

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU)

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) merupakan salah satu dari banyaknya jenis pembangkit listrik yang memanfaatkan energi kinetik dari uap untuk menghasilkan energi listrik. Bahan bakar yang digunakan PLTU bermacam-macam, terutama batu bara dan minyak bakar, serta *Marine Fuel Oil* (MFO) untuk *start up* awal. PLTU merupakan pembangkit listrik yang paling banyak digunakan dalam skala global, dengan persentase mencapai 86% dari total pembangkit listrik (Abbas et al., 2020).

Terdapat kelebihan dan kekurangan dari pembangkit listrik tenaga uap (PLTU). Kelebihan PLTU ialah memiliki kapasitas listrik yang besar dan stabil, dapat beroperasi secara berkelanjutan, dapat menggunakan berbagai macam bahan bakar, dan memiliki biaya operasional yang relatif rendah. Lalu kekurangan dari PLTU sendiri yaitu membutuhkan lahan yang luas, menghasilkan emisi gas rumah kaca (GRK) dan polusi yang tinggi, membutuhkan air pendingin yang banyak, dan memiliki efisiensi yang rendah (Wulandari and Basri, 2022).

2.2 Jenis-jenis Pembangkit Listrik Tenaga Uap

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) memiliki berbagai macam jenis yang berbeda tergantung pada bahan bakar yang digunakan dan teknologi yang diterapkan.

2.2.1 PLTU Batu bara

Jenis pembangkit ini mengandalkan batu bara sebagai bahan bakar utamanya yang memiliki nilai kalor tertentu. Nilai kalor batu bara menunjukkan seberapa banyak energi yang dapat dihasilkan dari pembakarannya. Nilai kalor batu bara dipengaruhi oleh kandungan karbon, hidrogen, oksigen, nitrogen, belerang, dan abu (*ash*) yang ada di dalamnya. Semakin tinggi kandungan karbon dan hidrogen, semakin tinggi pula nilai kalor batu bara (Hariana, Putra and Kuswa, 2020).

2.2.2 PLTU Gas

PLTU gas memanfaatkan gas alam sebagai sumber energi (Ratu, 2021). Jika dibandingkan dengan pembangkit listrik batu bara, pembangkit listrik yang menggunakan gas alam cenderung menghasilkan emisi yang lebih ramah lingkungan (Partogi, Kusuma and Astawa, 2018). Hal ini dikarenakan mekanisme yang digunakan dalam pembangkit listrik tenaga gas (PLTG) sangat berbeda proses pembangkitan energi listrik menggunakan batu bara (Upadana Putra, Wijaya Kusuma and Sucipta, 2018).

2.2.3 PLTU Nuklir

PLTU nuklir berbeda secara mendasar dengan menggunakan reaksi nuklir untuk menghasilkan panas yang kemudian digunakan untuk menggerakkan turbin yang di *couple* dengan generator (Suhaemi, 2016). Perbedaan PLTN dengan PLTU lainnya ialah sumber panas yang digunakan, di mana PLTN menggunakan uranium.

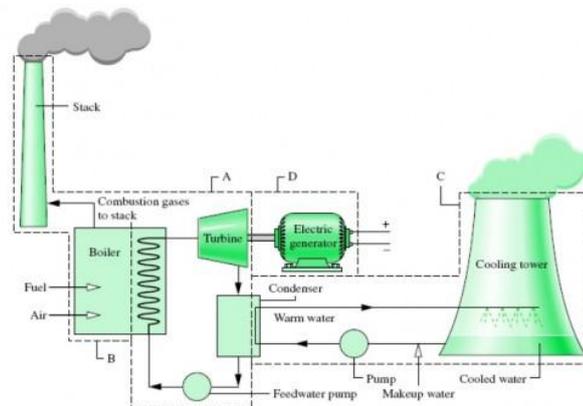
2.2.4 PLTU Biomassa

PLTU biomassa atau yang biasa disebut *co-firing powerplant* menggunakan bahan bakar organik seperti serbuk kayu atau limbah pertanian (Nazruddin, 2014).

Lalu PLTU geothermal memanfaatkan panas bumi dari dalam bumi sebagai sumber energi utama (Meilani and Wuryandani, 2010). Panas yang dihasilkan dari pembakaran biomassa akan menghasilkan uap dalam *boiler*. Uap ini kemudian ditransfer ke turbin yang nantinya akan menggerakkan generator untuk menghasilkan energi listrik.

2.3 Sistematika Pembangkit Listrik Tenaga Uap

Pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) adalah salah satu jenis pembangkit listrik yang menggunakan uap air bertekanan tinggi atau *high steam pressure* untuk menjalankan turbin uap yang di *couple* dengan generator untuk menghasilkan energi listrik.



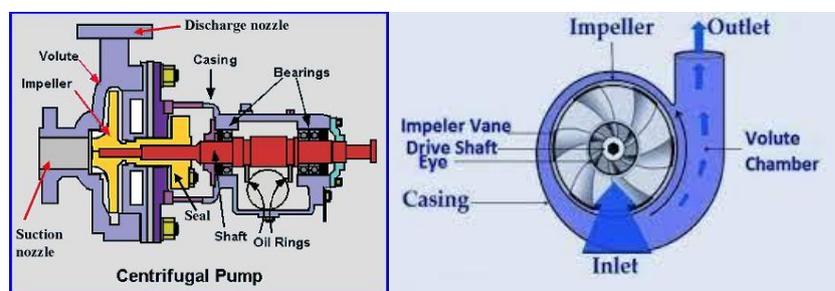
Gambar 2.1 Komponen Sistem PLTU Sederhana
Sumber: (Dzulqornain, 2015)

2.3.1 Pompa Umpa (*Feed Pump*)

Pompa umpa (*feed pump*) pada pembangkit listrik tenaga uap berfungsi untuk mendorong dan mengalirkan air dari kondensor menuju *boiler* untuk kemudian dilakukan pembakaran dan proses penguapan (Li et al., 2019). Pompa umpa juga berperan dalam mengatur tekanan dan suhu air yang masuk ke *boiler* agar sesuai dengan spesifikasi operasi. Jenis pompa umpa yang umum digunakan

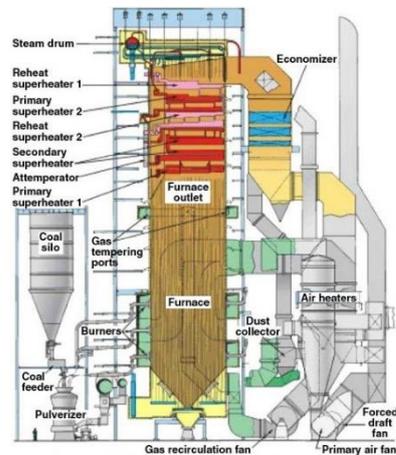
pada PLTU adalah pompa sentrifugal, yang memiliki karakteristik aliran yang stabil dan efisiensi yang tinggi.

Komponen utama pompa sentrifugal adalah *impeller*, *casing*, *shaft*, *seal*, dan *bearing*. *Impeller* adalah bagian yang berputar dan memiliki sudu-sudu yang berfungsi untuk memberikan energi kinetik dan tekanan pada air yang mengalir. *Casing* adalah bagian yang menutupi *impeller* dan berfungsi untuk mengarahkan aliran air dari *impeller* ke pipa keluar. *Shaft* adalah bagian yang menghubungkan *impeller* dengan motor penggerak dan berfungsi untuk mentransmisikan putaran dari motor ke *impeller*. *Seal* adalah bagian yang berfungsi untuk mencegah kebocoran air dari *casing* ke luar atau udara masuk ke dalam *casing*. *Bearing* adalah bagian yang berfungsi untuk menyangga *shaft* dan mengurangi gesekan antara *shaft* dan *casing*.



Gambar 2.2 Pompa Sentrifugal
Sumber: (Rachman, 2023)

Boiler feed pump merupakan jenis pompa yang digunakan untuk memompa air umpan yang sudah di hilangkan kadar oksigennya di *deareator* menuju *boiler* (Julianto et al., 2021). Pompa ini biasanya beroperasi dengan tekanan tinggi dan harus tahan terhadap temperatur air umpan yang tinggi, sekitar 160 sampai 210 derajat *celcius*.



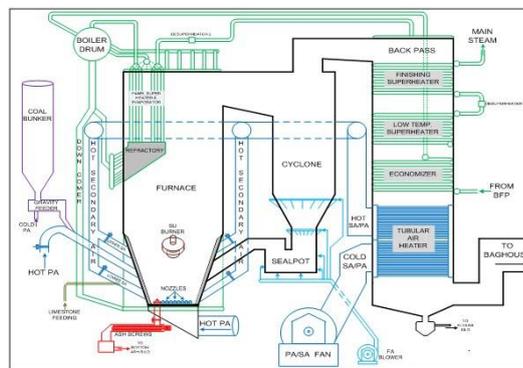
Gambar 2.4 *Pulverizer Boiler*
Sumber: (Feriyanto, 2015)

Kelebihan dari *boiler* PF diantaranya ialah energi panas yang dibangkitkan termasuk yang terbesar dari semua tipe *boiler* lain, pemeliharaan atau *maintenance* mudah karena sebagian peralatannya ada di luar *furnace*, cepat dalam manuver perubahan *load*, membutuhkan udara yang lebih sedikit, dan memiliki efisiensi pembangkit paling bagus. Dari kelebihan yang ada pada *boiler* tersebut terdapat kekurangannya juga, diantaranya ialah memiliki masalah lingkungan karena emisi gas buang yang dihasilkan, sedikit boros pada bahan bakarnya, memerlukan batu bara dengan spesifikasi khusus seperti *medium* dan *high rank coal*, ukuran batu bara harus sesuai dengan standar desain *boiler*, biaya instalasi yang terbilang cukup mahal, dan penggunaan energi listrik yang cukup besar terutama untuk peralatan pendukungnya *pulverizer/crusher* (Sitanggang and Supriyanto, 2021).

b. *Circulating Fluidized Bed (CFB) Boiler*

Circulating fluidized bed boiler atau *boiler* CFB adalah jenis *boiler* yang menggunakan aliran fluida yang berputar di dalam tungku untuk membakar bahan bakar padat seperti batu bara, biomassa, atau *refuse derived fuel* (RDF) dengan efisiensi dan emisi yang rendah (Salim, Mahardika and Taufiq, 2017). Aliran fluida

ini terdiri dari campuran udara, pasir, dan abu yang bergerak dengan kecepatan tinggi hingga membentuk suatu *bed*. Bahan bakar yang masuk ke dalam *bed* akan terbakar dengan merata dan sempurna karena terjadi kontak yang intens antara bahan bakar, udara, dan *bed material* (Utomo, Yohana and Halim, 2022). *Bed material* yang terbawa oleh aliran fluida akan terpisah oleh siklon dan dikembalikan ke tungku untuk menjaga sirkulasi yang stabil.



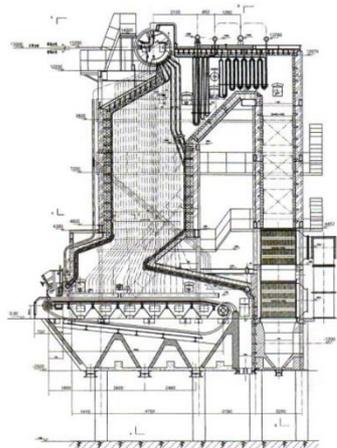
Gambar 2.5 *Circulating Fluidized Boiler*
Sumber: (Fahmy, 2011)

Boiler CFB memiliki keunggulan dibandingkan jenis *boiler* lainnya, yaitu irit bahan bakar, punya efisiensi energi yang baik, ramah lingkungan dikarenakan kandungan sulfur (SO_2) terserap oleh *limestone* (batu kapur) dan rendah emisi nitrogen dioksida (NO_2) sehingga ketika tidak menggunakan umpan *limestone* pun dengan kondisi idealnya *low rank coal* sudah mengandung senyawa *limestone* yang cukup besar hal inilah yang menjadi alasan CFB lebih baik dari PF, selanjutnya ialah tidak ada kerak yang tersisa, laju korosi yang rendah, dan hemat karena dapat menggunakan batu bara *low rank*. Namun, *boiler* CFB pun memiliki kekurangan seperti mahal biaya instalasi karena peralatan yang besar dan banyak, sulit dalam pemeliharaannya atau *maintenance*, membutuhkan udara yang lebih besar

dari semua tipe *boiler*, dan memiliki kadar *carbon* sisa (*unburned carbon*) yang terbesar (Santoso, 2021).

c. *Stoker Boiler*

Stoker boiler merupakan jenis *boiler* yang menggunakan rantai berjalan atau *chain grate* untuk membakar bahan bakar yang biasanya berupa padatan. *Boiler* ini bekerja dengan meniupkan udara panas dari bawah rantai sehingga bahan bakar padat seperti batu bara dapat dibakar. *Stoker boiler* juga dapat membakar berbagai jenis bahan bakar seperti limbah kayu, kulit kayu, batu bara dan bahkan sampah anorganik (Karim, Utomo and Yohana, 2023).



Gambar 2.6 *Stoker Boiler*
Sumber: (Yudisaputro, 2017)

Kelebihan tipe *boiler* ini adalah dapat merespon secara tiba-tiba perubahan *load* dan dapat membakar bahan bakar jenis apapun dalam jumlah besar sekaligus, murah dalam proses instalasinya, *maintenance* yang sederhana, dan menghasilkan *ash* yang minim. Adapun kekurangan dari *stoker boiler* ialah keterbatasan *steam* atau uap yang dihasilkan, hanya untuk pembangkit yang dengan daya kecil, efisiensi yang rendah dari semua tipe *boiler*, dan permasalahan *overheating* pada *traveling grate* karena sisipan bahan bakar (Idris et al., 2022).

2.3.3 Turbin Uap (*Steam Turbine*)

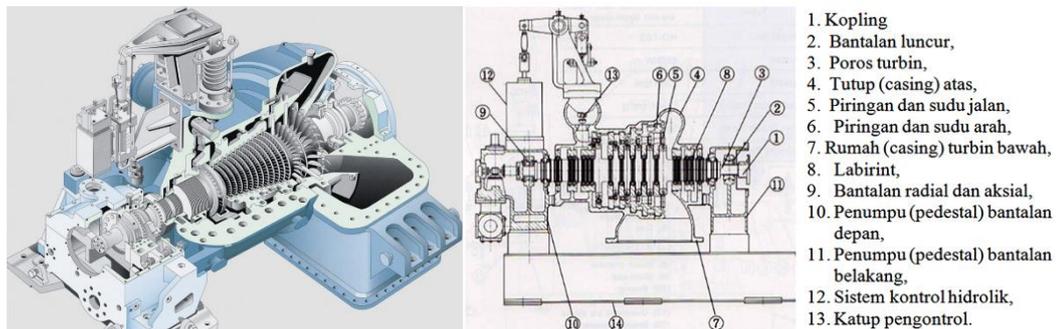
Turbin uap atau *steam turbine* merupakan sebuah alat yang dapat mengubah energi panas dari uap air menjadi energi mekanik dalam bentuk putaran poros (Setiawan, Melkias and Slameto, 2022). Turbin uap dapat digunakan untuk menggerakkan berbagai macam mesin, seperti generator listrik, pompa, kipas, kompresor, dan kapal. Turbin uap juga memiliki beberapa kelebihan, diantaranya ialah efisiensi energi yang tinggi, kecepatan rpm yang tinggi, kehalusan kerja, dan perawatan yang mudah (Hadi, 2021). Namun, dari kelebihan itu terdapat beberapa kekurangan, seperti biaya pembuatan dan instalasi yang mahal, kebisingan yang tinggi, dan kebutuhan air yang besar (Apriandi and Mursadin, 2016).

Prinsip kerja turbin uap yaitu mula-mula uap air yang dipanaskan di dalam *boiler* dengan tekanan dan suhu tinggi sehingga uap air tersebut menjadi *superheat steam* lalu dialirkan ke dalam turbin melalui pipa. *Superheat steam* tersebut kemudian melewati sudu-sudu turbin yang berputar dengan kecepatan tinggi. *Superheat steam* tersebut memberikan gaya dorong pada tiap sudu-sudu turbin, sehingga menghasilkan torsi pada poros turbin. *Superheat steam* yang keluar dari turbin berubah menjadi uap jenuh yang kemudian masuk ke dalam kondensor, yang di mana uap jenuh tersebut dikondensasikan atau didinginkan menggunakan air yang mengalir dari *cooling tower* melalui pipa-pipa agar uap jenuh tersebut berubah menjadi cair kembali. Air cair tersebut kemudian dipompa oleh *condensate water pump* masuk menuju *deaerator* dan kembali ke *boiler* melalui *boiler feed pump* untuk dijadikan uap kembali atau *superheat steam* (Siregar, 2013).

Menurut Edy Saputro & Aqli Mursadin (2021) turbin uap atau *steam turbine* terdiri dari beberapa bagian utama, diantaranya ialah:

- a. *Bearing* (bantalan), komponen ini berfungsi untuk menyangga rotor agar dapat lebih stabil/lurus posisinya. Sehingga ketika didalam casing, rotor dapat berputar dengan bebas dan aman.
- b. *Main stop valve* (MSV) merupakan sebuah katup yang bekerja dengan cara menutup dengan cepat. MSV ini berfungsi untuk menutup aliran *steam* dari *boiler* ke turbin dan hanya akan bekerja dengan cara membuka secara penuh dan menutup secara menyeluruh.
- c. *Governor valve* adalah sebuah katup yang bekerja untuk mengontrol kecepatan aliran *steam* ke turbin agar dapat mengendalikan putaran / rotasi si turbin uap.
- d. *Reheat stop valve*, berfungsi untuk memblokir aliran *steam* dengan cepat dari *reheater* ke *intermediate pressure* turbin apabila sistem tersebut dalam keadaan berbahaya.
- e. *Intercept valve* bekerja dengan cara mengatur putaran / rotasi pada *intermediate pressure* turbin dan membatasi putarannya pada batas tertentu.
- f. Katup ekstraksi satu arah adalah salah satu katup yang berfungsi untuk mencegah terjadinya *over speed* yang kemungkinan dialami oleh turbin. Hal yang dapat menjadi penyebabnya ialah aliran balik uap ekstraksi dari pemanas awal ke turbin atau *water induction* di turbin uap.

- g. Katup ventilasi, bekerja sebagai penyambung saluran MSV dengan *high pressure* (HP) turbin, RSV dengan *low pressure* (LP) turbin, dan LP turbin dengan kondensor.
- h. Katup drain berfungsi untuk membersihkan saluran pipa-pipa uap dari air. Bila terdapat air di dalam saluran uap, maka akan mengakibatkan *water damage*, korosi, dan *water hammer*.
- i. *Turning gear*, memiliki fungsi untuk memutar poros / sudu-sudu turbin pada saat *start* awal dan pada saat *shutdown*.
- j. *High pressure bypass* adalah salah satu katup yang cara kerjanya mengalirkan *steam* dari *superheater* ketika turbin mengalami *trip* atau belum mulai bekerja. *Steam* langsung dialirkan ke *reheater* dan kemudian mengalami pemanasan ulang.
- k. *Low pressure bypass valve* (LPBV) adalah sebuah katup yang berfungsi untuk mengalirkan *steam* dari *reheater* saat turbin sedang *trip* dan *steam* tersebut langsung dialirkan ke kondensor.
- l. *High pressure spray valve* (SPSV) adalah salah satu katup yang bekerja dengan cara menyemprotkan air pendingin ke *steam* melewati HP *bypass* dan menurunkan temperatur *steam* yang akan masuk ke *reheater*.
- m. *Low pressure spray valve* (LPSV) adalah sebuah katup yang akan menyemprotkan air pada *steam* melewati LP *bypass* dan menurunkan temperatur *steam* sebelum masuk ke kondensor.



Gambar 2.7 *Steam Turbine*
 Sumber: (Siregar, 2013)

2.3.4 Generator

Generator merupakan sebuah alat yang bekerja dengan cara mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Arus listrik induksi dihasilkan dari generator dengan cara memutar kumparan di antara celah kutub utara-selatan sebuah magnet (Prasty, 2016). Berikut adalah jenis-jenis yang terdapat pada generator.

- a. Berdasarkan jenis arus listriknya, generator dibagi menjadi dua, yaitu:
 - 1) Generator arus searah (DC), yang menggunakan komutator untuk mengubah arah arus listrik yang dihasilkan oleh kumparan. Generator jenis ini biasanya digunakan untuk keperluan yang membutuhkan tegangan listrik konstan, seperti pada baterai atau aki.
 - 2) Generator arus bolak-balik (AC), yang menggunakan *slip ring* (cincin selip) untuk menghubungkan kumparan dengan sirkuit luar. Generator jenis ini biasanya digunakan untuk keperluan yang membutuhkan frekuensi listrik tertentu, seperti pada jaringan listrik nasional.
- b. Berdasarkan letak kutubnya, generator dibagi menjadi dua, yaitu:
 - 1) Generator kutub dalam

Pada generator jenis kutub dalam, medan magnet terletak pada bagian yang berputar (rotor). Jenis generator ini sering digunakan pada pembangkit listrik tenaga air (PLTA) dan pembangkit listrik tenaga diesel (PLTD) dengan kecepatan putaran rendah.

2) Generator kutub luar

Pada generator jenis kutub luar, medan magnet terletak pada bagian yang diam (stator). Jenis generator ini lebih sering digunakan pada pembangkit listrik tenaga gas (PLTG) dan pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) dengan kecepatan putaran yang tinggi.

c. Berdasarkan medannya, generator dibagi menjadi dua jenis, yaitu:

1) Generator sinkron

Jenis generator ini menghasilkan listrik dengan frekuensi yang selaras dengan putaran si generator. Frekuensi listrik AC yang dihasilkan sesuai dengan kecepatan putaran (RPM) generator. Biasanya jenis generator ini digunakan pada PLTA, PLTD, dan PLTU.

2) Generator asinkron

Jenis generator ini menggunakan prinsip motor asinkronous (motor induksi) untuk menghasilkan listrik. Kecepatan putaran (RPM) generator asinkron tidak selaras dengan frekuensi listrik yang dihasilkan. RPM nya harus lebih tinggi sekitar 3% dari frekuensi yang diharapkan. Generator asinkron banyak digunakan pada aplikais sumber penggerak yang tidak dapat dikendalikan kecepatan putarannya, seperti turbin angin ataupun *micro hydro*.

d. Berdasarkan jenis rotornya, generator dibagi menjadi dua jenis, yaitu:

1) Generator rotor kutub menonjol

Generator jenis ini memiliki rotor dengan kutub-kutub yang menonjol keluar. Biasanya digunakan pada generator dengan RPM rendah seperti PLTA dan PLTD.

2) Generator rotor kutub rata (silindris)

Generator jenis ini memiliki rotor dengan bentuk silindris atau rata. Biasanya digunakan pada pembangkit listrik / generator dengan putaran RPM tinggi seperti PLTG dan PLTU.

2.3.5 Kondensor

Kondensor adalah sebuah alat penukar kalor (*heat exchanger*) yang berfungsi untuk mengkondensasikan fluida kerja dengan mengubah fasa zat gas menjadi cair dari temperatur tinggi menjadi fasa cair pada temperatur rendah. Kondensor berasal dari kata kondensasi yang berarti alat tersebut akan mendinginkan uap yang melewatinya dan mengubahnya menjadi fasa cair (Bono and Widyaningsih, 2014).

Fungsi utama kondensor adalah mendinginkan refrigeran, yaitu zat pendingin yang digunakan pada sistem pendinginan. Refrigeran yang ditempatkan di kondensor berbentuk uap dan bertemperatur tinggi karena dipanaskan dan ditekan pada tekanan tinggi dari kompresor. Setelah refrigeran melewati dinding kondensor, ia berubah dari bentuk asli uap menjadi cair dengan bantuan udara dan air untuk menghilangkan panas, sementara tekanannya tetap. Intinya kondensor bertujuan untuk membuang panas keluar dari sistem pendingin dengan dengan

mempertahankan tingkat *pressure* yang sama (Rosyada, Anhar and Silanegara, 2018).

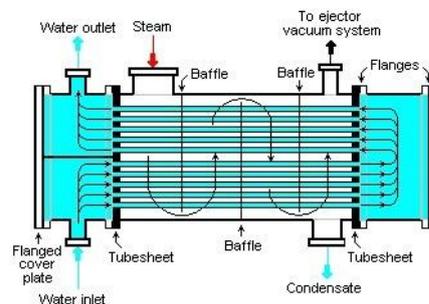
Kondensor memiliki kelebihan dalam penggunaannya yaitu, meningkatkan efisiensi sistem pendingin dengan mengurangi beban kerja kompresor, menghemat energi dengan memanfaatkan panas yang dibuang untuk keperluan lain, dan mengurangi emisi gas rumah kaca dengan menurunkan penggunaan bahan bakar fosil untuk sistem pendingin (Sutina, Wijaya Kusuma and Priambadi, 2020). Selain itu terdapat kekurangan yang dimiliki dari kondensor seperti, membutuhkan biaya *maintenance* yang tinggi untuk menjaga kondisi pipa dan media pendingin agar tidak kotor dan bocor, membutuhkan ruang yang cukup besar untuk menempatkan kondensor (terutama yang menggunakan air sebagai media pendingin), dan membutuhkan perhatian khusus untuk menghindari korosi, karat atau kerak pada pipa kondensor (Zakaria and Suryaman, 2020).

Terdapat tiga fase yang terjadi pada kondensor saat terjadinya proses pendinginan, yaitu:

- a. Fase pertama disebut *desuperheating*. Uap yang masuk ke dalam kondensor mengalami *superheated* dan *super pressurized*. *Desuperheating* berarti mengeluarkan panas dari uap dan mengubahnya menjadi cair, proses inilah yang menjadi fase awal pendinginan terjadi.
- b. Fase dua adalah kondensasi. Setelah semua *superheat* refrigeran telah ditolak, proses kondensasi yang sebenarnya dapat dimulai. Kondensasi melibatkan transformasi refrigeran gas menjadi keadaan cair.

- c. Fase ketiga yaitu *subcooling*. Setelah refrigeran berubah menjadi cair, ia masih memiliki suhu yang lebih tinggi dari suhu lingkungan. *Subcooling* berarti menurunkan suhu refrigeran cair hingga menjadi suhu yang diinginkan.

Adapun komponen yang terdapat di dalam kondensor seperti jaringan pipa yang berfungsi untuk tempat aliran refrigeran dan media pendingin. Media pendingin dapat berupa udara, air, atau campuran dari keduanya. Berdasarkan media zat yang digunakan sebagai pendingin, kondensor dibagi menjadi tiga bagian yaitu *air cooled condenser*, *water cooled condenser*, dan *evaporative condenser*. Tipe pendingin yang biasa digunakan di pembangkit listrik tenaga uap ialah *water cooled condenser* yang di mana ia menggunakan air sebagai zat pendinginnya.



Gambar 2.8 Sistem Kondensor
Sumber: (Adriani, 2015)

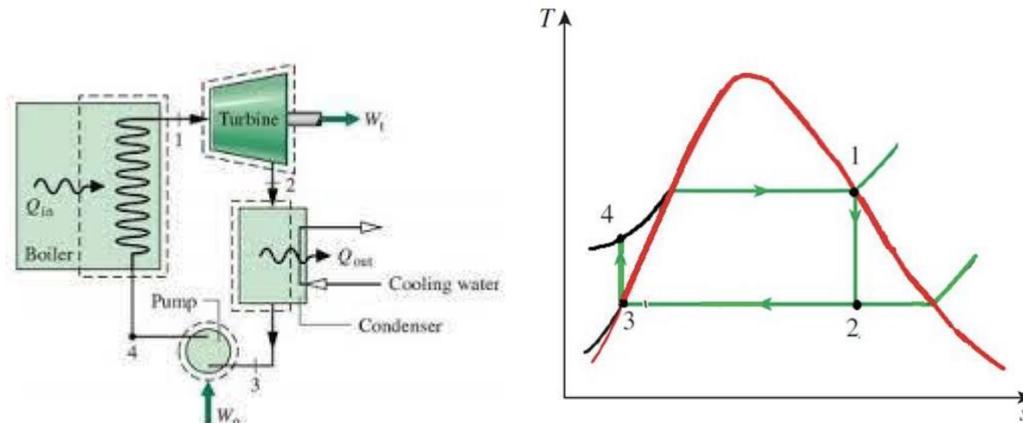
2.4 Siklus Rankine

Siklus Rankine adalah salah satu jenis siklus termodinamika ideal yang digunakan untuk mendeskripsikan mesin kalor yang memanfaatkan perubahan panas menjadi kerja (Zhang et al., 2021). Siklus ini menghasilkan 80% dari seluruh energi listrik yang dihasilkan di seluruh dunia. Siklus ini biasanya ditemukan di

pembangkit listrik tenaga uap (PLTU), di mana sumber panas yang utama dapat berasal dari batu bara, gas alam, minyak bumi, atau nuklir.

Siklus rankine terdiri dari empat komponen utama, yaitu turbin uap, kondensor, pompa, dan *boiler* (Zhao et al., 2020). Fluida kerja yang digunakan pada siklus ini biasanya adalah air, karena memiliki karakteristik fisika dan kimia yang baik dan murah. Fluida kerja mengalir dalam aliran tertutup dan digunakan secara konstan.

Turbin uap mengubah tenaga uap menjadi tenaga listrik. Turbin uap terdiri dari bagian yang berputar (rotor) dan bagian yang diam (stator). Rotor mengubah energi kinetik uap menjadi energi listrik melalui generator, dan stator mengarahkan aliran uap yang melintasi turbin. Uap masuk ke turbin dengan tekanan dan suhu tinggi, dan keluar dengan tekanan dan suhu rendah (Blažević et al., 2019). Fungsi kondensor ini adalah untuk mengubah uap menjadi cair atau cair jenuh dengan melepaskan panas ke fluida dingin. Fluida dingin biasanya berasal dari cooling tower atau sumber air alami. Kondensor berfungsi pada tekanan rendah dan suhu rendah (Muslim et al., 2020). Pompa berfungsi untuk meningkatkan tekanan fluida cair sebelum memasuki *boiler*. Pompa membutuhkan daya dari luar untuk memutar impeller di dalamnya. Impeller berfungsi untuk meningkatkan tekanan fluida dengan cara memberikan gaya sentrifugal (Li et al., 2019). *Boiler* berfungsi untuk memanaskan fluida cair menjadi uap pada tekanan konstan. Sumber panas yang didapatkan pada *boiler* seperti reaksi nuklir, atau pembakaran bahan bakar. *Boiler* beroperasi pada tekanan tinggi dan suhu tinggi (Kuskarbekova, S.I. et al., 2023).



Gambar 2.9 Prinsip Kerja Termodinamika dan Diagram T-s
Sumber: (Irawan, Pratama and Insani, 2021)

Pada gambar tersebut siklus rankine memiliki empat proses termodinamika, diantaranya ialah proses 1-2 yaitu uap jenuh kering dari boiler mengembang saat memasuki turbin. Proses ini juga dikenal sebagai ekspansi isentropik. Akibatnya, suhu dan tekanan uap menurun. Selanjutnya proses 2-3, uap basah yang memasuki kondensor pada tahap ini dikondensasikan pada tekanan konstan. Kemudian, uap tersebut diubah menjadi cairan jenuh. Proses ini juga dikenal sebagai penolakan panas pada tekanan konstan di kondensor. Proses 3-4 fluida kerja (cairan jenuh) yang masuk ke dalam pompa, dipompa dari tekanan rendah ke tekanan tinggi. Proses ini juga dikenal sebagai kompresi isentropik. Terakhir proses 4-1 yaitu cairan bertekanan tinggi yang memasuki boiler dipanaskan oleh sumber panas eksternal pada tekanan konstan. Cairan tersebut diubah menjadi uap jenuh kering dengan penambahan panas pada tekanan konstan di dalam boiler (Moran and Shapiro, 2004).

2.5 Energi listrik

Energi listrik adalah bentuk energi yang dihasilkan dari aliran muatan listrik (Setiaji, Sumpena and Sugiharto, 2022). Energi listrik dihasilkan oleh pembangkit

listrik dan dapat berasal dari berbagai sumber seperti batu bara, minyak bumi, gas alam, angin, air, panas bumi, nuklir, dan matahari. Satuan pokok yang selalu digunakan dalam energi listrik adalah kWh (Kilo Watt Hour). Adapun persamaan yang dapat digunakan untuk mencari energi listrik sebagai berikut:

$$\text{Energi Listrik} = P_{gen} \times t_{tot} \quad (2.1)$$

Dimana:

Energi listrik : Daya yang diproduksi (MWh)

P_{gen} : Daya yang dibangkitkan generator (MW)

t_{tot} : Total waktu kerja pembangkit listrik dalam sebulan (h)

2.6 Batu bara

Batu bara adalah mineral organik yang dapat terbakar dan terbentuk dari sisa tumbuhan yang mengendap lalu selanjutnya berubah bentuk akibat proses fisika dan kimia yang berlangsung selama jutaan tahun. Oleh karena itu, batu bara termasuk dalam kategori bahan bakar fosil. Proses *coalification* atau pembatubaraan merupakan proses yang mengubah tumbuhan menjadi batu bara (Ogara, Fadhilah and Ilham, 2023). Faktor-faktor seperti variasi tumbuhan purba, kondisi tempat pengendapan (sedimentasi) tumbuhan, pengaruh tekanan dan panas bumi, serta perubahan geologi waktu akan menyebabkan terbentuknya berbagai jenis batu bara (Susilawati, 1992).

1.6.1 Jenis-jenis Batu bara

Berdasarkan tingkat proses pembentukan dan kualitasnya, batu bara dibagi menjadi lima jenis diantaranya:

Class	Group		Fixed Carbon	Volatile matter	Heating values
	Name	Symbol	Dry (%)	Dry (%)	Drybasis (kkal/kg)
Anthracite	meta-anthracite	Ma	>98	>2	7740
	Anthracite	An	92-98	2.0-8.0	8000
	semianthracite	Sa	86-92	8.0-15	8300
Bituminous	low-volatile	Lvb	78-86	14-22	8741
	medium volatile	mvb	89-78	22-31	8640
	high-volatile A	hvAb	<69	>31	8160
	high-volatile B	hvBb	57	57	6750-8160
	high-volatile C	hvCb	54	54	7410-8375 6765-7410
Subbituminous	subbituminous A	subA	55	55	6880-7540
	subbituminous B	subB	56	56	6540-7230
	subbituminous C	subC	53	53	5990-6860
Lignite	lignite A	ligA	52	52	4830-6360
	lignite B	ligB	52	52	<5250

Sumber : Mutasim, 2007

Gambar 2.10 Klasifikasi Batu bara
Sumber: (Riadi, 2018)

a. Gambut (*Peat*)

Jenis ini sebenarnya termasuk batu bara yang berfungsi sebagai bahan bakar. Hal ini dikarenakan masih dalam tahap awal pembentukan batu bara. Endapan ini masih menunjukkan karakteristik awal bahan dasarnya yaitu tumbuh-tumbuhan. Gambut sendiri merupakan jenis batu bara peringkat rendah yang memiliki pori dan kadar air lebih dari 75% dan nilai kalori paling rendah.

b. *Lignite* / Batu bara muda (*Brown coal*)

Jenis batu bara ini telah memperlihatkan proses lanjutan yang sudah berupa struktur kekar dan gejala pelapisan. Apabila dikeringkan, maka gas dan airnya akan keluar. Endapan ini dapat dimanfaatkan secara terbatas hanya untuk kepentingan yang bersifat sederhana, karena panas yang dihasilkan sangat rendah. Batu bara muda memiliki kandungan karbon dan energi yang rendah, kadar air, zat volatile dan mineral organik yang tinggi. Sehingga pemanfaatannya sebagai sumber energi menjadi tidak menguntungkan karena sebagian besar energi yang dihasilkan digunakan untuk menguapkan air dan mengurangi jumlah energi bersih yang dapat diperoleh.

c. *Sub – Bituminous*

Golongan ini memiliki ciri-ciri tertentu yaitu berwarna kehitam-hitaman dan mengandung lilin. Endapan ini dapat digunakan untuk memanfaatkan pembakaran yang cukup dengan temperatur yang tidak terlalu tinggi. Jenis batu bara ini mengandung sedikit karbon dan banyak mengandung air, maka dari itu jenis batu bara ini memiliki sumber panas yang kurang efisien.

d. *Bituminous*

Jenis ini memiliki ciri-ciri sifat yang padat, hitam, rapuh (*brittle*) dengan bentuk bongkahan prismatic. Batu bara ini berlapis dan tidak mengeluarkan gas dan air bila dikeringkan. Jenis batu bara inilah yang biasa digunakan untuk kepetingan industri. *Bituminous* mengandung 68-86% unsur karbon (C) dengan kadar air 8-10% dari beratnya, serta memiliki kandungan *ash* atau abu dan sulfur yang sedikit.

e. *Anthracite*

Batu bara ini merupakan kelas batu bara tertinggi dengan warna hitam berkilauan metalik, mengandung antara 86-98% unsur karbon (C) dan kadar air kurang dari 8%. Pada proses pembakaran, memperlihatkan warna biru dengan derajat pemanasan yang tinggi. Batu bara ini biasa digunakan untuk berbagai macam industri besar yang memerlukan temperatur tinggi.



Gambar 2.11 Jenis-jenis Batu bara
Sumber: (NisbiIndonesia, 2017)

1.6.2 Analisa dan Pengujian Batu bara

a. Analisa *Proximate*

Analisa *proximate* merupakan analisis yang bertujuan untuk mencari tahu serta menentukan kadar *moisture* (air dalam batu bara). Kadar *moisture* ini mencakup nilai *free moisture* serta *total moisture*, *ash* (abu), *volatile matters* (zat terbang), dan *fixed carbon* (karbon tertambat). Salah satu standar metode untuk *coal proximate analysis* adalah ASTM D3172-13 *standard practice for proximate analysis of coal and coke* (International, 2013).

Proximate Analysis	unit	(ar)	(ad)	(db)	(daf)
Moisture	(wt. %)	3.3	2.7		
Ash	(wt. %)	22.1	22.2	22.8	
Volatile Matter	(wt. %)	27.3	27.5	28.3	36.6
Fixed Carbon	(wt. %)	47.3	47.6	48.9	63.4
Gross Calorific Value (MJ/kg)		24.73	24.88	25.57	33.13

Gambar 2.12 Contoh *Proximate Analysis*
Sumber: (International, 2013)

b. Analisa *Ultimate*

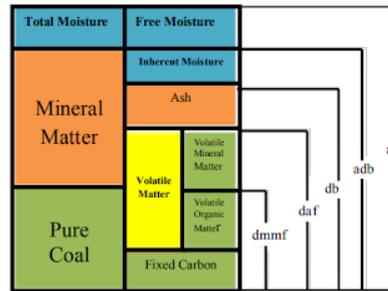
Analisa *ultimate* batu bara dilakukan untuk menentukan kadar karbon (C), hidrogen (H), oksigen, (O), nitrogen (N), dan sulfur (S) yang ada di dalam batu bara dan variabel-variabel ini juga diukur dalam persen berat (wt. %). Analisa ini sepenuhnya dilakukan oleh alat yang sudah terhubung dengan komputer. Prosedur analisis *ultimate* ini cukup ringkas, hanya dengan memasukkan sampel batu bara ke dalam alat dan hasil analisis akan muncul pada layar komputer. Salah satu standar yang digunakan untuk *coal ultimate analysis* adalah ASTM D3176-09 *standard test methods for ultimate analysis of coal and coke* (International, 2009).

Ultimate Analysis	unit	(ar)	(ad)	(db)	(daf)
Carbon (C)	(wt. %)	61.1	61.5	63.2	81.9
Hydrogen (H)	(wt. %)	3.00	3.02	3.10	4.02
Nitrogen (N)	(wt. %)	1.35	1.36	1.40	1.81
Total Sulfur (S)	(wt. %)	0.4	0.39	0.39	
Oxygen (O)	(wt. %)	8.8	8.8	9.1	

Gambar 2.13 Contoh *Ultimate Analysis*
Sumber: (International, 2009)

Untuk menghasilkan analisa batu bara, terdapat beberapa dasar dan basis data yang diperlukan, diantaranya sebagai berikut:

- a. *As Received* (ar), merupakan analisis yang berdasarkan pada kondisi dimana batu bara tersebut diasumsikan seperti dalam keadaan diterima.
- b. *Air Dried Base* (adb), merupakan analisis yang berdasarkan pada basis contoh batu bara dengan kandungan air dalam kesetimbangan dengan atmosfer laboratorium.
- c. *Dry Base* (db), merupakan analisis yang didasarkan pada kondisi batu bara diasumsikan bebas air total.
- d. *Dry Ash Free* (daf), merupakan analisis yang dinyatakan pada kondisi batu bara diasumsikan bebas air total dan kadar *ash* (abu).
- e. *Dry Mineral Matter Free* (dmmf), merupakan analisis yang menyatakan pada kondisi dimana batu bara diasumsikan bebas air total dan bahan mineral.

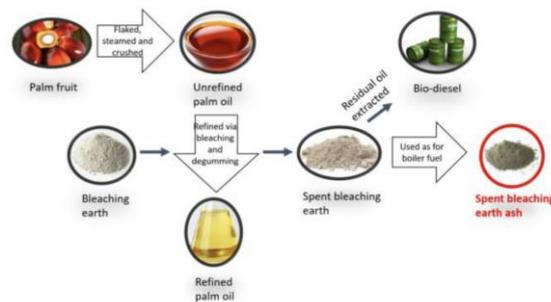


Gambar 2.14 Basis Data Hasil Analisa Batu bara
Sumber: (Riadi, 2018)

2.7 Spent Bleaching Earth

Spent bleaching earth (SBE) merupakan limbah padat yang dihasilkan dari proses *degumming* dan *bleaching* pada industri pengolahan minyak nabati atau hewani, seperti minyak goreng dan oleokimia (Amelia et al., 2023). *Degumming* merupakan tahapan yang bertujuan untuk memisahkan getah dan lendir (*fosfolipid*, protein, residu, dan karbohidrat) pada *Crude Palm Oil* (CPO) tanpa mengurangi jumlah asam lemak bebas (ALB). Setelah proses *degumming*, tahapan selanjutnya merupakan pemucaran (*bleaching*). Proses *bleaching* dilakukan dengan menambahkan absorben berupa *bleaching earth* (BE). Pada awalnya BE digunakan dalam bentuk bentonit alami tanpa proses aktivasi. Dalam bentuk alaminya, BE hanya mampu menyerap ion-ion bermuatan positif (ion organik dan ion anorganik). Kemampuan bentonit dalam menyerap senyawa organik, khususnya yang bersifat nonpolar seperti hidrokarbon aromatik atau C_6H_6 (senyawa hidrokarbon dengan rantai melingkar seperti cincin yang mempunyai ikatan antar atom C tunggal dan rangkap secara selang-seling), dapat ditingkatkan melalui proses aktivasi. Proses ini diperlukan karena mineral *montmorillonit* atau $Al_2O_3 \cdot xH_2O$ (produk dari vulkanisme dan aktivitas hidrotermal) yang ada di dalam bentonit memiliki lapisan silikat bermuatan negatif dan permukaan mineral yang hidrofilik (senyawa yang

dapat berikatan dengan air). Aktivasi dapat dilakukan dengan cara pemanasan atau pengasaman, yang akan meningkatkan afinitas bentonit terhadap senyawa organik nonpolar (Amelia et al., 2023).



Gambar 2.15 Proses Terbentuknya SBE
Sumber: (Lim et al., 2022)

Bentonit dikenal memiliki kemampuan adsorpsi yang tinggi karena partikel koloidnya yang berukuran sangat kecil, yang menyediakan area permukaan yang luas untuk interaksi dengan berbagai molekul (Amelia et al., 2023). Hal ini lah yang menyebabkan bentonit dapat digunakan sebagai *bleaching agent* atau adsorben. Adapun kandungan yang terdapat dalam SBE seperti silika (SiO_2), aluminium (Al_2O_3), besi (FE_2O_3), magnesium (MgO), dan kalsium (CaO). Kandungan tersebut digunakan sebagai adsorben untuk menyerap kotoran, warna, dan bau pada minyak (Sipayung, 2020).

Tabel 2.1 Karakteristik Kimia *Spent Bleaching Earth* (% berat)

SiO_2	Al_2O_3	FE_2O_3	MgO	CaO	References
79.80	8.70	1.90	3.20	0.70	Lara and Park (2004)
56.90	9.24	8.27	4.32	3.90	Loh et al. (2013)
37.45	8.01	0.83	1.28	0.78	Mana et al. (2011)
65-75	15-20	2.00	2.50	0.50	Weng and Pan (2007)

Kandungan minyak dalam SBE berkisar antara 20-40%, sedangkan kandungan *moisture* berkisar antara 5-15% (Amelia et al., 2023). Nilai kalori yang dihasilkan oleh SBE tergantung pada kandungan minyak dan *moisture* yang ada didalamnya. Semakin tinggi kandungan minyak, semakin tinggi pula nilai kalori SBE. Sebaliknya, semakin banyak kandungan *moisture* nya semakin rendah nilai kalori yang dihasilkan. Menurut Amelia et al (2023), nilai kalori SBE berkisar antara 10-25 MJ/kg. Nilai kalori ini menunjukkan bahwa SBE memiliki potensi sebagai bahan bakar alternatif, baik secara langsung maupun setelah melalui proses konversi.



Gambar 2.16 *Spent Bleaching Earth* (SBE)
Sumber: (Amelia et al., 2023)

2.8 *Co-Firing*

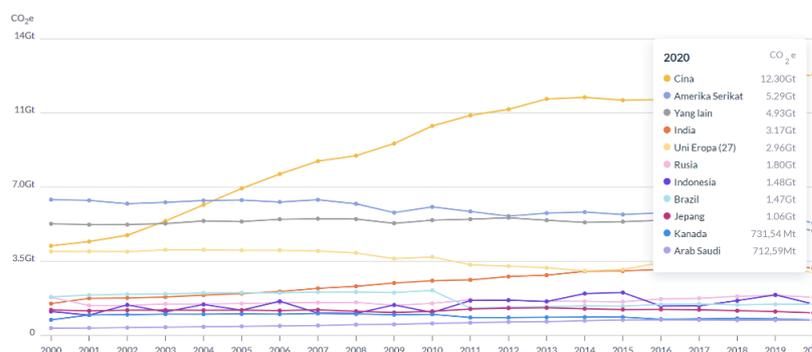
Co-firing didefinisikan sebagai pembakaran dua bahan bakar yang berbeda dalam sistem pembakaran yang sama. Salah satu contoh kegiatan *co-firing* adalah substitusi batu bara dengan biomassa pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). Salah satu manfaat *co-firing* yaitu mengurangi emisi dan pemakaian batu bara yang cukup mahal (Ariyanto and Mustakim, 2023).

2.9 Emisi Gas Rumah Kaca (GRK)

Emisi gas rumah kaca (GRK) adalah gas yang terkandung dalam atmosfer baik alami maupun antropogenik, yang menyerap dan memancarkan Kembali

radiasi inframerah menyebabkan peningkatan suhu permukaan bumi (Peraturan Presiden No. 61 Tahun 2011). Jenis gas yang terdapat pada GRK sendiri meliputi karbon dioksida (CO_2), metana (CH_4), dinitrogen oksida (N_2O), ozon (O_3), dan gas-gas fluorinasi. Emisi GRK bervariasi, termasuk dari kegiatan pembakaran bahan bakar fosil, perubahan dan penggunaan lahan, pertanian, pengelolaan limbah, dan proses industri. Konsekuensi dari peningkatan emisi GRK tersebut dapat memberikan dampak negatif bagi kehidupan manusia dan ekosistem.

Berdasarkan data *Climate Watch*, sepanjang 20 tahun terakhir mulai dari tahun 2000 hingga 2020, Indonesia mengalami fluktuasi emisi GRK yang signifikan. Di tahun 2020, Indonesia menghasilkan emisi GRK sebanyak 1,48 gigaton ekuivalen karbon dioksida ($Gt CO_2e$). Angka tersebut setara dengan 3.1% dari total emisi global pada tahun 2020, dan menjadikan Indonesia sebagai penghasil emisi GRK terbesar ke-6 dunia setelah China, Amerika Serikat, Uni Eropa, dan Rusia. Pada tahun 2020 mayoritas atau 44% emisi GRK Indonesia berasal dari sektor energi, dengan volume 650,05 juta ton ekuivalen karbon dioksida ($Mt CO_2e$). Sisanya berasal dari penggunaan lahan / sektor kehutanan, pertanian, pengolahan limbah, dan proses industri.



Gambar 2.17 Grafik GRK Skala Global
Sumber: (ClimateWatch, 2020)

Fokus utama disini ialah dari sektor energi yang merupakan pembangkit listrik, terutama PLTU batu bara yang merupakan kontributor terbesar emisi GRK. Menurut data Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM), setiap PLTU berkapasitas 1 GW menghasilkan 5 juta ton CO_2 . Maka dari itu, jika mengacu pada data Kementerian Perindustrian yang mencatat kapasitas terpasang PLTU batu bara di Indonesia sebesar 39,2 GW pada tahun 2020, maka emisi CO_2 yang dihasilkan oleh PLTU batu bara di Indonesia sekitar 196 juta ton per tahun, atau 30 % dari total emisi GRK sektor energi.

Hal – hal yang mempengaruhi variabel yang terkandung pada batu bara diantaranya ialah jenis dan kualitas batu bara yang digunakan (kandungan karbon, nitrogen, sulfur, dan *ash* dalam batu bara), teknologi dan efisiensi pembakarannya, cara pengendalian emisi yang diterapkan dari segi teknologinya dalam menangkap dan mengurangi emisi, dan faktor operasional serta lingkungan juga mempengaruhi seperti beban pembangkit, suhu, tekanan, dan kelembaban udara.

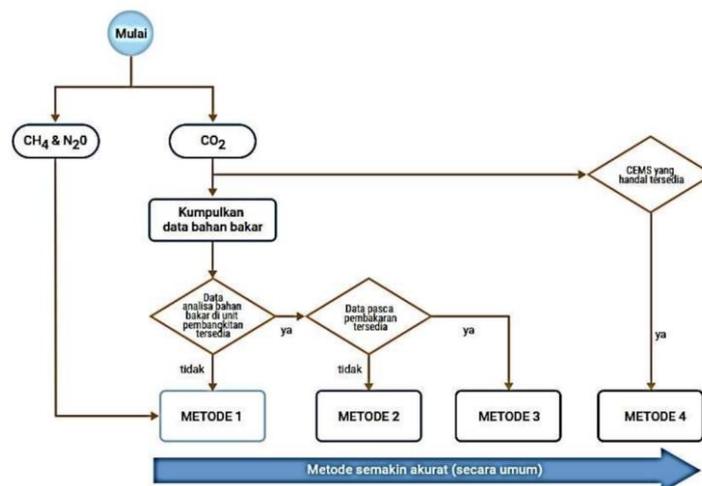
2.9.1 Analisis Perhitungan Emisi Gas Rumah Kaca (GRK)

Salah satu mekanisme yang bisa dilakukan untuk melakukan mitigasi emisi karbon di Indonesia ialah menggunakan skema *Carbon Cap*. Melalui pernyataan dari kementerian ESDM (2022) dengan kategori nilai *carbon cap* berdasarkan kapasitas PLTU sebagai berikut:

Tabel 2.2 *Carbon Cap* PLTU
 Sumber: (Sidiq dan Suwardi, 2022)

No	Jenis Pembangkit	Kapasitas Terpasang (MW)	Nilai Cap (ton CO_2 /MWh)
1	PLTU	Di atas 400	0,918
2	PLTU	100 – 400	1,013
3	PLTU Mulut Tambang	Di atas 100	1,094

Pedoman Perhitungan dan Pelaporan Inventarisasi Gas Rumah Kaca yang dikeluarkan oleh Kementerian ESDM digunakan untuk menghitung emisi GRK yang dihasilkan oleh suatu industri, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.18.



Gambar 2.18 Metode Perhitungan GRK
 Sumber: (Sidiq and Suwardi, 2022)

Secara umum, perhitungan emisi GRK Tier-3 tertinggi memerlukan tingkat ketelitian data yang tinggi. Namun, perhitungan emisi CO_2 dapat digunakan oleh unit pembangkit listrik yang mengetahui tingkat karbon tersisa pada *fly ash* dan *bottom ash* atau yang memiliki sistem pemantauan emisi terus menerus (CEMS) yang beroperasi setidaknya 97,5% selama pembangkit beroperasi. Berikut matriks

yang menjelaskan tingkatan *tier* dengan jenis metode perhitungan emisi GRK yang dapat digunakan.

Tabel 2.3 Matriks Sistem *Tier*
Sumber: (Sidiq and Suwardi, 2022)

Tier	Data yang diperlukan		Metode
	Aktivitas	Faktor Emisi	
Tier-1	Konsumsi bahan bakar (NCV <i>default</i> IPCC-2006)	Faktor emisi <i>default</i> IPCC-2006	Metode-1
Tier-2	Konsumsi bahan bakar (NCV <i>default</i> nasional atau NCV di unit pembangkit)	Faktor emisi nasional	Metode-1
		Faktor emisi spesifik di unit pembangkit listrik (terdapat data kandungan karbon dan menggunakan faktor oksidasi default)	Metode-2
Tier-3	Konsumsi bahan bakar per teknologi pembakaran (NCV di unit pembangkitan)	Faktor emisi spesifik di unit pembangkit listrik (terdapat data kandungan karbon dan menggunakan faktor oksidasi spesifik di unit pembangkit)	Metode 2
		Faktor emisi spesifik di unit pembangkit listrik (terdapat data kandungan karbon dan data	Metode-3

		kandungan karbon tidak terbakar (<i>unburned carbon</i>)	
	Emisi GRK sesuai CEMS		Metode-4

Berdasarkan Tabel 2.3, metode perhitungan jumlah emisi GRK sesuai dengan Pedoman Perhitungan dan Pelaporan Inventarisasi Gas Rumah Kaca yang dikeluarkan oleh kementerian ESDM (2022). Maka dari itu metode yang akan digunakan untuk perhitungan emisi GRK ialah metode 2 (dua). Metode ini masuk ke dalam tier-3.

$$E_{CO_2} = F_{BB} \times C_{ar} \times FO \times 44/12 \quad (2.2)$$

Dimana:

E_{CO_2} : Total Emisi CO_2 (ton)

F_{BB} : Konsumsi bahan bakar (ton)

C_{ar} : Kandungan karbon saat diterima (*as received*) (%)

FO : Faktor oksidasi spesifik

44 g/mol : Berat molekul CO_2

12sma : Massa atom C (satuan massa atom)

Untuk faktor oksidasi spesifik menggunakan panduan IPCC tahun 2006 yaitu *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Vol 2. Chapter 2 Stationary Combustion*, seperti dijelaskan pada Tabel 2.4 berikut.

Tabel 2.4 Faktor Oksidasi Spesifik

Bahan Bakar	Faktor Oksidasi
Batu Bara	100%
Bahan Bakar Minyak	100%

Bahan Bakar Gas	100%
-----------------	------

Kandungan karbon *as received*, dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$C_{ar} = FC \times \left[\frac{(100 - TM_{ar})}{(100 - M_{ad})} \right] \quad (2.3)$$

Dimana:

TM_{ar} : *Total moisture* kadar air total (*as received*) (%)

M_{ad} : *Inherent moisture* kadar air bawaan (*as dried*) (%)

FC : *Fixed Carbon* (%)

Setelah itu lakukan perhitungan dengan membandingkan jumlah emisi CO_2 dalam ton terhadap produksi energi listrik dalam MWh yang dibangkitkan dalam suatu periode waktu tertentu untuk menentukan faktor emisi CO_2 yang merupakan jumlah emisi karbon dioksida yang dilepaskan untuk memproduksi 1 MWh energi listrik pada sistem interkoneksi tertentu. Sehingga persamaan faktor emisi dapat dinyatakan sebagai berikut.

$$FE_{CO_2} = \frac{E_{CO_2}}{\text{Produksi MWh}} \quad (2.4)$$

Dimana:

FE_{CO_2} : Faktor emisi (ton/MWh)

Bahan bakar yang berasal dari *biomass-based fuel* dapat digunakan sebagai bahan bakar alternatif. Emisi gas rumah kaca dari hasil pembakaran *biomass-based fuel* memiliki persamaan dengan bahan bakar fosil. Akan tetapi, karbon yang dihasilkan dari kedua bahan bakar ini tidak sama atau berbeda. Karbon yang dihasilkan dari *biomass-based fuel* merupakan karbon dengan jenis *biogenic* yang

terkandung dalam suatu jaringan hidup dan bernafas (tanaman), sementara itu karbon yang terdapat dalam bahan bakar fosil terperangkap dalam bentuk formasi geologis selama jutaan tahun. Dengan demikian, menurut aturan inventarisasi emisi CO₂ dari pembakaran *biomass-based fuel* adalah 0 (nol) dikarenakan terserap kembali oleh tanaman bersangkutan (karbon netral). Dalam hal ini Persamaan (2.3) di atas dapat dikembangkan menjadi berikut:

$$FE_{CO_2}(tot) = \frac{E-CO_2 Mixed}{Produksi MWh} \quad (2.5)$$

$$FE_{CO_2}(corr) = \frac{E-CO_2 bb}{Produksi MWh} \quad (2.6)$$

Dimana:

$FE_{CO_2}(tot)$: Faktor emisi total gabungan batu bara dan biomassa (ton/MWh)

$FE_{CO_2}(corr)$: Faktor emisi koreksi (komponen batu bara saja) (ton/MWh)

$E_{CO_2}bb$: Jumlah emisi CO₂ dari komponen batu bara (ton)

Pada penelitian ini, terdapat dua jenis bahan bakar yang akan dilakukan perhitungan yaitu batu bara dan biomassa (SBE) dengan persentase karbon masing-masing berbeda. Maka dari itu, nantinya dapat dihitung secara parsial untuk emisi CO₂ yang dihasilkan. Jumlah dari kedua perhitungan tersebut dapat dilakukan perhitungan untuk faktor emisi CO₂ gabungan batu bara dan SBE.

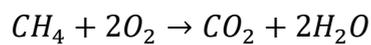
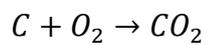
2.10 Pembakaran Bersama (*Co-Combustion*) Batu Bara dan SBE

Pembakaran bersama atau *co-combustion* batu bara dan SBE merupakan salah satu cara untuk memanfaatkan limbah *spent bleaching earth* sebagai sumber energi. Menurut *Journal Of Cleaner Production* karya Zhihang Yuan et al (2020), proses *co-firing* antara *spent bleaching earth* (SBE) dan batu bara melibatkan pembakaran bersama dari kedua bahan tersebut didalam *boiler*. Tujuan utama dari

proses tersebut adalah mengurangi faktor emisi CO₂ (FE-CO₂) dan memanfaatkan SBE sebagai sumber energi tambahan atau pengganti sebagian batu bara. Adapun tahapan proses reaksi kimia yang terjadi selama proses tersebut sebagai berikut:

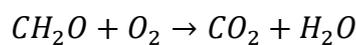
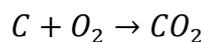
1. Pembakaran batu bara

Batu bara terdiri dari karbon (C) dan sejumlah kecil hidrokarbon (CH) (Riyanto et al., 2022). Reaksi pembakaran yang terjadi pada batu bara sebagai berikut:



2. Pembakaran *spent bleaching earth* (SBE)

Spent bleaching earth (SBE) berasal dari proses pemutihan minyak yang mengandung karbon dan berbagai komponen organik, serta mineral silika (SiO₂), kalsium oksida (CaO) dan alumina (Al₂O₃) (Yuan et al., 2020). Reaksi pembakaran komponen organik dalam SBE dapat direpresentasikan sebagai berikut:



3. Fraksi karbon

Fraksi karbon dalam bahan bakar adalah proporsi dari keseluruhan komposisi bahan bakar yang terdiri dari unsur karbon. Ini mencakup semua jenis karbon yang ada dalam bahan bakar, baik yang terdapat dalam zat yang mudah menguap maupun karbon yang tersisa setelah proses pembakaran (Ussiri, Jacinthe and Lal, 2014).

Kandungan fraksi karbon pada batu bara murni tergantung dari apa jenis batu baranya, umumnya antara 35% hingga 98% (Afrah et al., 2023). Sedangkan kandungan fraksi karbon pada SBE biasanya lebih rendah, berkisar antara 3% hingga 18% (Romyen et al., 2023) (Wijaya and Khairunisa, 2023).

Sehingga bila dilakukan perhitungan untuk melihat fraksi karbon yang dihasilkan menggunakan persamaan berikut:

$$Fuel (kg) \times (Fuel (\%) / 100) \times (Fuel C (\%) / 100) = Carbon Fraction (kg C) \quad (2.7)$$

Dimana:

Fuel (kg) : Massa bahan bakar (ton convert to kg)

Fuel (%) : Persentase penggunaan bahan bakar (%)

Fuel C : Total karbon yang terkandung dalam bahan bakar (%)

Carbon Fraction : Fraksi karbon bahan bakar (kg C)

4. Terjadinya reduksi CO_2

Ketika menggunakan 100% batu bara sebagai bahan bakar utama, semua bahan bakar yang dibakar adalah batu bara, sehingga seluruh fraksi karbon dari batu bara tersebut berkontribusi pada pembentukan CO_2 . Akan tetapi jika penggunaan batu bara sebesar 63% saja dan dicampur dengan *spent bleaching earth* (SBE) 37 % yang merupakan bahan bakar biomassa, fraksi karbon yang terlibat dalam proses pembakaran akan lebih sedikit dibandingkan dengan menggunakan 100% batu bara (Soleh et al., 2023).

2.11 *Specific Fuel Consumption*

Specific fuel consumption (SFC) merupakan suatu ukuran efisiensi dari sebuah mesin pembakaran dalam mengonsumsi bahan bakar dalam satuan kilogram

per kilowatt-jam (kg/kWh) (Monasari, Firdaus and Qosim, 2021). Nilai SFC yang rendah dianggap lebih baik karena mengindikasikan penggunaan bahan bakar yang lebih efisien dan menghasilkan emisi yang lebih rendah. Persamaan yang digunakan untuk mencari nilai SFC sebagai berikut:

$$SFC = \frac{M_{fuel}}{P_{gross\ total}} \quad (2.8)$$

Dimana:

SFC : Konsumsi bahan bakar terhadap daya yang dibangkitkan (kg/kWh)

M_{fuel} : Massa bahan bakar (ton)

P gross total : Total energi listrik yang dibangkitkan (MWh)

2.12 Efisiensi Pembangkit Listrik Tenaga Uap

Efisiensi sebuah pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) menunjukkan perbandingan antara daya listrik yang dihasilkan dengan daya termal yang masuk ke sistem. Menurut Putri Pratiwi dan Zakil Hadi (2022) efisiensi termal merupakan parameter penting dalam menentukan seberapa besar efisiensi yang telah dihasilkan oleh PLTU. Dalam sebuah pembangkit listrik tenaga uap efisiensi yang dihasilkan dari pembangkit tersebut biasanya berkisar 25% hingga 50% (Irawan, Pratama and Insani, 2021).

2.12.1 Analisis Efisiensi Pembangkit Listrik Tenaga Uap

Analisa efisiensi pada pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) dilakukan untuk mengukur dan mengevaluasi seberapa efisien PLTU dalam menghasilkan energi listrik. Pada penelitian ini, metode yang akan digunakan untuk menghitung efisiensi pembangkit PLTU ialah metode langsung. Metode ini menghitung efisiensi PLTU

dengan cara membandingkan daya listrik keluaran yang dihasilkan dengan daya panas masukan.

Persamaan yang digunakan untuk menghitung efisiensi pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) dengan metode langsung (*input-output*) sebagai berikut:

$$\eta_{PLTU} = \frac{Q_{out}}{Q_{in}} \times 100\% \quad (2.9)$$

$$\eta_{PLTU} = \frac{W_{T \text{ aktual}} - W_{pompa}}{Q_{in}} \times 100\% \quad (2.10)$$

Dimana:

η_{PLTU} : Efisiensi PLTU (%)

$W_{T \text{ aktual}}$: Kerja turbin aktual (MW)

W_{pompa} : Kerja pompa (MW)

Q_{out} : Energi panas keluar (MW)

Q_{in} : Energi panas masuk (MW)

Untuk mencari Q_{in} gunakan persamaan berikut:

$$Q_{in} = \frac{(m \times (h_1 - h_4))}{3600 \times 1000} \quad (2.11)$$

Dimana:

m : Laju alir *steam* (kg/h)

h_1 : Enthalpy kondisi 1 (kJ/kg)

h_4 : Enthalpy kondisi 4 (kJ/kg)

3600×1000 : Konstanta

Untuk mencari kerja pompa gunakan persamaan berikut:

$$W_{pompa} = (m \times (h_4 - h_3))/1000 \quad (2.12)$$

Dimana:

m : Lajur alir steam (kg/s)

h_4 : Enthalpy kondisi 4 (kJ/kg)

h_3 : Enthalpy kondisi 3 (kJ/kg)

1000 : Konstanta

2.12.2 Analisis Efisiensi Komponen PLTU

Sebelum menghitung efisiensi termal PLTU, terdapat beberapa variabel yang perlu diketahui yaitu mencari nilai *Enthalpy* dan nilai *Entropy*. *Enthalpy* adalah jumlah energi internal dan produk dari tekanan dan volume sistem termodinamika, sedangkan *Entropy* adalah jumlah energi termal dari suatu sistem yang tidak tersedia untuk diubah menjadi pekerjaan mekanis atau berguna (Alfiah, Hartini and Cahyanti, 2017). Secara singkatnya *Enthalpy* merupakan kandungan panas total suatu sistem, sedangkan *Entropy* merupakan gambaran ketidakteraturan dari sebuah sistem.

Kondisi 1 (Boiler)

Pada kondisi satu parameter utama nya adalah *pressure*, *temperature*, dan *flow*.

Setelah mengetahui paramater tersebut lakukan perhitungan menggunakan persamaan berikut:

$$h_1(\text{enthalpy}) = X1 - \left(\frac{Z1}{Z2}\right) x (X1 - Y1) \quad (2.13)$$

$$s_1(\text{entropy}) = X2 - \left(\frac{Z1}{Z2}\right) x (X2 - Y2) \quad (2.14)$$

Dimana:

$X1, X2, Y1, Y3$: Didapatkan dari tabel *properties of water and steam*

$Z1$: Suhu tertinggi – suhu aktual

Z_2 : Suhu tertinggi – suhu terendah

Kondisi 2 (Turbin)

Pada kondisi dua parameter yang perlu diperhatikan adalah *pressure* yang ada di kondisi dua. Nilai *pressure* yang ada di kondisi dua selalu berbeda dengan nilai *pressure* di kondisi satu. Lalu terdapat parameter tambahan untuk melakukan perhitungan pada kondisi dua yaitu s_g (*entropy* dalam keadaan *steam*), s_f (*entropy* dalam keadaan fluida), s_{fg} (*entropy* dalam keadaan fluida dan *steam*), h_g (*enthalpy* dalam keadaan *steam*), h_f (*enthalpy* dalam keadaan fluida), dan h_{fg} (*enthalpy* dalam keadaan fluida dan *steam*). Setelah itu lakukan perhitungan X_2 (fraksi uap) dan h_2 . Persamaan nya sebagai berikut:

$$X_2 = \frac{s_1 - s_f}{s_g - s_f} \quad (2.15)$$

Dimana:

X_2 : Fraksi uap

s_f : *Entropy* dalam keadaan fluida

s_g : *Entropy* dalam keadaan *steam*

Untuk nilai $s_2 = s_1$; dan nilai $h_{fg} = s_g - s_f$.

$$h_2 \text{ (enthalpy)} = h_f + (X_2 \times h_{fg}) \quad (2.16)$$

Dimana:

h_f : *Enthalpy* dalam keadaan fluida

h_{fg} : *Enthalpy* dalam keadaan fluida dan *steam*

Kondisi 3 (Kondensor)

Pada kondisi tiga, yang perlu dilakukan hanya mencari nilai dari h_3 . Namun nilai dari h_3 sama dengan nilai h_f .

$$h_f = h_3 \quad (2.17)$$

Dimana:

h_f : *Enthalpy* dalam keadaan fluida

Kondisi 4 (Pompa)

Pada kondisi empat, parameter yang perlu diketahui adalah nilai *pressure* P_1 , P_2 , P_3 , P_4 , dan juga V_3 . Untuk nilai $P_3 = P_2$, $P_4 = P_1$. Lakukan perhitungan menggunakan persamaan berikut:

$$h_4 = h_3 + V_3 \times (P_4 - P_3) \quad (2.18)$$

Dimana:

V_3 : Nilai konstanta $10.084 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$

P_1, P_2, P_3, P_4 : *Pressure* (Mpa)

Setelah mengetahui nilai *enthalpy* dan *entropy* melalui perhitungan dan persamaan yang sudah dilakukan sebelumnya, selanjutnya masuk ke perhitungan efisiensi komponen pada PLTU.

a. Efisiensi *Boiler*

Terdapat dua cara dalam melakukan perhitungan efisiensi *boiler*, yaitu metode langsung (*direct method*) dan tidak langsung (*indirect method*) (Prasojo, Hakim and Rijanto, 2020). Namun, analisis perhitungan yang dilakukan pada penelitian ini menggunakan metode langsung.

$$\text{Efisiensi boiler } (\eta_{\text{boiler}}) = \frac{\text{panas keluar (kCal)}}{\text{panas masuk (kCal)}} \times 100\% \quad (2.19)$$

$$\eta_{\text{boiler}} = \frac{(\text{energy steam} - \text{energy feed water}) \times 0,239}{q \times \text{GCV}} \times 100\% \quad (2.20)$$

$$\eta_{\text{boiler}} = \frac{((Q_g \times h_g) - (Q_f \times h_f)) \times 0,239}{q \times \text{GCV}} \times 100\% \quad (2.21)$$

Dimana:

Feed water energy : Energi air umpan yang sudah di *convert* (kj)

Steam energy : Energi uap yang sudah di *convert* (kj)

Q_f : Jumlah *water feed flow* yang dihasilkan (kg/jam)

Q_g : Jumlah *steam flow* yang dihasilkan (kg/jam)

q : Jumlah bahan bakar yang dikonsumsi (kg/jam)

h_g : Entalpi *steam* jenuh (kJ/kg) *steam*

h_f : Entalpi air umpan (kJ/kg) *steam*

GCV : Jumlah panas kotor bahan bakar (kCal/kg)

b. *Steam Turbine*

Efisiensi turbin uap pada sebuah PLTU menjadi tolak ukur seberapa baik turbin mengubah energi uap menjadi energi mekanis yang berfungsi untuk menggerakkan generator listrik. Hal yang dapat mempengaruhi efisiensi dari sebuah turbin uap seperti tekanan, temperatur, kerja pompa, dan *flow steam* (Wulandari, Lutfiananda and Sumada, 2023).

Berikut persamaan yang dapat dilakukan:

$$\eta_{\text{turbine}} = \frac{W_{T \text{ actual}}}{W_{T \text{ teoritis}}} \times 100\% \quad (2.22)$$

Dimana:

$W_{T \text{ actual}}$: Kerja turbin aktual (MW)

$W_{T\text{ teoritis}}$: Kerja turbin secara teoritis / perhitungan (MW)

Untuk mencari nilai $W_{T\text{ teoritis}}$ lakukan perhitungan dengan persamaan berikut:

$$W_{T\text{ teoritis}} = \frac{(h_1 - h_2) \times m}{1000 - W_{\text{pompa}}} \quad (2.23)$$

Dimana:

h_1 : Enthalpy kondisi 1 (kJ/kg)

h_2 : Enthalpy kondisi 2 (kJ/kg)

m : *Flow steam* (kg/s)

W_{pompa} : Kerja pompa (MW)

c. Generator

Efisiensi generator dalam Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) menjadi faktor utama dalam menentukan kinerja keseluruhan pembangkit listrik. Sebagai komponen utama, generator bertugas untuk mengubah energi mekanis dari turbin uap menjadi energi listrik yang dapat digunakan. Dalam PLTU, generator berperan dengan menghasilkan arus listrik bolak-balik (AC) yang frekuensinya berhubungan langsung dengan kecepatan putaran turbin uap. Penilaian efisiensi generator terfokus pada seberapa baik energi mekanis dari turbin uap diubah menjadi energi listrik tanpa mengalami kerugian yang berarti (Kurniasari, Handajadi and Hani, 2017). Untuk menghitung efisiensi generator persamaan yang digunakan sebagai berikut:

$$\eta_{\text{generator}} = \frac{\text{Power nett}}{\text{Power Production}} \times 100\% \quad (2.24)$$

Dimana:

$\eta_{\text{generator}}$: Efisiensi generator (%)

Power nett : Daya listrik bersih yang dihasilkan (MWh)

Power Production : Daya yang dibangkitkan (MWh)

Lalu untuk menentukan nilai Power nett perlu dilakukan perhitungan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$Power\ nett = Power\ production - Auxiliary \quad (2.25)$$

Dimana:

Power production: Daya pada turbin (MW)

Auxiliary: Kerja turbin (MW)

2.13 Jurnal Terkait

Tabel 2.5 Jurnal Terkait

No.	Judul Jurnal	Penulis, Tahun	Hasil dan Pembahasan Jurnal
1	<i>Calculation of Carbon Emissions and Cap and Trade/Tax Schemes at Co-firing Coal Power Plants</i>	Agus Noor Sidiq dan Suwardi, (2022)	Jurnal penelitian ini membahas tentang implementasi <i>co-firing</i> di pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) batu bara di Indonesia dalam rangka mengurangi emisi gas rumah kaca (GRK) dan menghindari pajak karbon yang dikenakan pada industri yang melebihi batas emisi karbon. Perbedaan antara faktor emisi karbon dan <i>carbon cap</i> menentukan Nilai Ekonomi Karbon (NEK) yang bisa bernilai positif dan negatif. Jurnal penelitian ini menggunakan metode kuantitatif dengan analisis perhitungan emisi GRK <i>Tier-3</i> untuk menghitung emisi CO_2 dari <i>co-firing</i> batu bara dan biomassa di pembangkit listrik. Hasil perhitungnan menunjukkan bahwa <i>co-firing</i> biomassa dapat menurunkan emisi CO_2 , akan tetapi persentase <i>co-firing</i> yang

			<p>sudah dilakukan belum mampu mencapai target yang diinginkan. Dengan membahas Nilai Ekonomi Karbon (NEK) berdasarkan persentase <i>co-firing</i>, hasil perhitungan menunjukkan bahwa persentase <i>co-firing</i> antara 5%, 6%, dan 7% yang menguntungkan adalah 7%. Kesimpulannya, penelitian ini menyoroti pentingnya data yang akurat dan sistem pemantauan untuk perhitungan emisi, serta menekankan perlunya analisis lebih lanjut untuk menentukan persentase <i>co-firing</i> yang optimal untuk mencapai target pengurangan emisi CO₂.</p>
2	<p>Analisis Penggunaan Limbah B3 <i>Spent Bleaching Earth</i> Sebagai Bahan Bakar Alternatif di PT. Semen Baturaja (Persero) Tbk</p>	<p>Robiansyah, Mustain, dan Martha Aznury, (2022)</p>	<p>Jurnal penelitian ini membahas tentang penggunaan limbah B3 <i>Spent Bleaching Earth</i> (SBE) sebagai bahan bakar alternatif dalam produksi klinker dengan memanfaatkan kandungan minyak yang ada pada SBE untuk membantu proses pembakaran yang terjadi di dalam mesin <i>rotary kiln</i>.</p>
3	<p>Strategi Penurunan Emisi Pembangkit Listrik Tenaga Uap di Kabupaten Cilacap Dalam Mendukung <i>Nationally Determined Contribution</i></p>	<p>Ahmad Maghfuri, Ssuyono Thamrin, dan Yanif Dwi Kuntjoro, (2022)</p>	<p>Jurnal penelitian ini membahas tentang strategi penurunan emisi pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) di Kabupaten Cilacap, Indonesia, dalam mendukung <i>Nationally Determined Contribution</i> (NDC). Penelitian ini menggunakan metode kualitatif untuk mengkaji strategi penurunan emisi PLTU Cilacap.</p>
4	<p>Analisa Efisiensi Boiler HAMADA Dengan <i>Direct</i> dan <i>Indirect Method</i> di PT Dayasa Aria Prima</p>	<p>Ari Budi Prasajo, Hakim Lutfi dan Achmad Rijanto, (2020)</p>	<p>Jurnal penelitian ini membahas tentang analisis efisiensi pada boiler dengan menggunakan metode langsung dan tidak langsung (<i>direct and indirect method</i>). Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental dalam</p>

			mengumpulkan data dan menganalisis efisiensi <i>boiler</i> . Namun dikarenakan perhitungan efisiensi yang berbeda maka hasil analisis kerugian panas pun berbeda dikarenakan kedua metode tersebut.
5	Analisis Efisiensi Turbin Uap Unit 1 di PT. PJB UBJOM PLTU Pulang Pisang Kalimantan Tengah	Edy Saputro dan Aqli Mursadin, (2021)	Jurnal penelitian ini membahas tentang analisis efisiensi pada turbin uap dengan menggunakan data <i>comissioning</i> pada tahun 2016 dan 2018 untuk membandingkan <i>heat rate turbine</i> dan efisiensi turbin. Hasil yang didapatkan dari penelitian ini ialah terjadi peningkatan efisiensi turbin sebesar 4,18% dari tahun 2016 ke 2018 dengan melakukan perbaikan pada kondensor dan pipa <i>elbow</i> .
6	Analisa Efisiensi Turbin Generator Berdasarkan Kualitas Daya Pada PLTU Pabrik Gula Madukismo	Briliana Kurniasari, Wiwik Handajadi dan Slamet Hani, (2017)	Jurnal penelitian ini membahas tentang efisiensi generator berdasarkan kualitas daya yang dihasilkan, dengan fokus pada penurunan efisiensi yang terjadi pada tahun 2016. Adapun faktor penyebab penurunan efisiensi generator ialah berkurangnya kemampuan kerja generator, rugi-rugi panas pada kumparan, dan rugi-rugi mekanik. Penelitian ini menggunakan metode survei dan tinjauan pustaka, serta aplikasi <i>Steam Property</i> untuk menghitung sifat-sifat uap.
7	<i>Determination of Coal Rank and The Effect of Coal Characteristic on Caloric Value</i>	Evan Rosyadi Ogara, Ade Fadhillah dan Ahmad Ilham, (2023)	Jurnal penelitian ini membahas tentang penentuan peringkat batu bara dan pengaruh karakteristik batu bara terhadap nilai kalori. Karakteristik kandungan pada batu bara terdiri dari <i>total moisture, volatile matter, ash content, fixed carbon, dan total sulfur</i> . Kandungan batu bara tersebut dianalisis menggunakan

			<p>analisa <i>proximate</i> dan uji regresi. Dari penelitian tersebut ditemukan bahwa <i>total moisture</i>, <i>ash</i>, dan <i>total sulfur</i> memiliki hubungan terbalik dengan nilai kalori. Sedangkan <i>volatile matter</i> dan <i>fixed carbon</i> memiliki hubungan yang berbanding lurus.</p>
8	<p><i>Assessment and Working Fluid Comparison of Steam Rankine Cycle-Organic Rankine Cycle Combined System for Severe Cold Territories</i></p>	<p>Hong-Hu Zhang, Ming-Jia Li, Yong-Qiang Feng, Huan Xi dan Tzu-Chen Hung, (2021)</p>	<p>Jurnal penelitian ini membahas tentang sistem siklus rankine. Penelitian ini juga mengusulkan sistem gabungan <i>Steam rankine cycle</i> dan <i>Organic rankine cycle</i> untuk memanfaatkan panas buang dari uap SRC di wilayah dingin yang ekstrem. Penelitian ini melakukan perbandingan dan pemilihan fluida kerja yang cocok untuk kondisi kerja yang berbeda. Hasil menunjukkan bahwa NPI sistem gabungan meningkat seiring dengan penurunan suhu outlet kondensor.</p>
9	<p>Analisi Kinerja Kondensor Terhadap Perubahan Tekanan Vakum di PT PLTN (Persero) Sektor Pembangkitan PLTGU Cilegon</p>	<p>Maulana Fatkhurrahman Bono dan Wiwik Purwati Widyarningsih, (2014)</p>	<p>Jurnal penelitian ini membahas tentang kinerja kondensor terkait pengaruh perubahan tekanan vakum. Tujuan dari penelitian ini ialah untuk mengetahui nilai tekanan vakum dalam kondensor dan faktor-faktor yang mempengaruhi perubahan tekanan vakum tersebut. Hasil analisis menunjukkan bahwa semakin kecil tekanan atau semakin besar vakum dalam kondensor, maka efektivitas kondensor semakin baik. Efisiensi tertinggi yang dicapai pada tekanan vakum -711,74 mmHg dengan efektivitas 93,14%, sedangkan efisiensi terkecil pada tekanan vakum -610,50 mmHg dengan efektivitas 75,42%.</p>

10	<p style="text-align: center;"><i>Analysis and Treatment of Free End Vibration of Condensate Pump Motor Towards Ultra-Supercritical 660MW Turbine</i></p>	<p style="text-align: center;">Wanjun Li, Xiaoxia Li, Qinglian Niu, Tianqi Huang, Deke Zhang dan Yang Dong, (2019)</p>	<p>Jurnal penelitian ini membahas tentang diagnosis dan penanganan getaran ujung bebas pada <i>condensate motor pump</i>. Diagnosis dan analisis dilakukan untuk mencari tahu penyebab getaran berlebih, termasuk pemeriksaan catatan pemeliharaan dan pengumpulan data lapangan. Solusi efektif dalam kasus ini melakukan langkah-langkah seperti mengganti sambungan ekspansi di pipa masuk, menyesuaikan konsentrisitas pipa dan menambahkan katup pengaman. Hasil setelah tindakan perbaikan dilakukan, getaran motor kembali ke nilai normal dan mengurangi resiko bahaya yang dapat terjadi pada peralatan.</p>
----	---	--	---

Kebaruan penelitian ini adalah tidak hanya melakukan analisis penurunan emisi GRK dengan membandingkan penggunaan bahan bakar batu bara murni dengan yang sudah dicampur dengan *spent bleaching earth* (SBE) di PLTU 60MW PT. Cemindo Gemilang Tbk, namun penelitian ini juga sekaligus menganalisis efisiensi pembangkit menggunakan bahan bakar yang sudah disubstitusi beserta efisiensi komponen yang ada seperti *boiler*, turbin, dan generator yang belum banyak dilakukan oleh penelitian terdahulu.