

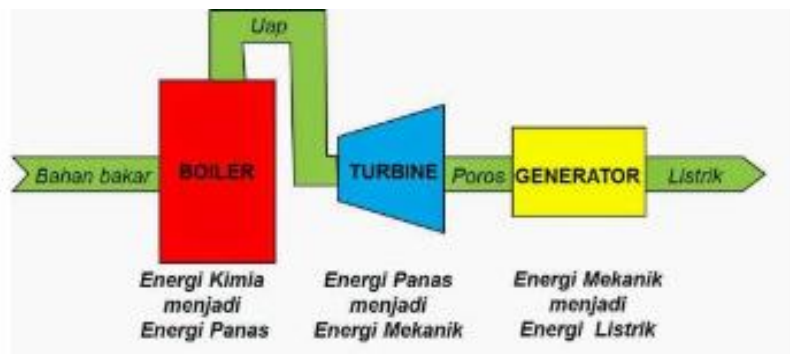
BAB II

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 batubara 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).

2.2 Prinsip Kerja PLTU



Gambar 2.1 Proses Konversi Energi PLTU

Pada gambar 2.1 ditampilkan tentang konversi energi pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) secara sederhana, dimana bahan bakar dibakar melalui *furnance* yang menghasilkan energi panas, bahan bakar ini umumnya berupa batubara yang mengandung energi kimia. Panas yang dihasilkan digunakan untuk memanaskan air di dalam *boiler*, dan mengubahnya menjadi uap bertekanan tinggi. Uap bertekanan tinggi

tersebut dialirkan menuju turbin. Turbin merupakan komponen pada pembangkit yang berbentuk seperti kincir, turbin akan berputar akibat dorongan uap. Putaran turbin ini mengubah energi panas uap menjadi energi mekanik. Lalu turbin yang berputar ini dihubungkan oleh poros ke sebuah generator. Generator inilah yang mengubah energi mekanik putaran turbin menjadi energi listrik.

2.3 *Boiler*

Boiler merupakan bagian dari sistem PLTU yang berfungsi untuk mengubah air menggunakan panas hasil pembakaran menjadi uap. Uap yang dihasilkan *boiler* adalah uap dengan tekanan dan temperatur yang tinggi. (Prima, 2021).



Gambar 2.2 *Boiler* Pembangkit Listrik

2.4 *Turbin Uap*

Turbin uap berfungsi untuk mengubah energi potensial pada uap yang memiliki tekanan tinggi untuk menjadi energi kinetik. Sehingga dengan adanya energi kinetik yang berasal dari uap digunakan langsung untuk memutar poros turbin yang terhubung dengan generator (Prima, 2021). 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. 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.



Gambar 2.3 Turbin UAP PLTU

2.5 Kondensor

Kondensor berfungsi untuk mengkondensasikan uap setelah melalui ekstraksi pada turbin menjadi air kondensat. Air hasil kondensasi kemudian ditampung pada *hotwell* yang akan diteruskan ke *boiler* oleh pompa. 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. (Prima, 2021).



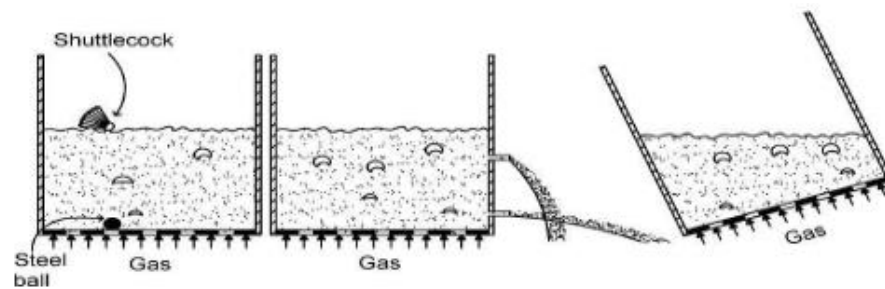
Gambar 2.4 Kondensor

2.6 *Circulating Fluidized Bed (CFB)*

Circulating Fluidized Bed (CFB) merupakan salah satu teknologi pembakaran batubara dan biomassa yang digunakan pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) dengan efisiensi tinggi dan emisi yang lebih rendah dibandingkan dengan metode pembakaran konvensional. Teknologi ini bekerja dengan cara mengalirkan bahan bakar bersama partikel pasir silika atau *bed material* dalam aliran udara yang berkecepatan tinggi, sehingga menciptakan kondisi pembakaran yang lebih homogen dan stabil. Istilah pembakaran yang lebih homogen dan stabil merujuk pada proses pembakaran di mana distribusi suhu dan konsentrasi bahan bakar serta oksidan merata di seluruh area pembakaran, sehingga menghasilkan pembakaran yang konsisten dan efisien.

2.7 Prinsip Kerja *Circulating Fluidized Bed* (CFB)

Fluidisasi pada *boiler* CFB didefinisikan sebagai operasi di mana padatan granular diubah menjadi keadaan seperti fluida dengan menggunakan gas atau cairan. Pada saat kondisi terfluidisasi, gaya gravitasi pada partikel padat granular diimbangi oleh gaya hambat fluida. Dengan demikian, partikel tetap dalam kondisi melayang.



Gambar 2.5 Ilustrasi Fluidasi Material Bed

Pada saat proses pembakaran, material bed yang terdiri dari pasir halus atau abu terbang di dalam *furnance* difluidisasi dengan menyemburkan udara dari bagian bawah ruang bakar menggunakan *nozzle*. Aliran udara ini membuat partikel padat seperti pasir, batubara, dan batu kapur berperilaku seolah-olah seperti fluida, sehingga tercipta kondisi "bed" yang mendidih (*bubbling bed*). Selanjutnya, batubara yang telah dihancurkan dimasukkan dari silo penyimpanan ke dalam ruang pembakaran melalui sistem pengumpan (*coal feeder*) yang terletak di sisi atas atau samping *boiler*. Batubara tersebut kemudian bercampur dengan partikel *material bed* yang telah terfluidisasi dan mengalami pembakaran merata akibat distribusi panas yang baik di seluruh volume ruang bakar. Keunggulan utama sistem ini adalah kemampuan mempertahankan suhu pembakaran yang relatif rendah (sekitar 850–900°C), yang sangat cocok

untuk mengurangi emisi NO_x dan memungkinkan reaksi desulfurisasi secara langsung menggunakan batu kapur di dalam ruang bakar.

2.8 Batu Kapur (*Limestone*)

Batu kapur adalah material alami yang sering digunakan dalam proses pembakaran di *furnance Circulating Fluidized Bed* (CFB) sebagai agen desulfurisasi, tetapi perannya tidak hanya terbatas pada penyerapan emisi gas. Batu kapur juga berperan dalam menjaga kestabilan termal dan efisiensi reaksi pembakaran, yang secara tidak langsung memengaruhi efisiensi termal dan keluaran energi listrik sistem pembangkit. (Basu, 2006).

Pada suhu tinggi, batu kapur mengalami dekomposisi menjadi kalsium oksida (CaO) dan karbon dioksida (CO₂)



Selanjutnya, CaO bereaksi dengan SO₂ dan oksigen (O₂) membentuk kalsium sulfat (CaSO₄) yang merupakan senyawa padat dan stabil. Reaksi ini bersifat endotermik, artinya menyerap panas dari sistem. Namun meskipun menyerap sebagian panas, produk dekomposisi berupa kalsium oksida (CaO) memiliki beberapa peran penting dalam reaksi kimia selanjutnya, seperti menyerap gas-gas asam jika ada, serta meningkatkan fluidisasi dan kestabilan suhu pada ruang bakar (*furnace*). (Basu, 2006).

2.9 Karakteristik dan Jenis Batubara

Batubara memiliki karakteristik dan jenis yang berbeda-beda, biasanya yang umum digunakan sebagai bahan bakar Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) adalah batubara berjenis lignit, sub-bituminus dan bituminus.

1. Lignit

Lignit merupakan peringkat batubara terendah, terbentuk dari kompresi gambut dan memiliki kandungan karbon sekitar 25–35% serta kadar air yang sangat tinggi, mencapai 75%. Kandungan energinya berkisar antara 10 hingga 20 MJ/kg. Karena kadar air dan volatilitasnya yang tinggi, lignit mudah mengalami pembakaran spontan dan sulit disimpan dalam jangka panjang.

2. Sub-Bituminus

Sub-bituminus merupakan peringkat batubara menengah dengan kandungan karbon antara 35–45% dan kadar air 15–30%. Nilai kalorinya berkisar antara 19,3 hingga 26,7 MJ/kg. Batubara ini tidak bersifat kokas dan umumnya digunakan untuk pembangkit listrik tenaga uap.

3. Bituminus

Bituminus adalah peringkat batubara yang lebih tinggi, dengan kandungan karbon sekitar 45–86% dan nilai kalori antara 24,4 hingga 32,6 MJ/kg. Batubara ini bersifat aglomeratif, yang berarti dapat melebur dan membentuk kokas saat dipanaskan, menjadikannya ideal untuk industri baja dan pembangkit listrik. Bituminus merupakan jenis batubara yang paling melimpah secara global. (Guo et al., 2019).

Dalam menentukan efisiensi pembakaran dan perhitungan *output* energi pada sistem Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) berbasis *Circulating Fluidized Bed* (CFB), karakteristik batubara yang digunakan menjadi faktor penting yang tidak dapat diabaikan. Nilai kalor (*High*

Heating Value/HHV), laju pembakaran, kadar kelembapan, serta efisiensi sistem terhadap masing-masing jenis batubara memberikan pengaruh signifikan terhadap performa pembangkitan secara keseluruhan. Pemilihan jenis batubara yang tepat akan berdampak langsung pada efisiensi termal, stabilitas pembakaran, serta emisi gas buang yang dihasilkan oleh sistem pembangkit.

Tabel 2.1 Data Jenis Batubara

No	Jenis Batubara	HHV [kJ/kg]	mbb [kg/s]	Efisiensi [%]
1	Lignit	16975	1,789	79,938
2	Sub Bituminus	23782	1,196	85,824
3	Bituminus	29100	0,948	88,506

Dari Tabel 2.1 dapat dilihat bahwa batubara bituminus memiliki nilai kalor tertinggi yaitu sebesar 29.100 kJ/kg serta efisiensi tertinggi sebesar 88,506%. Hal ini menunjukkan bahwa batubara bituminus lebih efisien dalam menghasilkan energi panas dibandingkan dengan jenis batubara lainnya. Oleh karena itu, dalam penelitian ini akan digunakan batubara jenis bituminus sebagai dasar simulasi untuk mengetahui pengaruh variasi rasio batu kapur terhadap *output* energi listrik.

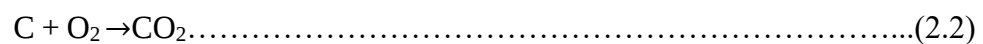
2.10 Hubungan Batubara dan Batu Kapur terhadap Emisi

Batubara yang dibakar di dalam sistem *Circulating Fluidized Bed* (CFB) menghasilkan energi panas, namun juga melepaskan berbagai gas buang hasil reaksi kimia. Komposisi emisi ini sangat dipengaruhi oleh

kandungan unsur dalam batubara, terutama karbon (C), hidrogen (H), sulfur (S), dan mineral pengotor lain. Penambahan batu kapur (CaCO_3) ke dalam proses pembakaran berperan penting dalam mengendalikan emisi, khususnya sulfur dioksida (SO_2)

Batubara umumnya mengandung karbon, hidrogen, sulfur, nitrogen, serta mineral. Saat dibakar, beberapa reaksi utama terjadi, antara lain:

- Karbon:



Menghasilkan karbon dioksida (CO_2), gas rumah kaca utama.



Jika oksigen terbatas, terbentuk karbon monoksida (CO) yang berupa gas beracun.

- Hidrogen:



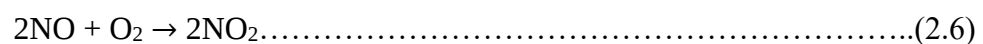
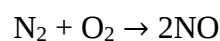
Menghasilkan uap air (H_2O).

- Sulfur:



Menghasilkan sulfur dioksida (SO_2), penyebab utama polusi udara seperti hujan asam karena mengandung asam sulfat.

- Nitrogen:



Membentuk nitrogen oksida NO_x penyebab kabut asap.

2.11 Efisiensi Pembakaran dan *Output* Energi Listrik

Efisiensi pembakaran merupakan parameter penting dalam menilai kinerja termal dari sistem pembangkit listrik, khususnya pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) berbasis *Circulating Fluidized Bed* (CFB). Efisiensi ini menggambarkan seberapa besar energi kimia dari bahan bakar yang berhasil dikonversikan menjadi energi panas, yang kemudian digunakan untuk menghasilkan energi listrik. (Bassan et al., 2008). Efisiensi pembakaran dapat dicari dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\eta_{boiler} = \frac{Q_{keluar}}{Q_{masuk}} \times 100\% \dots \dots \dots (2.7)$$

Dimana:

Q_{keluar} = energi panas yang diserap oleh air (*output*)

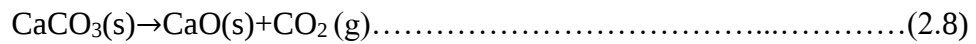
Q_{masuk} = energi kimia dari bahan bakar (*input*)

Di Indonesia, belum ada SNI secara spesifik yang menetapkan bahwa batas minimal efisiensi *boiler* pada suatu pembangkit. Namun perusahaan listrik seperti PLN dan IP (Indonesia Power) mengacu pada ASME PTC 4 dalam pengujian kinerja *boiler*. Pada PLTU batubara tipe subcritical dan CFB, efisiensi operasi umumnya berada pada rentang 84% hingga 90%, sedangkan efisiensi dibawah 80% memerlukan tindakan perbaikan kinerja. (ASME, 2009)

2.12 Pengaruh Batu Kapur terhadap Efisiensi Sistem

Batu kapur atau *limestone* (CaCO_3) digunakan dalam sistem *Circulating Fluidized Bed* (CFB) sebagai material aditif untuk mendukung proses pembakaran agar lebih stabil dan efisien. Dalam proses pembakaran CFB, suhu ruang bakar dijaga pada kisaran 850–900°C. Pada suhu tersebut,

batu kapur mengalami reaksi dekomposisi endotermik yang menghasilkan kalsium oksida (CaO) dan gas karbon dioksida (CO₂), melalui reaksi:



Meskipun reaksi ini menyerap sebagian panas dari sistem, keberadaan CaO membantu menciptakan lingkungan pembakaran yang lebih stabil dan merata. Stabilitas suhu dalam ruang bakar sangat penting untuk memastikan bahan bakar terbakar secara sempurna. Pembakaran yang merata dapat mengurangi terjadinya titik-titik suhu rendah (*cold spots*) dan meningkatkan efisiensi perpindahan panas dari ruang bakar ke fluida kerja.

Batu kapur juga berperan dalam mengurangi pembentukan kerak (*slagging*) yang dapat mengganggu proses perpindahan panas dan menurunkan efisiensi sistem. Dengan meminimalkan pembentukan residu padat dan memperbaiki kondisi fluidisasi partikel dalam *furnace*, batu kapur membantu menjaga performa sistem tetap optimal. Peningkatan efisiensi pembakaran berpengaruh langsung terhadap jumlah energi panas yang diubah menjadi uap, sehingga berdampak pada peningkatan daya listrik yang dihasilkan oleh turbin dan generator.

Penggunaan batu kapur dalam rasio tertentu terhadap kandungan belerang dalam bahan bakar, misalnya rasio Ca/S sebesar 1,5 hingga 2,5, dapat meningkatkan efisiensi pembakaran *boiler* secara signifikan. Efisiensi termal yang lebih tinggi menghasilkan *output* energi listrik yang lebih besar dari jumlah bahan bakar yang sama. Sebagai ilustrasi, jika energi *input* bahan bakar sebesar 1000 MWh dan efisiensi sistem meningkat dari 35% menjadi 38%, maka energi listrik yang dihasilkan akan meningkat dari 350

MWh menjadi 380 MWh. Peningkatan ini menunjukkan bahwa batu kapur memiliki kontribusi yang nyata dalam mendukung performa termal dan *output* energi sistem PLTU berbasis CFB. (Miller, 2005).

2.13 Rasio Ca/S dan Dampaknya terhadap Efisiensi

Rasio Ca/S merupakan perbandingan antara jumlah kalsium (Ca) yang ditambahkan melalui batu kapur (CaCO_3) dengan jumlah sulfur (S) yang terkandung dalam bahan bakar padat seperti batubara. Rasio ini menjadi salah satu parameter penting dalam sistem pembakaran *Circulating Fluidized Bed* (CFB) karena berpengaruh langsung terhadap efektivitas reaksi desulfurisasi serta kestabilan proses pembakaran. Batu kapur yang mengalami dekomposisi pada suhu sekitar 850–900°C akan menghasilkan kalsium oksida (CaO), yang kemudian bereaksi dengan gas sulfur dioksida (SO_2) untuk membentuk senyawa kalsium sulfat (CaSO_4).

Dalam lapangan, rasio Ca/S yang digunakan pada sistem CFB umumnya berada dalam kisaran 1,5 hingga 2,5. Jika rasio terlalu rendah, maka jumlah kalsium tidak cukup untuk mengikat seluruh sulfur yang dilepaskan selama pembakaran, sehingga meningkatkan risiko emisi SO_2 dan menurunkan efisiensi pembakaran karena sebagian bahan bakar mungkin tidak terbakar sempurna. Sebaliknya, jika rasio Ca/S terlalu tinggi, maka batu kapur yang berlebih dapat menyerap panas secara berlebihan melalui reaksi endotermik dekomposisi, serta menghasilkan residu padat yang dapat mengganggu fluidisasi partikel di dalam *furnace*. Kedua kondisi tersebut berpotensi menurunkan efisiensi termal sistem dan mengurangi jumlah energi listrik yang dihasilkan dari proses konversi energi.

Dengan menetapkan rasio Ca/S yang sesuai, proses pembakaran dapat berlangsung lebih stabil dan efisien. Pembakaran yang lebih sempurna akan menghasilkan lebih banyak energi panas, yang selanjutnya diubah menjadi uap untuk menggerakkan turbin dan menghasilkan energi listrik. Oleh karena itu, pengendalian rasio Ca/S tidak hanya berperan dalam pengurangan emisi, tetapi juga memiliki implikasi langsung terhadap performa termal dan *output* energi dari sistem pembangkit listrik berbasis CFB. Rasio Ca/S dapat dihitung secara matematis dengan menggunakan persamaan:

$$\text{Rasio Ca/S} = \frac{m_{CaCO_3}}{m_s} \dots\dots\dots(2.9)$$

Dimana:

m_{CaCO_3} = massa batu kapur (dalam kg atau ton)

m_s = massa unsur sulfur dalam bahan bakar (dalam kg atau ton)

Rasio tersebut digunakan untuk menentukan seberapa banyak batu kapur yang dibutuhkan untuk mengikat sulfur dari bahan bakar, agar reaksi pembentukan kalsium sulfat ($CaSO_4$) berjalan efektif. Rasio Ca/S bersifat stoikiometrik, artinya berkaitan langsung dengan keseimbangan reaksi kimia antara kalsium oksida (CaO) dan sulfur dioksida (SO_2). Secara teori, rasio Ca/S = 1 dianggap cukup untuk sepenuhnya mengikat sulfur, tetapi dalam praktik operasional, dibutuhkan rasio lebih besar (biasanya 1,5–2,5) karena adanya efisiensi reaksi yang tidak 100%.

2.14 Perhitungan *Output* Energi Listrik

Output energi listrik merupakan hasil energi bersih yang dihasilkan oleh pembangkit listrik dari proses konversi energi termal hasil pembakaran

bahan bakar. Pada pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) yang menggunakan sistem *Circulating Fluidized Bed* (CFB), efisiensi konversi energi sangat bergantung pada kondisi pembakaran, jenis bahan bakar, dan faktor tambahan seperti penggunaan batu kapur (*limestone*). Untuk menghitung energi listrik yang dihasilkan, dapat menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$E_{listrik} = \eta \times E_{input} \dots \dots \dots (2.10)$$

Dimana:

$E_{listrik}$ = energi listrik yang dihasilkan (MWh atau kWh)

η = efisiensi termal pembangkit

E_{input} = energi *input* dari bahan bakar (MWh atau kWh)

Sedangkan untuk mencari energi *input* total dari bahan bakar dapat menggunakan persamaan:

$$E_{input} = m \times HHV \dots \dots \dots (2.11)$$

E_{input} = energi *input* total dari bahan bakar (kJ)

m = massa bahan bakar yang dibakar (kg)

HHV = *Higher Heating Value*/Nilai kalor atas bahan bakar (kJ/kg)

Dengan mengetahui besarnya energi input dan efisiensi termal dari pembangkit, maka output energi listrik yang dihasilkan dapat dihitung secara kuantitatif. Perhitungan ini menjadi dasar untuk memahami bagaimana sistem pembangkit bekerja secara menyeluruh, terutama dalam mengubah energi kimia dari bahan bakar menjadi energi listrik yang dapat dimanfaatkan. Selain itu, analisis ini juga berguna untuk mengevaluasi sejauh mana perubahan pada parameter operasional, seperti jenis bahan

bakar, nilai kalor, atau penambahan batu kapur, dapat memengaruhi hasil energi yang diperoleh. Dengan demikian, pembahasan ini memberikan gambaran awal mengenai hubungan antara input energi, efisiensi sistem, dan output energi listrik dalam suatu proses pembangkitan tenaga uap.

2.15 Konversi Energi dari kJ/s ke MWh

Dalam sistem pembangkit tenaga listrik, daya yang dihasilkan oleh proses konversi energi umumnya dinyatakan dalam satuan kilojoule per detik (kJ/s) atau ekuivalen dengan kilowatt (kW), karena $1 \text{ kJ/s} = 1 \text{ kW}$. Satuan ini menunjukkan laju energi yang dihasilkan setiap detik. Namun, karena nantinya hasil simulasi akan menghasilkan satuan kilojoule per detik (kJ/s) maka harus ada proses konversi untuk mendapat hasil akhir berupa megawatt-hour (MWh). Untuk melakukan konversi dari kJ/s ke MWh, perlu digunakan pendekatan berbasis rumus fisika dasar, yaitu:

$$\text{Energi (J)} = \text{Daya (W)} \times \text{Waktu (s)} \dots \dots \dots (2.12)$$

Karena $1 \text{ watt} = 1 \text{ joule per detik}$, maka daya dalam kilojoule per detik dapat dikalikan dengan waktu untuk memperoleh energi total dalam kilojoule. Energi tersebut dapat dikonversi ke dalam megawatt-hour menggunakan faktor konversi sebagai berikut:

- $1 \text{ kWh} = 3.600 \text{ kJ}$
- $1 \text{ MWh} = 1.000 \text{ kWh} = 3.600.000 \text{ kJ} = 3.6 \times 10^6 \text{ kJ}$

Maka tercipta persamaan konversi dari kJ/s ke MWh selama waktu operasi 1 jam (3.600 detik) adalah:

$$\text{Energi (MWh)} = \frac{P \times 3.600}{3.6 \times 10^6} \dots \dots \dots (2.13)$$

2.16 Penelitian Terkait

Tabel 2.2 Penelitian Terkait

No	Judul Jurnal	Peneliti dan Tahun Penelitian	Pembahasan Jurnal
1.	Analisis Pengaruh Batu Kapur Terhadap Penurunan Kadar Sulfur Dioksida Gas Buang Boiler Pada PT. PLN (Persero) PLTU Barru	Werni Gusti Marampa (2014)	Penelitian ini menganalisis efektivitas penggunaan batu kapur dalam menurunkan kadar SO ₂ pada gas buang boiler di PLTU Barru. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan batu kapur dapat menurunkan kadar SO ₂ hingga 98%, menjadikannya metode desulfurisasi yang efisien dan ramah lingkungan.
2.	Fungsi Limestone/Kapur (CaCO ₃) pada Boiler CFB	Y.E. Feriyanto (2020)	Artikel ini membahas peran batu kapur dalam proses desulfurisasi pada boiler CFB. Dijelaskan bahwa reaksi antara CaCO ₃ dan SO ₂ dapat terjadi secara langsung atau tidak langsung, tergantung pada temperatur dan tekanan parsial gas CO ₂ . Reaksi ini penting untuk mengurangi emisi SO ₂ dan meningkatkan efisiensi pembakaran.
3.	Studi Eksperimental Pengaruh Properties Batubara terhadap Karakteristik Pembakaran, Flue Gas, dan Fly Ash pada Reaktor Mini Circulating Fluidized Bed (CFB) Combustor	Kevin Limantara (2024)	Penelitian ini mempelajari pengaruh sifat-sifat batubara terhadap karakteristik pembakaran dalam reaktor mini CFB, termasuk distribusi temperatur, kandungan flue gas, dan unburned carbon pada fly ash. Meskipun fokus utama bukan pada rasio Ca/S, penelitian ini memberikan wawasan tentang bagaimana variabel pembakaran

No	Judul Jurnal	Peneliti dan Tahun Penelitian	Pembahasan Jurnal
			mempengaruhi efisiensi sistem CFB.
4.	Analisis Sistem Ruang Bakar Boiler Jenis Fluidized Bed Combustion (FBC) pada PLTU.	R. R. Rachman, D. R. Pratama, dan R. R. Rachman (2019)	Penelitian ini membahas pengaruh rasio Ca/S terhadap efisiensi pembakaran dan kadar SO₂ yang dihasilkan dalam sistem pembakaran CFB. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan rasio Ca/S dapat menurunkan kadar SO₂, namun juga dapat menyebabkan penurunan efisiensi boiler akibat meningkatnya losses yang terjadi, seperti losses akibat moisture dari batu kapur dan proses kalsinasi. Data efisiensi yang disajikan dapat digunakan sebagai acuan dalam membandingkan efisiensi sistem dengan dan tanpa penggunaan batu kapur.
5.	Perencanaan Ruang Bakar Fluidisasi Menggunakan Bahan Bakar Sampah	M. R. D. Fadillah, M. S. Rachman, dan A. S. Nugroho (2022)	Penelitian ini melakukan pendekatan matematis untuk menganalisis reaksi antara muatan bahan bakar batubara dan batu kapur dengan udara pada pembakaran batubara di dalam tungku fluidized bed sirkulasi. Analisis ini dapat memberikan wawasan tambahan mengenai pengaruh rasio Ca/S terhadap efisiensi pembakaran dalam sistem CFB.