BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian yang Relevan

Penelitian sebelumnya yang relevan merupakan bahan perbandingan dan acuan dalam menyusun penelitian ini. Dengan tujuan agar menghindari adanya kesamaan, plagiarisme dan memperbaharui ilmu pengetahuan yang selalu berkembang. Oleh karena itu, dalam bagian tinjauan pustaka, peneliti menyampaikan beberapa kerangka penelitian dan hasilnya pada berbagai publikasi ilmiah yang memiliki keterkaitan dengan judul penelitian, yaitu:

2.1.1. Pengaruh Operasi *Co-Firing* Biomassa terhadap Efisiensi *Boiler* PLTU Batubara (Agus Noor Sidiq, E-ISSN: 2655-4925)

Penelitian ini membahas biomassa yang menjadi salah satu dari sumber energi terbarukan yang diharapkan mampu mengurangi emisi gas yang berbahaya untuk kehidupan manusia di Bumi. Mengkaji pengaruh campuran biomassa terhadap efisiensi boiler PLTU batubara dengan memperhatikan komposisi dan jenis biomassa serta setting pembakaran yang tepat agar menghasilkan efisiensi boiler yang optimal.

Studi kasus yang dianalisis yaitu di PLTU Suralata Unit 2 dengan campuran rata-rata biomassa hanya sebesar 1%.

2.1.2. Analisis kelayakan energi proses *Co-Firing* batubara dan *Woodchip* pada Pembangkit Listrik ((Rifka Alkhilyatul Ma'rifat, I Made Suraharta, 2024)

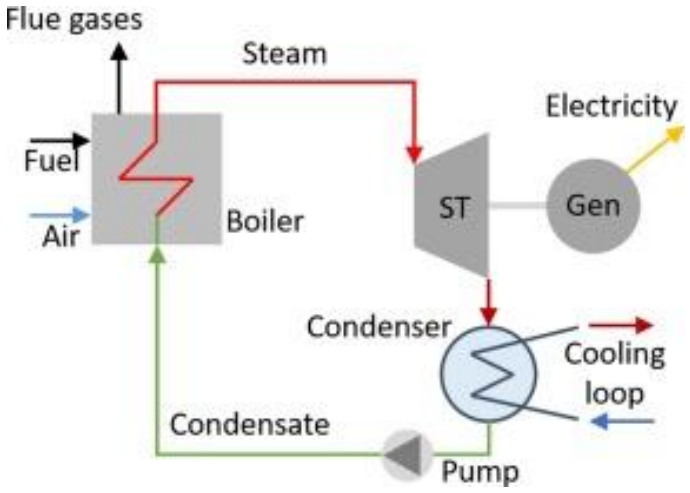
Kajian yang dilakukan menggunakan metoda input-output atau metoda langsung (*direct method*) pada Pembangkit listrik. Dengan skema co-firing 95% batubara dan 5% *whoodchip*,hasil analisis efisiensi kinerja boiler meningkat 74% dibandingkan dengan 100% Batubara 73%.

2.2 Landasan Teori

Dari latar belakang permasalahan dan tinjauan pustaka diatas yang mendasari penelitian, maka akan dijelaskan mengenai dasar-dasar teori yang dijadikan sebagai pedoman pada penyusunan penelitian ini.

2.2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Uap

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) adalah jenis pembangkit listrik yang memanfaatkan uap air hasil pembakaran untuk menghasilkan energi listrik. Prinsip kerja PLTU didasarkan pada siklus *Rankine*, yang melibatkan beberapa tahapan utama seperti gambar berikut :



Gambar 2. 1 Prinsip Kerja PLTU (M.M. EL Wakil, 2015)

1. Pemanasan Air di *Boiler*

Air diumpankan ke *Boiler* melalui sistem pompa air umpan. Di dalam *Boiler*, air ini dipanaskan menggunakan panas dari proses pembakaran bahan bakar (seperti batubara, minyak, atau gas). Proses pembakaran ini menghasilkan suhu yang sangat tinggi, yang memanaskan air hingga mencapai titik didih dan berubah menjadi uap. Uap yang dihasilkan memiliki tekanan dan suhu yang sangat tinggi.

2. Pembangkitan Uap

Uap yang dihasilkan kemudian dikumpulkan di *steam drum* sebelum disalurkan ke turbin melalui pipa-pipa uap. Di dalam turbin, uap bertekanan tinggi ini digunakan untuk memutar sudu-sudu turbin. Perputaran sudu-sudu turbin ini mengubah energi termal uap menjadi energi mekanik.

3. Ekspansi Uap di Turbin

Uap mengalir melalui beberapa tahap turbin, masing-masing dengan tekanan yang semakin menurun. Pada setiap tahap, energi kinetik uap dikonversi menjadi energi mekanik atau energi gerak, yang selanjutnya akan digunakan untuk memutar rotor turbin yang terhubung dengan rotor generator. Hasilnya adalah perputaran mekanis yang stabil dan kuat.

4. Produksi Energi Listrik di Generator

Generator yang terhubung dengan turbin mengubah energi mekanik dari perputaran rotor menjadi energi listrik melalui proses induksi elektromagnetik. Rotor yang berputar di dalam medan magnet stator menghasilkan arus listrik, yang kemudian dikirim ke sistem distribusi melalui transformator.

5. Kondensasi Uap di Kondensor

Uap bekas yang keluar dari turbin memiliki tekanan dan suhu yang lebih rendah. Uap ini kemudian dialirkan ke kondensor, di mana uap tersebut didinginkan dan dikondensasikan kembali menjadi air. Proses pendinginan ini biasanya menggunakan air dari sumber eksternal seperti sungai atau laut. Air hasil kondensasi ini kemudian dipompa kembali ke *Boiler* untuk digunakan ulang, melengkapi siklus Rankine.

6. Siklus Udara dan Gas Buang

Siklus udara dan gas buang pada pembangkit PLTU merupakan sistem yang mendukung proses pembakaran di dalam *Boiler*. Sistem ini merupakan siklus tertutup yang terjadi pada suatu media dalam waktu dan proses yang sama sehingga proses pembakaran dapat dikontrol secara optimal yang nantinya berdampak pada proses pembakaran yang sempurna dan efisien.

Siklus udara di dalam sebuah *Boiler* sangat penting, sebab udara merupakan salah satu unsur penting dalam reaksi pembakaran. Sistem udara pada prinsipnya berfungsi sebagai media transport bahan bakar menujui *Boiler* (*primary fan*) sekaligus menyediakan udara sekunder yang diperlukan untuk

mencapai pembakaran sempurna pada *Boiler* gas dan membuat turbulensi bahan bakar di dalam *furnace* (*secondary fan*).

Sistem gas buang atau *flue gas* merujuk pada komponen penting dalam proses pembakaran di berbagai industri dan fasilitas energi. Sist ini bertugas untuk mengalirkan gas panas yang dihasilkan selama proses pembakaran menuju ke pipa air dan uap serta elemen pemanasan udara. Secara prinsip, skema dari proses kerja antara sistem udara dan gas buang terlihat pada gambar di bawah ini:



Gambar 2. 2 Sistem Udara dan Gas Buang *(M.M. EL Wakil, 2015)*

Salah satu jenis PLTU yang banyak dijumpai di Indonesia yaitu PLTU yang memanfaatkan batubara sebagai bahan bakar utama untuk menghasilkan panas yang akan digunakan dalam proses produksi uap. PLTU Batubara banyak digunakan di Indonesia karena ketersediaan batubara yang melimpah di Indonesia, dimana Indonesia dikenal sebagai salah satu penghasil batubara terbesar.

2.2.2 *Boiler*

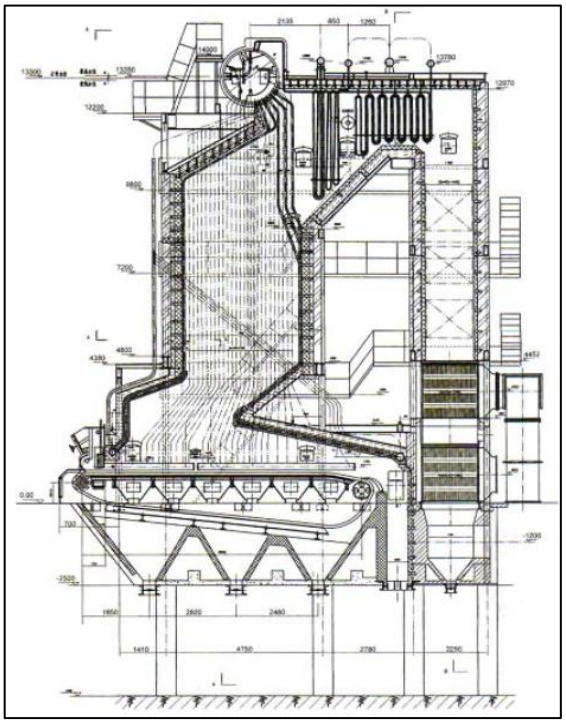
Peralatan utama pada sebuah pembangkit listrik, terutama PLTU salah satunya adalah boiler. Boiler atau disebut ketel uap adalah sebuah alat yang difungsikan untuk menghasilkan uap dengan dua bagian penting yaitu dapur pemanasan (*furnace*) untuk menghasilkan panas yang diperoleh dari proses pembakaran bahan bakar dan *boiler proper* untuk mengubah air menjadi uap bersuhu dan bertekanan tinggi.

Jika dilihat dari tipe pengapiannya, klasifikasi boiler terbagi menjadi beberapa jenis, yaitu:

4.2.3.8 *Boiler Stoker*

Dilengkapi dengan *chain grate* yang berfungsi sebagai media pembakaran bahan bakar. Kemudian udara panas dialirkan dari bawah *chain grate* sehingga bahan bakar mudah terbakar. Boiler ini dapat menggunakan bahan bakar antara lain batubara, limbah kayu maupun sampah. Udara yang digunakan saat proses pembakaran dioperasikan dengan kecepatan dan volume yang kecil dan ukuran boiler ini terbatas sehingga memiliki kemampuan menghasilkan *steam* / uap maksimum sekitar 50-60 kg/s.

.

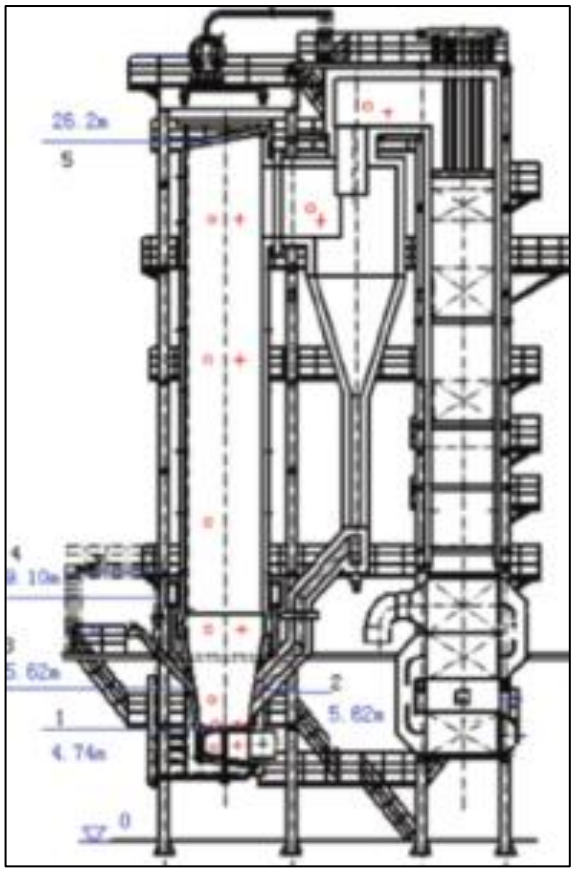


Gambar 2. 3 Skematik Boiler Stoker (Ta'nezuk et al., 2018)

4.2.3.8 *Circulating Fluidized Bed (CFB) Boiler*

Disebut *circulating* karena proses sirkulasi bahan bakar yang belum habis terbakar dari ruang bakar ke *cyclone* kemudian masuk ke *sealpot* dan kembali ke ruang bakar. Sedangkan dinamakan *fluidized* karena udara primer dihembuskan untuk menjaga material *bed* dan batubara tetap berada di dalam *furnace*, dan *bed* adalah material tambahan berupa partikel kecil seperti pasir silika atau batu kapur / *limestone* yang digunakan sebagai media awal transfer panas dari pembakaran bahan

bakar cair ke pembakaran bahan bakar batubara. Teknologi boiler ini mampu mengurangi kebutuhan terhadap sistem *flue gas desulphurization* (FGD) karena sulfur oksida (SOx) dapat ditangkap langsung di ruang bakar. Proses ini terjadi melalui pemanfaatan *bed material* berupa batu kapur sebagai bahan penyerap sulfur. Selain itu, emisi nitrogen oksida (NOx) juga dapat ditekan dengan menjaga suhu tungku tetap rendah dan menerapkan pembakaran bertahap.



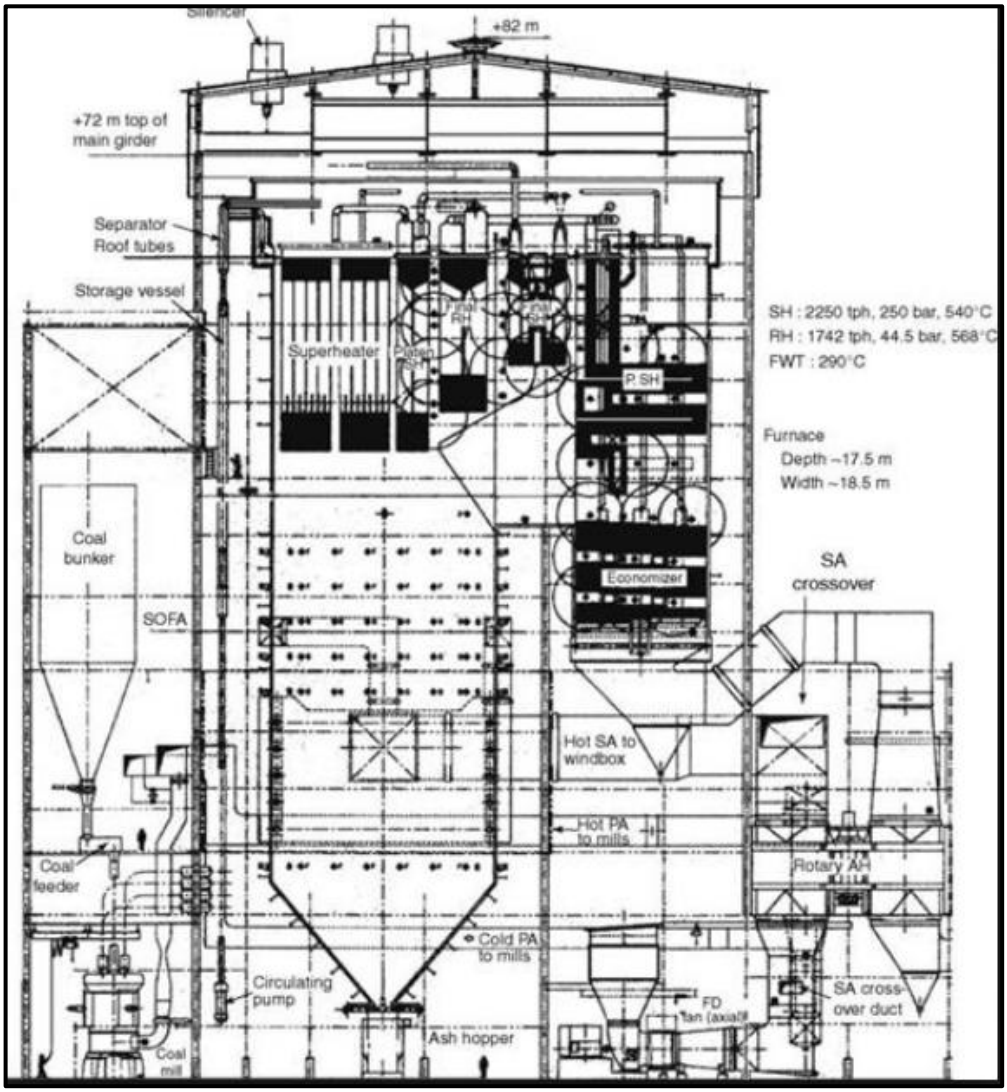
Gambar 2. 4 Skematik Boiler Circulating Fluidezed Bed (Ta'nezuk et al., 2018)

4.2.3.8 *Pulverized Coal (PC) Boiler*

Batubara sebelum masuk ke dalam furnace akan dilakukan penggerusan terlebih dahulu menjadi serbuk melalui peralatan yang disebut *coal mill*. *Boiler* jenis ini merupakan yang paling banyak dipasang pada pembangkit listrik, khususnya di Indonesia. Beberapa keunggulan yang didapat yaitu:

a. Mampu menggunakan beberapa jenis batubara.

b. Sangat sensitif atau merespon dengan cepat terhadap perubahan beban.
c. Menaikan efisiensi thermal.
d. Memiliki kemampuan untuk memasukan bahan bakar melalui burner dalam jumlah yang besar.



Gambar 2. 5 Skematik Boiler Pulverized Coal (Ta'nezuk et al., 2018)

2.2.3 *Boiler* PLTU Bengkayang

Boiler yang di operasikan pada PLTU Bengkayang menggunakan jenis boiler *Circulating Fluidized Bed* (*CFB Boiler*). Spesifikasi CFB boiler PLTU Bengkayang secara lebih detail dapat dilihat pada tabel dibawah ini:

Tabel 2. 1 Spesifikasi Boiler PLTU Bengkayang (Wuxi Huanguang Boiler Co.,Ltd, 2009)

Parameter	Keterangan
Pabrikan / *Manufacture*	Wuxi Huanguang Boiler Co.,Ltd
Tipe	*Circulating Fluidized Bed* (*CFB Boiler*).
Main stem flow	240 ton/hour
Main steam outlet pressure	9,8 Mpa.g.
Main steam outlet temperature	540°C
Feed water temperature	215 °C
Drum Pressure	8,96 Mpa.g
AH inlet air temperature	42 °C
AH outlet air temp. (PA/SA)	180 °C
Fuel consumption (calculated)	40 t/h
Coal Quality (Low heat value)	4000 kCal/kg
Thermal efficiency (LHV)	91 %

2.2.4 Nilai Kalor Batubara

Nilai kalor merupakan sebuah ukuran dari energi panas yang terdapat dalam batubara dan merupakan faktor penting dalam menetapkan nilai batubara. Hal ini menggambarkan jumlah panas yang mampu dibuang oleh setiap kilogram batubara saat dibakar secara menyeluruh. Dalam sistem metrik internasional (SI), nilai kalor batubara biasanya diukur dalam satuan kalori per kilogram (kcal/kg). Karakteristik fisik batubara meliputi nilai kalor, kandungan air, materi volatil, dan abu. Di sisi lain, sifat kimia batubara ditentukan oleh kandungan karbon, hidrogen, oksigen, dan sulfur. Nilai kalor batubara berbeda dari satu tambang ke tambang lainnya. Rincian nilai untuk berbagai jenis batubara tersedia dalam Tabel 1 di bawah ini. (Subagyo, 2018)

Tabel 2.2 GCV Untuk Berbagai Jenis Batubara (Subagyo, 2018)

Parameter	Lignit (Dasar Kering)	Batubara India	Batubara Indonesia	Batubara Afrika Selatan
GCV (kcal/kg)	4.500*	4.000	5.500	6.000

*GCV lignit pada ‗as received basis' adalah 2500-3000

2.2.5 Analisis Batubara

Ada dua metode umum yang digunakan untuk mengevaluasi batubara: analisis ultimate dan analisis proximate. Adapun analisis ultimate yaitu memeriksa semua unsur komponen batubara, baik dalam bentuk padat maupun gas, sedangkan analisis proximate hanya memperhatikan karbon tetap, materi volatil, kadar air, dan abu. Pada analisis ultimate membutuhkan peralatan laboratorium yang canggih dan dikerjakan oleh ahli kimia terlatih, sementara analisis proximate dapat dikerjakan dengan peralatan yang lebih sederhana. (Subagyo, 2018)

1. Analisis *Proximate*

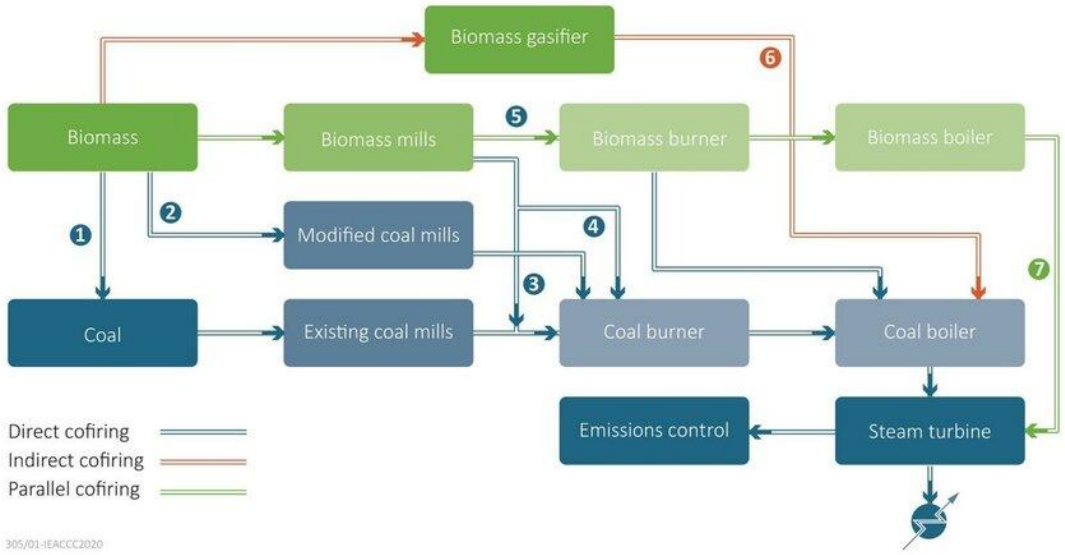
   Analisis proximate memberikan data mengenai presentase berat dari karbon tetap, materi volatil, abu, dan kadar air yang terkandung pada batubara. Dengan jumlah karbon tetap dan materi volatil secara langsung memengaruhi nilai panas batubara. Karbon tetap berperan sebagai kontributor utama panas selama pembakaran, sementara materi volatil yang tinggi menunjukkan kemudahan dalam menghidupkan bahan bakar. Kadar abu juga memiliki signifikansi dalam desain tungku, volume pembakaran, pengendalian polusi, dan pengelolaan sistem abu di tungku.

2. Analisis *Ultimate*

   Analisis ultimate mengevaluasi kandungan kimia elemen seperti karbon, hidrogen, oksigen, sulfur, dan lainnya. Hal ini bermanfaat untuk menentukan total udara yang diperlukan untuk pembakaran, serta volume dan komposisi gas hasil pembakaran. Adapun informasi ini sangat penting dalam menghitung suhu nyala dan merancang saluran gas buang, dll.

2.2.6 Studi Metode Operasi *Co-Firing* (Batubara dengan Biomassa)

Salah satu strategi untuk mengurangi konsumsi bahan bakar yang berasal dari fossil pada sebuah pembangkit listrik yaitu dengan memodifikasi skema atau pola operasi PLTU dengan konsep pembakaran bersama melalui cara mensubtitusi sebagian batubara dengan bahan bakar *renewable* seperti biomassa dan sebagainya. Subtitusi tersebut diharapkan mampu mengurangi emisi yang dihasilkan pada proses pembakaran yang terbawa oleh gas buang / flue gas. Metode tersebut saat ini dikenal dengan istilah *Co-Firing*, yakni proses pembakaran dengan menggunakan lebih dari satu jenis material bahan bakar dalam suatu sistem pembakaran yang sama. Beberapa opsi pemanfaatan biomassa dan skema *Co-Firing* yang dilakukan pada pembangkit listrik dapat diamati pada gambar di bawah ini:



Gambar 2. 6 Opsi Skema Co-Firing (Livingston, 2016)

Teknologi yang dapat dilakukan dalam proses *Co-Firing* sesuai gambar diatas dijelaskan secara singkat sebagai berikut:

Dalam *Co-Firing* langsung, batubara dan biomassa dibakar dalam *Boiler* yang sama. Biomassa dicampur terlebih dahulu dengan batubara dalam sistem penanganan dan pengangkutan batubara yang ada, dengan rasio *Co-Firing* yang sederhana (biasanya kurang dari 10% biomassa berdasarkan energi), kemudian digiling bersama dan dibakar dalam sistem pembakaran batubara yang ada (Opsi 1

dalam Gambar 2.4). Ini merupakan pendekatan *Co-Firing* yang paling populer karena dapat diterapkan secara relatif cepat dengan investasi modal minimal dan sedikit modifikasi. Investasi utama adalah penyimpanan biomassa dan sistem penanganan I. Pada Opsi 2, biomassa digiling di pabrik batubara yang sudah ada dan dimodifikasi secara terpisah, dan dicampur dengan batubara dalam sistem pembakaran batubara yang sudah ada. Biomassa dapat digiling di mill yang telah di modifikasi untuk meningkatkan rasio *Co-Firing*; hingga 50% berbasis energi dapat dicapai. Setelah ini, ada beberapa cara untuk melakukan pembakaran biomassa. Pada Opsi 3, biomassa diinjeksikan ke dalam pipa yang mengalirkan batubara ke burner. Pada Opsi 4, biomassa disuntikkan ke dalam pembakar batubara yang dimodifikasi. Pada Opsi 5, biomassa disuntikkan ke dalam pembakar biomassa khusus yang baru. Opsi-opsi ini melibatkan tingkat investasi modal yang jauh lebih tinggi dibandingkan Opsi 1 dan 2. Dalam *Co-Firing* tidak langsung (Opsi 6), biomassa digasifikasi dalam gasifier terpisah, dan bahan bakar gas dibakar bersama batubara dalam *Boiler* batubara yang sama. Sistem *Co-Firing* paralel (Opsi 7) memiliki *Boiler* terpisah untuk batubara dan biomassa. Baik *Co-Firing* tidak langsung maupun paralel memungkinkan biomassa dengan rasio tinggi untuk dibakar dan memiliki fleksibilitas bahan bakar yang lebih besar.

Dari beberapa opsi teknologi *Co-Firing* diatas, dapat disimpulkan dan diamati dalam tabel berikut:

Tabel 2. 2 Perbandingan Opsi Teknologi Co-Firing

Opsi Teknologi *Co-Firing*	**Uraian singkat**	**Keterangan**
Direct Co-Firing	Biomassa dicampur melalui peralatan grinding, selanjutnya masuk ke *feeder* (terpisah atau sama), dicampur dengan batubara ke dalam ruang bakar yang sama untuk dilakukan proses pembakaran.	Tidak ada investasi biaya peralatan khusus, metode ini yang paling banyak diadopsi oleh *Pulverized coal Boiler*
Indirect Co-Firing	Memerlukan peralatan tambahan seperti gasifier biomassa, untuk melakukan gasifikasi menjadi syngas kemudian masuk ke *Boiler* batubara	Kelebihan metode ini, dengan proses pemurnian syngas melalui metode gasifikasi akan meminimalkan dampak pencemaran dari pembakaran langsung
Paralel Co-Firing	Uap yang dihasilkan dari *Boiler* biomassa diumpankan ke dalam sistem uap *Boiler* batubara eksisting	Memerlukan investasi pembangunan *Boiler* berbahan bakar biomassa yang terpisah

2.2.7 Efisiensi *Boiler*

Secara umum definisi dari efisiensi adalah suatu usaha yang dilakukan dengan menggunakan input yang seminimal mungkin untuk menghasilkan iutput semaksimal mungkin. Jika dikaitkan dengan peralatan boiler pada sebuah pembangkit listrik, maka efisiensi boiler yaitu kemampuan kerja boiler yang bisa

diperoleh dengan membandingkan antara energi kimia yang dimasukan terhadap energi panas yang dikeluarkan untuk menghasilkan uap dengan nilai tekanan dan nilai temperatur yang dikehendaki.

Efisiensi *Boiler* adalah aspek penting dari operasi *Boiler* dan melibatkan analisis berbagai komponen yang berkontribusi terhadap kinerja keseluruhan sistem. Dua jenis efisiensi yang biasanya dilakukan evaluasi adalah efisiensi pembakaran dan efisiensi termal.

4.2.3.8 Efisiensi Pembakaran

Efisiensi pembakaran mengukur efektivitas burner dalam membakar bahan bakar.

Beberapa parameter kunci yang perlu diperhatikan antara lain:

i. Tingkat oksigen (O_2) berlebih

   Peningkatan kadar oksigen berlebih dalam gas buang menunjukan pembakaran yang lebih lengkap, tetapi terlalu banyak dapat menunjukan ketidakefisienan.

ii. Bahan bakar yang tida terbakar

   Adanya bahan bakar yang tidak terbakar dalam gas buang menunjukan pembakaran yang tidak sempurna. Seiring dengan peningkatan kadar udara berlebih, jumlah bahan bakar yang tidak terbakar biasanya akan menurun, hal ini dapat menyebabkan kehilangan entalpi.

Oleh karena itu sangatlah penting untuk menjaga keseimbangan antara kehilangan bahan bakar yang tidak terbakar dan kerugian entalpi. Efisiensi pembakaran juga berbeda dengan jumlah bahan bakar yang dibakar. Efisiensi pembakaran pada bahan bakar padat lebih rendah dibandingkan bahan bakar gas dan bahan bakar cair.

4.2.3.8 Efisiensi Termal

Efisiensi termal berkaitan dengan efektivitas perpindahan panas dalam *Boiler*, khususnya seberapa efektif energi panas yang di transfer dari proses pembakaran (sisi api) ke air (sisi air). Pembentukan jelaga dan kerak pada pipa *Boiler* menjadi faktor yang dapat mempengaruhi efisiensi termal secara signifikan, karena nantinya akan berpotensi menjadi lapisan isolasi yang mengurangi transfer panas.

Pengukuran efisiensi *Boiler* yang dipilih pada penelitian ini mengacu pada standar internasional yaitu "*The American Society of Mechanical Engineers"* (ASME) PTC 4 tentang "*Performance Test Code*". Berdasarkan standar internasional tersebut, perhitungan efisiensi *Boiler* dapat dilakukan melalui dua metode yaitu:

1. Metode Langsung (*Direct Method*)

   Analisis efisiensi *Boiler* dengan menggunakan metode ini yaitu membandingkan energi yang diperoleh dari fluida kerja (air dan uap) terhadap energi yang terdapat pada bahan bakar *Boiler*. Metode ini juga disebut dengan metode "input-output" sebab hanya membutuhkan output (uap) dan input panas (bahan bakar) untuk melakukan evaluasi efisiensi. Rumus metode ini yaitu:

   $$Boiler\ Efficiency\ (\eta) = \frac{\text{Heat Output}}{\text{Heat Input}}\ x\ 100 \qquad \textbf{(2.1)}$$

   atau

   $$Boiler\ Efficiency\ (\eta) = \frac{\text{Q x (H}-\text{h)}}{\text{q x Gross caloric value}}\ x\ 100 \qquad \textbf{(2.2)}$$

   Dimana:

   H : steam enthalpy kCal/kg)

   q : jumlah bahan bakar yang digunakan (kg/hr)

   Q : jumlah steam yang dihasilkan per jam (kg/hr)

   GCV : nilai panas kotor bahan bakar (Kcal/kg)

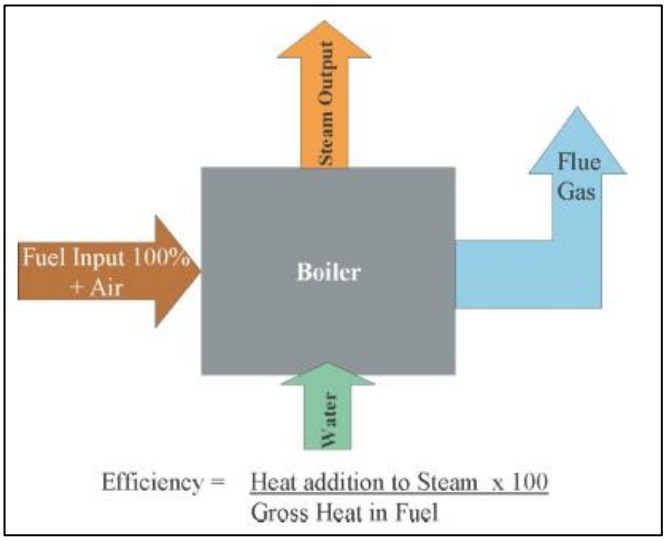
   h : feed water enthalpy (kCal/kg)

   Beberapa parameter yang harus dipantau untuk perhitungan efisiensi *Boiler* dengan menggunakan metode langsung yaitu:

   i. Jumlah steam / uap yang dihasilkan per jam (Q) dalam satuan kg/jam.

ii. Jumlah bahan bakar yang digunakan per jam (q) dalam kg/jam.
iii. Tekanan kerja dalam kg/cm^2.g dan suhu lewat panas dalam ^oC jika ada.
iv. Suhu air umpan dalam ^oC.
v. Jenis bahan bakar dan nilai panas kotor bahan bakar (Gross Caloric Value) dalam kCal/kg bahan bakar

Jika diilustasikan sebuah sketsa sederhana, perhitungan efisiensi menggunakan metode langsung bisa dilihat pada gambar di bawah ini:

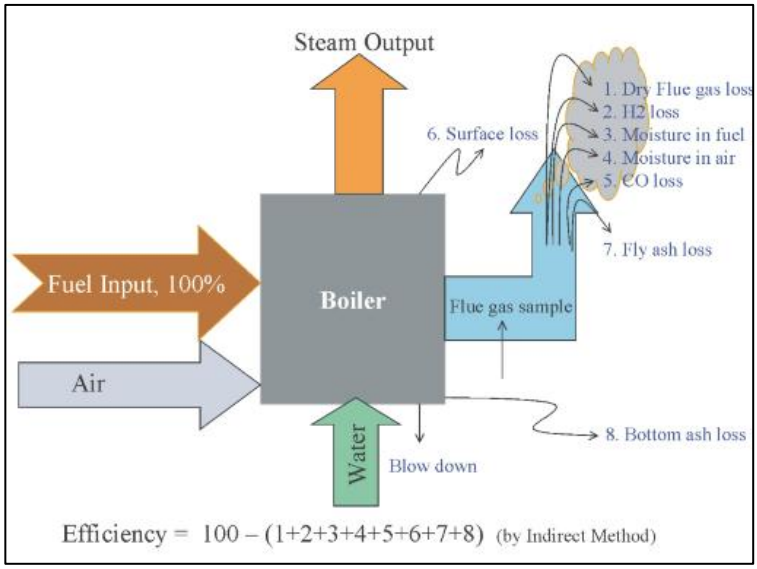


Gambar 2. 7 Skema Perhitungan Efisiensi *Boiler* Metode Langsung

2. Metode tidak langsung (*In-Direct Method*)

Menghitung efisiensi *Boiler* menggunakan metode langsung dinilai kurang akurat, terutama saat mengukut aliran bahan bakar (konsumsi batubara per jam dan juga pengukuran lainnya). Aliran uap, jumlah batubara yang dibakar dan jumlah panas batubara yang dilepaskan cukup sulit untuk dihitung secara akurat, yang menyebabkan hasil perhitungannya masih berupa rasio kasar. Sehingga terdapat metode yang memperhitungkan rugi-rugi panas (*Heat Loss Method*) pada *Boiler*. Kerugian dari metode langsung dapat diatasi dengan metode ini. Efisiensi diperoleh dengan mengurangkan fraksi kehilangan panas dari 100.

Perhitungan efisiensi *Boiler* melalui metode ini, beberapa data yang perlu disiapkan yaitu *coal fired Boiler* dan *fuel analysis*. *Coal fired Boiler* menginformasikan jumlah bahan bakar yang masuk tiap jam, jumlah uap yang dihasilkan tiap jam, tekanan dan suhu *steam output,* suhu *feed water*, kandungan CO_2 dan CO, suhu gas buang, suhu lingkungan, kelembapan udara lingkungan, suhu permukaan *Boiler*, kecepatan angin disekitar *Boiler*, total luas permukaan *Boiler*, nilai dari *gross caloric value bottom ash* dan *fly ash*. Sedangkan pada data *fuel analysis* terdapat data mengenai kadar abu, karbon, hidrogen, nitrogen oksigen, sulfur dan nilai HHV dari bahan bakar yang digunakan (batubara).
Kelebihan dari metode ini yaitu kesalahan dalam perhitungan tidak berdampak perubahan yang signifikan dalam analisis perhitungan efisiensi *Boiler*.



Gambar 2. 8 Skema Perhitungan Efisiensi *Boiler* Metode Tidak Langsung

Secara matematis, rumus metode tidak langsung adalah sebagai berikut:

$$Efisiensi\ Boiler\ (\eta) = 100 - (HL1 + L2 + L3 + L4 + L5 + L6 + L7 + L8) \quad \textbf{(2.3)}$$

Masing-masing *heat losses* (L) pada persamaan diatas dijelaskan sebagai berikut:

L1 = Kerugian karena gas cerobong yang kering (*Heat loss due to dry flue gas*)

$$L1 = \frac{\text{m x Cp x (Tf}-\text{Ta)}}{\text{GCV fuel}}\ x\ 100 \quad \textbf{(2.4)}$$

Dimana:

m : massa dari gas buang kering (kg/kg fuel)

Cp : kalor spesifik dari gas buang kering (kCal/kg ^{o}C)

GCV : Nilai kalor batubara (kCal/kg)

Tf : Temperatur gas buang (^{o}C)

Ta : Temperatur ambient (^{o}C)

L2 = Kerugian karena penguapan air yang terbentuk karena H_2 dalam bahan bakar (*Heat loss due to H_2 in fuel*)

Pembakaran H_2 menimbulkan kehialnagn panas, dan hasil pembakarannya adalah air. Air diubah menjadi uap, dan ini membawa panas laten (Patro, 2016)

$$L2 = \frac{9 \text{ x } H2 \text{ x } [584+Cp\ (Tf-Ta)]}{GCV\ fuel}\ x\ 100 \qquad \textbf{(2.5)}$$

Dimana:

H2 : jumlah atom hydrogen dalam bahan bakar (kg/kg fuel)

Cp : Kalor spesifik dari superheated steam (kCal/kg^{o}C)

584 : Panas latent yang berhubungan dengan tekanan parsial dari uap air (kCal/kg)

L3 = Kerugian karena penguapan kadar air dalam bahan bakar (*Heat loss owing to the moisture present fuel*)

Bahan bakar mengalir sebagai uap yang sangat panas dengan kelembapan yang kemudian masuk di *Boiler*. Selain itu, kehilangan kelembapan ini dipersiapkan sebagai panas praktis untuk mengubah kelembapan menjadi titik didih dan sebagai uap super panas untuk mencapai suhu gas buang serta panas laten dari penguapan kelembapan. Kehilangan kelembapan ini dapat diuku sebagai berikut:

$$L3 = \frac{M \text{ x } [584+Cp\ (Tf-Ta)]}{GCV\ fuel}\ x\ 100 \qquad \textbf{(2.6)}$$

Dimana:

M : kelembapan dalam bahan bakar (kg/kg fuel)

L4 = Kerugian akibat kelembapan yang ada di udara (*Heat loss owing to the moisture present in the air*)

Uap dalam bentuk kelembapan pada udara yang masuk, dipanaskan secara berlebihan saat melewati *Boiler*. Sementara itu, panas ini yang naik melalui cerobong harus dianggap sebagai kehilangan *Boiler*.

$$\text{L4} = (\text{AAS x f humadity x Cp (Tf} - \text{Ta)])/(GCV fuel)}\ x\ 100 \qquad \textbf{(2.7)}$$

Dimana:

AAS : Massa aktual udara (kg/kg fuel)

F humadity : setara dengan kg air/kg udara kering adalah faktor kelembapan, dengan nilai 0,024

L5 = Kerugian akibat kelembapan yang ada di udara (*Heat loss due to incomplete combustion*)

Produk yang dihasilkan oleh pembakaran parsial dicampur dengan O_2 dan dibakar kembali dengan pelepasan energi lebih lanjut. Produk yang berbeda termasuk H_2, CO dan hidrokarbon lainnya dan biasanya ditemukan dalam gas cerobong *Boiler*. CO adalah satu-satunya gas yang konsentrasinya dapat diukur dengan tepat dalan penyelidikan *Boiler*.

$$\text{L5} = \frac{\%\text{CO x C}}{\%CO\ x\ \%CO2}\ x\ \frac{5744}{GCV\ Fuel} x\ 100 \qquad \textbf{(2.8)}$$

Dimana:

C : Kandungan karbon dalam bahan bakar (kg/kg)

CO_2 : Volume CO_2 aktual dalam gas buang (%)

CO : Volume CO dalam gas buang yang keluar dari ekonomizer (%)

L6 = Kerugian akibat radiasi dan konveksi (*Heat loss due to radiation and convection)*

Kehilangan panas *Boiler* akibat radiasi dan konveksi dari badan *Boiler* ke area sekitar *Boiler* house.

$$L6 = 0.548 \times \left[\left(\frac{Ts}{55.55}\right)^4 - \left(\frac{Ta}{55.55}\right)^4\right] + 1.957 \times (Ts - Ta)^{1.25} \times \sqrt{\frac{196.85 \times Vm + 68.9}{68.9}} \quad \textbf{(2.9)}$$

Dimana:

Ta : Suhu lingkungan (K)

Vm : Kecepatan angin (m/s)

Ts : Suhu Permukaan (K)

L7 = Kerugian akibat karbon yang tidak terbakar dalam *fly ash* (*Heat loss due to unburnt in fly ash)*

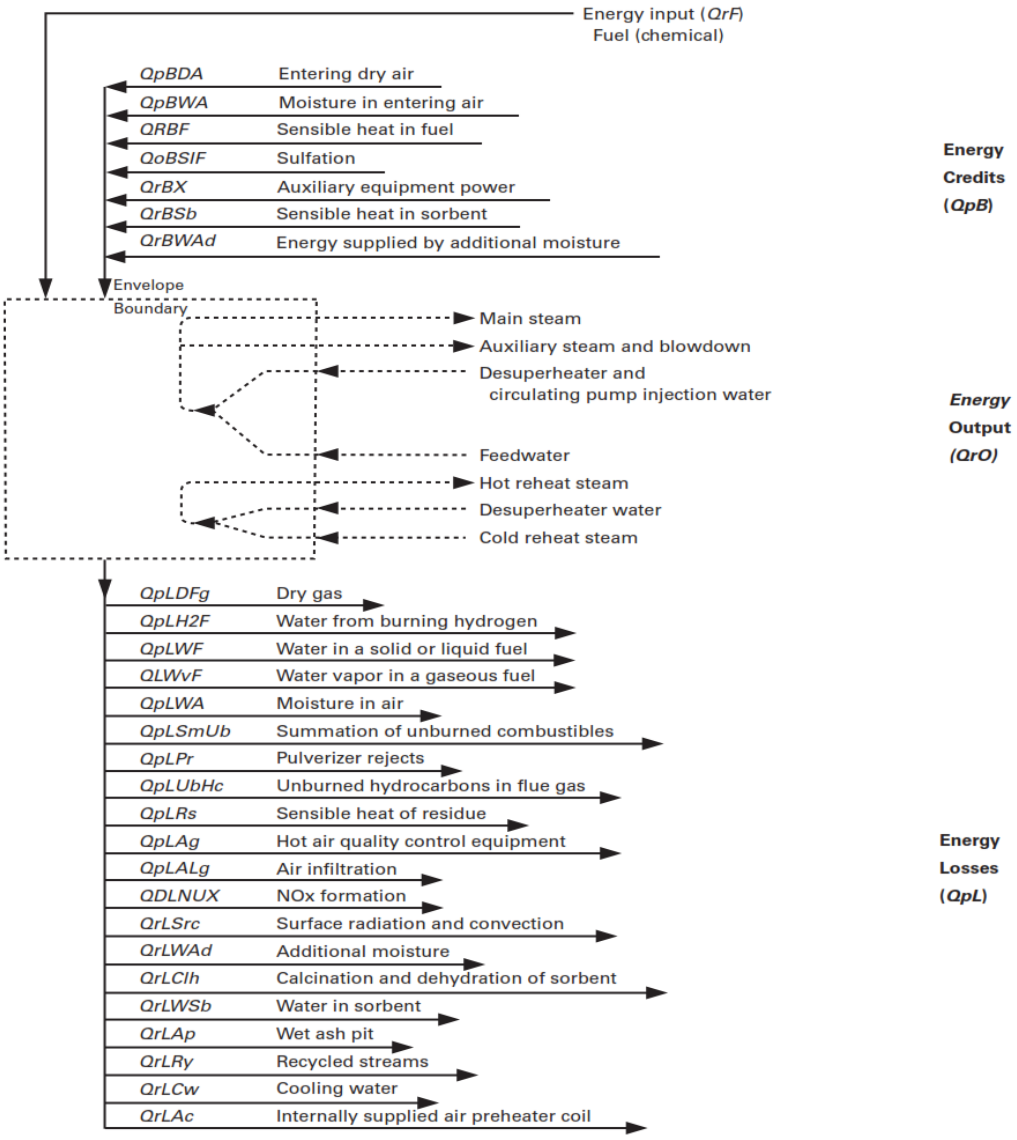
Sejumlah kecil karbon akan hilang dalam abu, dan ini mengakibatkan potensi kehilangan panas dari bahan bakar. Untuk menghitung kehilangan panas ini, sampel abu harus dianalisis untuk kandungan karbonnya. Jumlah abu yang dihasilkan per unit juga harus diidentifikasi. Kehilangan panas akibat abu terbang yang tidak terbakar dapat ditentukan dengan rumus berikut:

$$L7 = \frac{\text{Total fly ash x GCV fly ash}}{Total\ fuel\ burnt\ x\ GCV\ Fuel} x\ 100 \quad \textbf{(2.10)}$$

L8 = Kerugian panas akibat karbon yang tidak terbakar dalam *bottom ash* (*Heat loss due to unburnt in bottom ash)*

$$L8 = \frac{\text{Total bottom ash x GCV bottom ash}}{Total\ fuel\ burnt\ x\ GCV\ Fuel} x100 \quad \textbf{(2.11)}$$

Pengukuran efisiensi *Boiler* diatas, secara rinci dilakukan oleh Unit yang memiliki fungsi pada pengoperasian pembangkit (PLTU) di lingkungan PT PLN (Persero). Untuk memudahkan ilustrasi perihal pengukuran efisiensi *Boiler*, berikut *Energy Balance (Losses) method*:



Gambar 2. 9 Bagan *Boiler* Efisiensi (ASME PTC 4.1, 2008).

2.2.8 Faktor – Faktor yang Mempengaruhi Efisiensi *Boiler*

Efisiensi *Boiler* sangat penting dalam sistem pembangkit energi dan pemanas karena berhubungan langsung dengan kinerja dan biaya operasional. Beberapa faktor utama yang mempengaruhi efisiensi *Boiler* adalah sebagai berikut:

2.2.8.1 Kualitas Bahan Bakar

Kualitas bahan bakar sangat mempengaruhi efisiensi *Boiler*. Bahan bakar yang tidak berkualitas atau memiliki kadar air dan sulfur yang tinggi dapat

menyebabkan pembakaran yang tidak sempurna, menghasilkan lebih banyak abu dan gas buang, serta menurunkan efisiensi.

2.2.8.2 Pengaturan Pembakaran

Cara bahan bakar dibakar di dalam *Boiler* mempengaruhi efisiensi. Pembakaran yang tidak sempurna akan menyebabkan kerugian energi. Pengaturan yang tepat dari rasio udara ke bahan bakar dan suhu pembakaran dapat meningkatkan efisiensi.

2.2.8.3 Desain *Boiler*

Desain dan konstruksi *Boiler*, termasuk ukuran, material, dan konfigurasi, mempengaruhi kemampuannya untuk menghasilkan energi secara efisien. *Boiler* yang dirancang dengan baik akan memiliki transfer panas yang lebih baik dan lebih sedikit kehilangan energi.

2.2.8.4 Pemeliharaan dan Perawatan

Boiler yang tidak terawat dengan baik dapat mengalami penurunan efisiensi. Pengendalian korosi, pembersihan berkala dari kerak dan kotoran, serta pemeriksaan komponen secara rutin adalah penting untuk menjaga efisiensi.

2.2.8.5 Sistem Kontrol dan Otomasi

Sistem kontrol yang canggih dapat membantu mengoptimalkan kinerja *Boiler* dengan menyesuaikan parameter operasi sesuai dengan kebutuhan. Kontrol otomatis dapat mengatur suhu, tekanan, dan aliran bahan bakar untuk meningkatkan efisiensi.

2.2.8.6 Suhu dan Tekanan Operasi

Boiler yang beroperasi pada suhu dan tekanan yang tidak optimal dapat mengalami penurunan efisiensi. Menjaga suhu dan tekanan pada level yang tepat sesuai dengan spesifikasi *Boiler* adalah kunci untuk efisiensi.

2.2.8.7 Kualitas Air

Air yang digunakan dalam *Boiler* harus memiliki kualitas yang baik. Air yang mengandung mineral tinggi atau zat pengotor lainnya dapat menyebabkan pembentukan kerak dan korosi, yang pada gilirannya akan menurunkan efisiensi.

2.2.8.8 Sistem Pengeluaran Gas Buang

Efisiensi *Boiler* juga dipengaruhi oleh sistem pengeluaran gas buang. Kehilangan panas melalui gas buang dapat mengurangi efisiensi. Sistem economizer atau heat recovery yang baik dapat membantu memanfaatkan kembali panas dari gas buang untuk meningkatkan efisiensi.

2.2.8.9 Isolasi *Boiler*

Isolasi termal yang baik di sekitar *Boiler* membantu mengurangi kehilangan panas dan meningkatkan efisiensi. *Boiler* yang tidak terisolasi dengan baik dapat kehilangan banyak energi dalam bentuk panas.

2.2.8.10 Kondisi Lingkungan

Kondisi lingkungan sekitar seperti suhu udara dan kelembapan juga dapat mempengaruhi efisiensi *Boiler*. Misalnya, udara dingin dapat mempengaruhi suhu pembakaran dan efisiensi secara keseluruhan.

2.2.9 Diagram Sankey

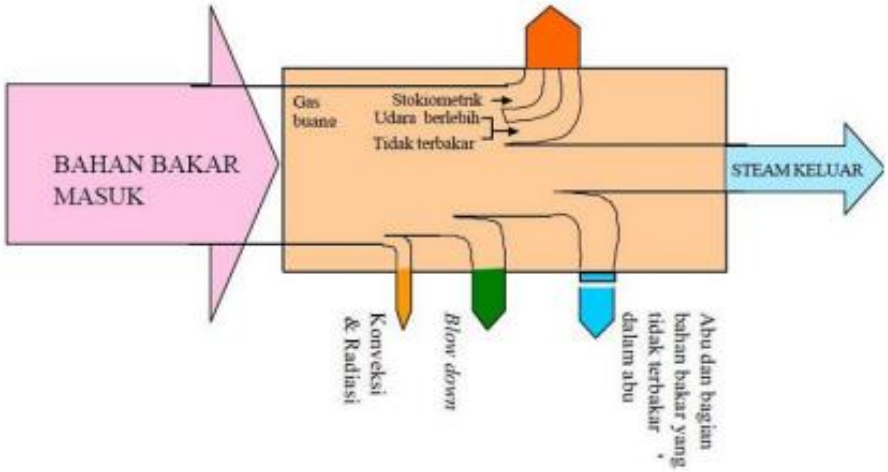
Diagram Sankey pada heat balance adalah alat visual yang digunakan untuk menggambarkan aliran energi dalam sebuah sistem. Diagram ini memberikan representasi grafis dari bagaimana energi, dalam bentuk panas atau sumber energi lainnya, dipindahkan atau dialokasikan di dalam sistem. Proses pembakaran dalam *Boiler* dapat digambarkan dalam bentuk diagram alir energi. Diagram Sankey biasanya digambarkan dengan aliran energi yang ditunjukkan oleh aliran garis atau panah dengan ketebalan yang proporsional dengan jumlah energi yang dialirkan. Setiap aliran energi terhubung antara input, proses, kehilangan, dan output. Panah yang lebih tebal menunjukkan aliran energi yang lebih besar, sedangkan panah yang

lebih tipis menunjukkan aliran energi yang lebih kecil. Dengan cara ini, Diagram Sankey memberikan gambaran yang jelas dan langsung mengenai bagaimana energi digunakan, disalurkan, dan hilang dalam sistem, memungkinkan identifikasi efisiensi energi dan potensi perbaikan.

Diagram Sankey untuk heat balance sangat berguna dalam analisis sistem energi karena memberikan representasi visual yang mudah dipahami tentang bagaimana energi dipindahkan dan digunakan, serta mengidentifikasi area di mana efisiensi bisa ditingkatkan.

Diagram sankey merupakan keseimbangan energi total yang masuk *Boiler* terhadap yang meninggalkan *Boiler* dalam bentuk yang berbeda. Gambar dibawah ini memberikan penjelasan berbagai kehilangan yang terjadi untuk pembangkit listrik berbahan bakar batubara (Hendrayati, 2012).

Dengan diagram sankey dapat diidentifikasi kehilangan panas karena gas buang, kehilangan panas karena uap dalam gas buang, kehilangan panas karena kandungan air dalam bahan bakar, kehilangan panas karena kandungan air dalam udara, kehilangan panas karena bahan bakar belum terbakar, kehilangan panas karena radiasi dan konveksi. Uji efisiensi *Boiler* dengan metode tidak langsung dapat membantu dalam menemukan penyimpangan infisiensi *Boiler*.



Gambar 2. 10 Diagram Sankey (Hendrayati, 2012).