sistem kontrol pembakaran pada PLTU menerapkan logika *cross-limiting control* untuk menjaga kestabilan operasi serta mencegah terjadinya pembakaran tidak sempurna. Prinsip kerja sistem ini adalah memastikan bahwa perubahan suplai udara dan bahan bakar selalu dilakukan secara terkoordinasi. Pada saat beban unit meningkat, sistem akan meningkatkan aliran udara terlebih dahulu sebelum menaikkan suplai bahan bakar, sehingga oksigen yang cukup tersedia untuk proses pembakaran dan tidak terjadi kondisi kekurangan udara (*fuel rich*). Sebaliknya, ketika beban menurun, sistem akan mengurangi suplai bahan bakar lebih dahulu sebelum menurunkan aliran udara, agar sisa bahan bakar yang masih berada di dalam *furnace* dapat terbakar sempurna. Dengan cara ini, rasio udara terhadap bahan bakar (*air-fuel ratio*) tetap terjaga dalam batas aman dan efisien pada berbagai kondisi operasi pembangkit.

Dengan pengaturan ini, sistem mampu menjaga kestabilan nyala api, menekan emisi CO, serta mempertahankan efisiensi boiler walaupun terjadi variasi kualitas batubara.

2.2.4 Karakteristik Batubara sebagai Bahan Bakar

Jenis batubara yang digunakan pada PLTU memiliki perbedaan karakteristik kimia dan fisik yang berpengaruh terhadap proses pembakaran. Karakteristik tersebut dapat dilihat melalui:

1. *Proximate Analysis*

Analisis proximate meliputi *moisture*, *ash*, *volatile matter*, dan *fixed carbon*. *Moisture* yang tinggi menurunkan nilai kalor efektif dan meningkatkan kebutuhan udara primer untuk pengeringan. Kandungan *volatile matter* menentukan kemudahan pembakaran dan stabilitas nyala. *Ash* berpengaruh terhadap potensi *slagging* dan *fouling*, sedangkan *fixed carbon* menjadi sumber panas utama dalam *furnace*.

2. *Ultimate Analysis*

Ultimate analysis meliputi kandungan unsur karbon (C), hidrogen (H), oksigen (O), nitrogen (N), dan sulfur (S). Kandungan unsur ini menentukan kebutuhan udara teoritis untuk pembakaran sempurna karena setiap unsur memiliki reaksi spesifik dengan oksigen. Semakin tinggi kandungan oksigen dalam batubara, maka kebutuhan udara pembakaran menjadi lebih kecil.

3. Nilai Kalor (*Heating Value*)

Nilai kalor adalah energi yang dilepaskan saat membakar satu satuan massa batubara. Perubahan dari batubara *high rank* ke *Medium Rank Coal* umumnya menurunkan nilai kalor, meningkatkan *moisture*, dan mengubah karakteristik pembakaran sehingga mempengaruhi kebutuhan udara pembakaran.

Batubara merupakan bahan bakar padat yang tersusun dari unsur karbon (C), hidrogen (H), oksigen (O), nitrogen (N), sulfur (S), mineral (abu) dan air. Kualitas batubara menentukan performa pembakaran, efisiensi boiler, serta besarnya emisi.

Jenis-jenis batubara berdasarkan tingkat metamorfosisnya adalah:

- *Lignite (brown coal)*: kadar air tinggi, nilai kalor rendah.
- *Sub-bituminous*: kadar air lebih rendah, nilai kalor menengah.

- *Bituminous*: nilai kalor tinggi, umum digunakan di PLTU.
- *Anthracite*: kandungan karbon sangat tinggi, namun sulit menyala.

Parameter utama kualitas batubara meliputi:

- GCV (*Gross Calorific Value*): energi panas yang dihasilkan per satuan massa.
- HGI (*Hardgrove Grindability Index*): tingkat kemudahan digiling.
- VM (*Volatile Matter*): zat mudah menguap yang mempengaruhi kecepatan penyalaan.
- FC (*Fixed Carbon*): karbon padat yang menghasilkan panas saat pembakaran.
- *Ash, Moisture, dan Sulfur*: komponen non-kombustibel yang mempengaruhi emisi dan slagging.

Batubara dengan GCV tinggi menghasilkan energi lebih besar tetapi memerlukan udara pembakaran lebih banyak. Sebaliknya, batubara dengan GCV rendah memerlukan penyesuaian rasio udara dan bahan bakar agar efisiensi tetap optimal.

Namun, metode langsung memiliki keterbatasan karena tidak memberikan informasi mengenai sumber-sumber kehilangan panas secara rinci. Nilai efisiensi yang diperoleh hanya menunjukkan besarnya fraksi energi bahan bakar yang dimanfaatkan untuk menghasilkan uap, tanpa menjelaskan apakah penurunan efisiensi disebabkan oleh gas buang, kandungan moisture bahan bakar, pembakaran tidak sempurna, atau kehilangan panas lainnya.

Selain itu, akurasi metode langsung sangat bergantung pada ketelitian pengukuran laju aliran massa uap dan bahan bakar. Kesalahan kecil pada pengukuran debit uap atau bahan bakar dapat menyebabkan deviasi nilai efisiensi yang cukup besar. Metode ini juga kurang sensitif untuk menganalisis pengaruh perubahan karakteristik bahan bakar, karena tidak mengaitkan langsung efisiensi dengan mekanisme kehilangan panas yang terjadi di dalam boiler.

Dalam konteks analisis pengaruh perubahan jenis batubara terhadap efisiensi boiler, metode langsung kurang mampu menunjukkan mekanisme fisik penurunan efisiensi. Oleh karena itu, metode ini umumnya digunakan sebagai metode pendukung atau pembanding, sedangkan analisis utama kinerja boiler lebih tepat dilakukan dengan metode tidak langsung (*indirect method*) yang mampu menguraikan komponen kehilangan panas secara terpisah.

2.2.5 Metode Langsung (Direct Method)

Metode langsung (*direct method*) merupakan salah satu pendekatan yang digunakan untuk menentukan efisiensi boiler berdasarkan perbandingan antara energi panas yang diserap oleh fluida kerja dengan energi panas yang dilepaskan oleh pembakaran bahan bakar. Metode ini dikenal juga sebagai metode *input–output* karena menghitung efisiensi boiler secara langsung dari rasio energi keluaran terhadap energi masukan sistem boiler.

Secara umum, efisiensi boiler dengan metode langsung dinyatakan sebagai:

$$\eta_{boiler} = \frac{Q_{out}}{Q_{in}} \times 100 \dots\dots\dots(2.1)$$

di mana:

- Q_{out} adalah energi panas yang dimanfaatkan untuk menghasilkan uap,
- Q_{in} adalah energi panas yang tersedia dari pembakaran bahan bakar.

Pada sistem Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), energi keluaran (Q_{out}) merupakan energi panas yang digunakan untuk menaikkan entalpi air umpan menjadi uap keluar boiler, sedangkan energi masukan (Q_{in}) berasal dari nilai kalor bahan bakar yang dibakar di dalam boiler.

Secara praktis, perhitungan efisiensi boiler dengan metode langsung dapat dituliskan sebagai:

$$\eta_{boiler} = \frac{\dot{m}_s(h_s - h_{fw})}{\dot{m}_f \times GCV} \times 100\% \dots\dots\dots(2.2)$$

dengan:

- $\dot{m}_s$ = laju aliran massa uap (kg/s),
- h_s = entalpi uap keluar boiler (kJ/kg),
- h_{fw} = entalpi air umpan masuk boiler (kJ/kg),
- $\dot{m}_f$ = laju aliran massa bahan bakar (kg/s),
- GCV = nilai kalor bahan bakar (kJ/kg).

Metode langsung memiliki keunggulan berupa kemudahan perhitungan dan kebutuhan data yang relatif sederhana, sehingga sering digunakan untuk pemantauan cepat kinerja boiler pada kondisi operasi normal. Dengan metode ini, operator dapat dengan mudah mengetahui tingkat efisiensi boiler tanpa harus menghitung komponen kehilangan panas secara rinci.

Namun demikian, metode langsung memiliki keterbatasan karena tidak mampu menunjukkan sumber-sumber kehilangan panas yang menyebabkan penurunan efisiensi boiler. Metode ini hanya menghasilkan nilai efisiensi total tanpa memberikan informasi mengenai kontribusi masing-masing komponen *heat loss*, seperti kehilangan panas melalui gas buang, *moisture* bahan bakar, karbon tidak terbakar, serta radiasi dan konveksi. Selain itu, tingkat akurasi metode langsung sangat bergantung pada ketelitian pengukuran laju aliran massa uap dan bahan bakar. Kesalahan kecil pada pengukuran tersebut dapat menyebabkan deviasi yang cukup signifikan pada hasil perhitungan efisiensi.

Dalam konteks penelitian yang menganalisis pengaruh perubahan jenis dan kualitas batubara terhadap efisiensi boiler, metode langsung kurang mampu menjelaskan mekanisme fisik penurunan efisiensi yang terjadi. Oleh karena itu, meskipun metode langsung dapat digunakan sebagai indikator awal kinerja boiler, analisis yang lebih mendalam mengenai pengaruh *coal switching* terhadap efisiensi boiler umumnya lebih tepat dilakukan menggunakan metode tidak langsung (*indirect method*) yang berbasis pada perhitungan komponen kehilangan panas.

2.2.6 Metode Tidak Langsung (*Indirect Method*)

Metode tidak langsung (*indirect method*) atau *heat loss method* merupakan metode perhitungan efisiensi boiler yang didasarkan pada identifikasi dan perhitungan seluruh komponen kehilangan panas (*heat losses*) yang terjadi selama proses pembakaran dan perpindahan panas di dalam boiler. Efisiensi boiler ditentukan dengan mengurangkan total kehilangan panas dari energi masukan bahan bakar.

Berdasarkan ASME PTC 4-1, metode tidak langsung memberikan gambaran yang lebih komprehensif terhadap kinerja termal boiler karena mampu mengidentifikasi kontribusi masing-masing sumber kerugian energi. Metode ini sangat sesuai digunakan untuk analisis penyebab penurunan efisiensi boiler, terutama pada studi yang melibatkan variasi kualitas bahan bakar dan kondisi pembakaran.

Efisiensi boiler dengan metode tidak langsung dirumuskan sebagai:

$$\eta_{boiler} = 100\% - \sum L_i \dots\dots\dots(2.3)$$

di mana L_i adalah persentase kehilangan panas terhadap energi masukan bahan bakar. Untuk boiler berbahan bakar padat seperti batubara, komponen kehilangan panas utama meliputi:

- L_1 – Kehilangan panas akibat gas buang kering (*dry flue gas loss*)
- L_2 – Kehilangan panas akibat pembentukan uap air dari hidrogen bahan bakar
- L_3 – Kehilangan panas akibat *moisture* dalam bahan bakar
- L_4 – Kehilangan panas akibat *moisture* dalam udara pembakaran
- L_5 – Kehilangan panas akibat pembakaran tidak sempurna (CO loss)
- L_6 – Kehilangan panas akibat radiasi dan konveksi permukaan boiler
- L_7 – Kehilangan panas akibat karbon tidak terbakar pada fly ash
- L_8 – Kehilangan panas akibat karbon tidak terbakar pada bottom ash

Total efisiensi boiler kemudian diperoleh dari pengurangan total kerugian tersebut terhadap energi masukan bahan bakar. Metode ini memerlukan data yang lebih lengkap, seperti analisis gas buang, analisis *ultimate* bahan bakar, temperatur gas buang, kelembaban udara, serta karakteristik abu. Meskipun lebih kompleks, metode tidak langsung mampu menunjukkan secara kuantitatif penyebab dominan penurunan efisiensi boiler.

2.2.7 Kehilangan Panas (*Heat Loss*) pada Boiler

Kehilangan panas (*heat loss*) adalah bagian energi hasil pembakaran bahan bakar yang tidak dimanfaatkan untuk menghasilkan uap dan terbang ke lingkungan. Semakin besar *heat loss* yang terjadi, semakin rendah efisiensi boiler yang dihasilkan.

Dalam metode tidak langsung, heat loss dibagi menjadi beberapa komponen utama, yaitu L_1 sampai dengan L_8 .

1. Kehilangan Panas Gas Buang Kering (L_1)

Kehilangan panas ini terjadi karena gas hasil pembakaran masih membawa panas sensibel saat dilepaskan ke cerobong. Besarnya L_1 dipengaruhi oleh temperatur gas buang dan jumlah udara berlebih (*excess air*) yang digunakan dalam proses pembakaran. Semakin tinggi temperatur gas buang dan kadar O_2 dalam gas buang, maka semakin besar panas yang terbang ke lingkungan. Komponen ini umumnya merupakan salah satu kehilangan panas terbesar pada boiler berbahan bakar batubara..

$$L_1 = \frac{m_{dg} \cdot C_p \cdot (T_f - T_a)}{GCV} \times 100\% \dots\dots\dots(2.4)$$

Keterangan:

- L_1 = kehilangan panas akibat gas buang kering (%)
- m_{dfg} = massa gas buang kering per satuan massa bahan bakar (kg gas

buang/kg bahan bakar)

- C_p = panas jenis gas buang ($\approx 0,23 \text{ kcal/kg}\cdot^\circ\text{C}$)
- T_f = temperatur gas buang ($^\circ\text{C}$)
- T_a = temperatur udara ambien ($^\circ\text{C}$)
- GCV = nilai kalor bruto bahan bakar (kcal/kg)

2. Kehilangan Panas Akibat Hidrogen dalam Bahan Bakar (L_2)

Hidrogen yang terkandung dalam bahan bakar akan bereaksi dengan oksigen membentuk uap air selama proses pembakaran. Pembentukan uap air ini memerlukan energi laten penguapan, sehingga sebagian energi hasil pembakaran tidak dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan uap kerja. Besarnya L_2 bergantung pada kandungan hidrogen dalam bahan bakar dan temperatur gas buang.

$$L_2 = \frac{9H_2 \cdot [584 + C_p(T_f - T_a)]}{GCV} \times 100\% \dots\dots\dots (2.5)$$

Keterangan:

- L_2 = kehilangan panas akibat pembentukan uap air dari hidrogen (%)
- H_2 = fraksi hidrogen dalam bahan bakar (kg H_2 /kg bahan bakar)
- Angka 9 = faktor stoikiometri (1 kg H_2 menghasilkan ± 9 kg H_2O)
- 584 = panas laten penguapan air (kcal/kg)
- C_p = panas jenis uap air superheated ($\approx 0,45 \text{ kcal/kg}\cdot^\circ\text{C}$)
- T_f = temperatur gas buang ($^\circ\text{C}$)
- T_a = temperatur udara ambien ($^\circ\text{C}$)
- GCV = nilai kalor bruto bahan bakar (kcal/kg)

3. Kehilangan Panas Akibat *Moisture* dalam Bahan Bakar (L_3)

Moisture atau kandungan air dalam bahan bakar harus diuapkan selama

proses pembakaran, yang memerlukan energi panas tambahan. Energi ini diambil dari panas hasil pembakaran, sehingga mengurangi energi efektif yang tersedia untuk pembentukan uap. Batubara dengan kadar moisture tinggi akan menghasilkan L_3 yang lebih besar dan menyebabkan penurunan efisiensi boiler

$$L_3 = \frac{M \cdot [584 + C_p(T_f - T_a)]}{GCV} \times 100\% \dots\dots\dots(2.6)$$

Keterangan:

- L_3 = kehilangan panas akibat *moisture* dalam bahan bakar (%)
- M = fraksi *moisture* dalam bahan bakar (kg air/kg bahan bakar)
- 584 = panas laten penguapan air (kcal/kg)
- C_p = panas jenis uap air ($\approx 0,45$ kcal/kg $\cdot^\circ\text{C}$)
- T_f = temperatur gas buang ($^\circ\text{C}$)
- T_a = temperatur udara ambien ($^\circ\text{C}$)
- GCV = nilai kalor bruto bahan bakar (kcal/kg)

4. Kehilangan Panas Akibat *Moisture* dalam Udara Pembakaran (L_4)

Udara pembakaran yang masuk ke *furnace* mengandung uap air yang ikut dipanaskan dan diuapkan. Proses ini memerlukan energi panas sehingga menambah kehilangan panas sistem. Besarnya L_4 dipengaruhi oleh kelembaban udara lingkungan dan jumlah udara pembakaran aktual. Pada kondisi kelembaban udara tinggi dan *excess air* besar, nilai L_4 akan meningkat.

$$L_4 = \frac{AAS \cdot HF \cdot C_p \cdot (T_f - T_a)}{GCV} \times 100\% \dots\dots\dots(2.7)$$

Keterangan:

- L_4 = kehilangan panas akibat *moisture* dalam udara pembakaran (%)
- AAS = massa udara aktual pembakaran per kg bahan bakar (kg udara/kg

bahan bakar)

- HF = *humidity factor* udara ambien (kg uap air/kg udara kering)

Nilai kelembaban udara ambien diasumsikan berdasarkan kondisi lingkungan setempat dan literatur standar ASME PTC 4-1.

- C_p = panas jenis uap air ($\approx 0,45$ kcal/kg $\cdot$ °C)
- T_f = temperatur gas buang (°C)
- T_a = temperatur udara ambien (°C)
- GCV = nilai kalor bruto bahan bakar (kcal/kg)

5. Kehilangan Panas Akibat Pembakaran Tidak Sempurna (CO Loss) (L_5)

Kehilangan panas ini terjadi ketika sebagian karbon dalam bahan bakar tidak teroksidasi sempurna menjadi karbon dioksida (CO_2), tetapi membentuk karbon monoksida (CO). Terbentuknya CO menunjukkan bahwa sebagian energi kimia bahan bakar tidak dilepaskan sepenuhnya. Besarnya L_5 dipengaruhi oleh distribusi udara pembakaran, pencampuran udara dan bahan bakar, serta karakteristik nyala api.

$$L_5 = \frac{\%CO \cdot C}{\%CO + \%CO_2} \cdot \frac{5744}{GCV} \times 100\% \dots\dots\dots(2.8)$$

Keterangan:

- L_5 = kehilangan panas akibat pembentukan CO (%)
- = kadar karbon monoksida dalam gas buang (%)
- = kadar karbon dioksida dalam gas buang (%)
- C = fraksi karbon dalam bahan bakar (kg C/kg bahan bakar)
- 5744 = nilai kalor karbon yang tidak teroksidasi sempurna (kcal/kg C)
- GCV = nilai kalor bruto bahan bakar (kcal/kg)

6. Kehilangan Panas Akibat Radiasi dan Konveksi (L_6)

Kehilangan panas ini terjadi melalui radiasi dan konveksi dari permukaan luar boiler ke lingkungan sekitar. Besarnya L_6 dipengaruhi oleh suhu permukaan boiler, luas permukaan, kondisi isolasi termal, serta kondisi lingkungan sekitar. Pada boiler pembangkit, nilai L_6 umumnya relatif kecil dan sering dianggap konstan sesuai rekomendasi ASME PTC 4-1. Untuk boiler pembangkit, ASME PTC 4-1 memperbolehkan penggunaan nilai pendekatan 0,4 – 1,5 % untuk boiler pembangkit besar

7. Kehilangan Panas Akibat Karbon Tidak Terbakar dalam Fly Ash (L_7)

Sebagian karbon dalam bahan bakar dapat terbawa bersama abu terbang (*fly ash*) dan keluar melalui aliran gas buang. Karbon yang tidak terbakar ini masih memiliki nilai kalor sehingga menyebabkan kehilangan energi potensial bahan bakar. Besarnya L_7 dipengaruhi oleh kualitas penggilingan batubara, ukuran partikel, dan waktu tinggal partikel dalam *furnace*

$$L_7 = \frac{\text{massa fly ash} \cdot GCV_{\text{fly ash}}}{GCV_{\text{fuel}}} \times 100\% \dots\dots\dots(2.9)$$

Keterangan:

- L_7 = kehilangan panas akibat karbon tidak terbakar dalam *fly ash* (%)
- massa *fly ash* = massa abu terbang per kg bahan bakar (kg/kg bahan bakar)
- GCV_{Ash} = nilai kalor abu terbang (kcal/kg)
- GCV_{fuel} = nilai kalor bruto bahan bakar (kcal/kg)

8. Kehilangan Panas Akibat Karbon Tidak Terbakar dalam Bottom Ash (L_8)

Selain terbawa bersama *fly ash*, karbon tidak terbakar juga dapat tertinggal pada abu dasar (*bottom ash*). Karbon yang tertinggal ini menunjukkan pembakaran

yang kurang sempurna dan menyebabkan kehilangan panas tambahan. Besarnya L_8 dipengaruhi oleh desain *furnace*, kecepatan aliran udara, dan karakteristik pembakaran bahan bakar.

$$L_8 = \frac{\text{massa bottom ash} \cdot GCV_{\text{bottom ash}}}{GCV_{\text{fuel}}} \times 100\% \dots\dots\dots(2.10)$$

Keterangan:

- L_8 = kehilangan panas akibat karbon tidak terbakar dalam *bottom ash* (%)
- massa *bottom ash* = massa abu dasar per kg bahan bakar (kg/kg bahan bakar)
- $GCV_{\text{bottom ash}}$ = nilai kalor abu dasar (kcal/kg)
- GCV_{fuel} = nilai kalor bruto bahan bakar (kcal/kg)

Setelah seluruh komponen kehilangan panas dihitung, efisiensi boiler ditentukan dengan persamaan:

$$\eta_{\text{boiler}} = 100 - (L_1 + L_2 + L_3 + L_4 + L_5 + L_6 + L_7 + L_8) \dots\dots\dots(2.11)$$

Persamaan ini sepenuhnya mengacu pada ASME PTC 4-1, sehingga hasil perhitungan efisiensi boiler dalam penelitian ini bersifat standar, terverifikasi, dan dapat dibandingkan dengan kinerja boiler lainnya.

2.2.8 Co-Firing Biomassa

Co-firing merupakan metode pembakaran bersama antara bahan bakar utama berupa batubara dengan bahan bakar alternatif seperti biomassa dalam satu sistem pembakaran yang sama. Pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), teknologi *co-firing* dikembangkan sebagai salah satu strategi transisi energi untuk mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil serta menurunkan emisi gas rumah kaca tanpa memerlukan modifikasi besar pada peralatan utama pembangkit.

Biomassa yang dapat digunakan dalam skema *co-firing* antara lain *wood*

pellet, sekam padi, tandan kosong kelapa sawit, dan serbuk kayu (*sawdust*). Dalam praktik operasional di Indonesia, pemanfaatan biomassa umumnya dilakukan pada persentase rendah ($\leq 10\%$) untuk menjaga kestabilan proses pembakaran dan meminimalkan penurunan efisiensi boiler. Pada penelitian ini, biomassa yang digunakan adalah *sawdust* karena ketersediaannya yang melimpah, biaya yang relatif rendah, serta kemudahan dalam proses pencampuran dengan batubara.

Karakteristik *sawdust* memiliki perbedaan yang cukup signifikan dibandingkan batubara. *Sawdust* umumnya memiliki kandungan *moisture* yang lebih tinggi (sekitar 30–50%), nilai kalor yang lebih rendah, serta kandungan oksigen yang lebih tinggi dan karbon yang lebih rendah. Perbedaan ini menyebabkan perubahan pada proses pembakaran di dalam *furnace*, khususnya terhadap kebutuhan udara pembakaran, temperatur nyala api, serta distribusi panas di dalam boiler.

Dalam proses *co-firing*, pencampuran bahan bakar dilakukan berdasarkan fraksi massa. Nilai kalor campuran bahan bakar dapat dihitung menggunakan persamaan rata-rata tertimbang sebagai berikut:

$$GCV_{mix} = (\text{fraksi massa coal} \times GCV_{coal}) + (\text{fraksi massa biomassa} \times GCV_{biomassa}) \dots \dots \dots (2.12)$$

Selain nilai kalor, parameter lain seperti kandungan *moisture*, karbon (C), hidrogen (H), oksigen (O), dan sulfur (S) juga dihitung berdasarkan pendekatan rata-rata tertimbang untuk digunakan dalam analisis pembakaran dan perhitungan efisiensi boiler.

Dari sudut pandang termodinamika, penambahan biomassa dalam bahan bakar cenderung meningkatkan kehilangan panas (*heat loss*) pada boiler. Kandungan *moisture* yang tinggi pada biomassa menyebabkan peningkatan kehilangan panas akibat penguapan air dalam bahan bakar (L_3). Selain itu,

kandungan hidrogen yang relatif lebih tinggi juga meningkatkan kehilangan panas akibat pembentukan uap air hasil pembakaran (L_2). Kandungan oksigen dalam biomassa turut meningkatkan kebutuhan udara pembakaran, yang dapat menyebabkan kenaikan *excess air* dan meningkatkan kehilangan panas melalui gas buang kering (L_1).

Di sisi lain, karakteristik fisik biomassa yang lebih ringan dan mudah terbakar dapat mempengaruhi kestabilan nyala api di dalam *furnace*. Apabila distribusi bahan bakar dan udara tidak optimal, maka dapat terjadi pembakaran tidak sempurna yang ditandai dengan meningkatnya kandungan karbon tidak terbakar pada abu. Kondisi ini berkontribusi terhadap peningkatan kehilangan panas akibat karbon tidak terbakar pada *fly ash* (L_7) dan *bottom ash* (L_8).

Meskipun demikian, penerapan *co-firing* memberikan keuntungan dari sisi lingkungan karena biomassa bersifat karbon netral, sehingga dapat menurunkan emisi CO_2 secara keseluruhan. Oleh karena itu, implementasi *co-firing* perlu dioptimalkan agar diperoleh keseimbangan antara penurunan emisi dan penurunan efisiensi boiler.

Pada PLTU Ombilin Unit 1, penerapan *co-firing* dilakukan dengan menggunakan biomassa jenis *sawdust* sebesar 5% dari total massa bahan bakar. Dalam penelitian ini, skenario tersebut digunakan untuk menganalisis pengaruh *co-firing* terhadap distribusi kehilangan panas (L_1 – L_8) dan efisiensi boiler menggunakan metode tidak langsung (*indirect method*) berdasarkan standar ASME PTC 4-1.