



## ANALISIS CAMPURAN BATU BARA DAN BATU KAPUR PADA EMISI SO<sub>2</sub> PLTU BERBASIS CFB

<sup>1</sup>Regi Rivera Riyadi, <sup>2</sup>Linda Faridah

<sup>1</sup>Teknik Elektro, Universitas Siliwangi

<sup>2</sup>Teknik Elektro, Universitas Siliwangi

217002507@student.unsil.ac.id

### ABSTRACT

*The national demand for electrical energy continues to increase along with population growth and industrialization. Coal-fired power plants (PLTU) remain one of the main sources of electricity in Indonesia; however, they produce exhaust gas emissions, particularly sulfur dioxide (SO<sub>2</sub>), which are harmful to the environment. One of the efforts to reduce these emissions is the application of Circulating Fluidized Bed (CFB) technology with the addition of limestone (CaCO<sub>3</sub>) as a sulfur-capturing agent. This study aims to analyze the effect of varying coal and limestone mixing ratios on energy efficiency and electrical power output in a CFB-based PLTU system. The simulation was conducted using MATLAB Simulink with mixture ratios of 100:0, 90:10, 85:15, 80:20, and 70:30, and boiler efficiencies ranging from 0.84 to 0.90. The results show that adding limestone decreases power output due to its endothermic characteristics but can reduce SO<sub>2</sub> emissions by more than 80%.*

**Keywords:** PLTU, CFB, coal, limestone, energy efficiency.

### ABSTRAK

Kebutuhan energi listrik nasional terus meningkat seiring pertumbuhan penduduk dan industrialisasi. PLTU menjadi salah satu sumber utama energi listrik di Indonesia, akan tetapi PLTU menghasilkan emisi gas buang, khususnya sulfur dioksida (SO<sub>2</sub>), yang berbahaya bagi lingkungan. Salah satu upaya pengurangan emisi adalah penerapan teknologi *Circulating Fluidized Bed* (CFB) dengan penambahan batu kapur (CaCO<sub>3</sub>) sebagai agen penangkap sulfur. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi rasio campuran batu bara dan batu kapur terhadap efisiensi energi dan output daya listrik pada sistem PLTU berbasis CFB. Simulasi dilakukan dengan MATLAB Simulink menggunakan variasi rasio 100:0, 90:10, 85:15, 80:20, dan 70:30, serta efisiensi boiler antara 0,84–0,90. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan batu kapur menurunkan daya keluaran akibat sifat endotermik batu kapur, namun mampu menekan emisi SO<sub>2</sub> hingga lebih dari 80%.

**Kata Kunci:** PLTU, CFB, batu bara, batu kapur, efisiensi energi.



## I. PENDAHULUAN

Listrik merupakan kebutuhan utama dalam kehidupan manusia modern. Hampir seluruh aktivitas industri, transportasi, maupun rumah tangga bergantung pada pasokan energi listrik yang stabil dan berkelanjutan. Di Indonesia, sebagian besar energi listrik masih dihasilkan dari Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) yang menggunakan batu bara sebagai bahan bakar utama. Menurut data Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (KESDM), lebih dari 60% kapasitas terpasang pembangkit nasional berasal dari PLTU [1]. Kondisi ini menunjukkan tingginya ketergantungan terhadap batu bara sebagai sumber energi fosil, meskipun dampak lingkungannya cukup besar. Pembakaran batu bara menghasilkan berbagai emisi gas buang seperti karbon dioksida ( $\text{CO}_2$ ), nitrogen oksida ( $\text{NO}_x$ ), dan sulfur dioksida ( $\text{SO}_2$ ). Gas  $\text{SO}_2$  menjadi perhatian khusus karena berpotensi menyebabkan pencemaran udara dan hujan asam. Untuk mengurangi dampak tersebut, diperlukan teknologi pembakaran yang efisien dan ramah lingkungan. Salah satu teknologi yang banyak dikembangkan adalah *Circulating Fluidized Bed* (CFB) [2]. Teknologi ini bekerja pada suhu pembakaran yang lebih rendah dibandingkan sistem konvensional, yaitu sekitar 850–900°C [3], sehingga mampu menekan pembentukan emisi berbahaya. Salah satu keunggulan sistem CFB adalah kemampuannya menggunakan berbagai jenis bahan bakar dengan karakteristik yang berbeda, termasuk batu bara kadar rendah, biomassa, serta bahan aditif seperti batu kapur (*limestone*). Batu kapur berfungsi sebagai agen desulfurisasi yang mampu menangkap sulfur di dalam ruang bakar melalui reaksi kimia antara kalsium oksida ( $\text{CaO}$ ) dan gas sulfur dioksida ( $\text{SO}_2$ ) membentuk kalsium sulfat ( $\text{CaSO}_4$ ) [4]. Reaksi ini secara efektif mengurangi emisi gas buang tanpa perlu sistem penanganan tambahan di luar boiler. Namun demikian, penambahan batu kapur dalam proses pembakaran juga memiliki konsekuensi terhadap performa termal sistem. Reaksi dekomposisi batu kapur yang bersifat endotermik dapat menyerap sebagian panas pembakaran, sehingga menurunkan efisiensi energi dan output daya listrik. Oleh karena itu, diperlukan analisis yang seimbang antara peningkatan efektivitas penyerapan sulfur dan penurunan performa energi akibat campuran batu kapur yang berlebihan [5].

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi rasio campuran batu bara dan batu kapur terhadap efisiensi energi dan daya keluaran listrik pada PLTU dengan sistem CFB. Simulasi dilakukan menggunakan MATLAB Simulink dengan

variasi rasio 100:0, 90:10, 85:15, 80:20, dan 70:30 serta efisiensi boiler antara 0,84–0,90. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan gambaran mengenai rasio campuran optimal yang mampu menekan emisi  $\text{SO}_2$  tanpa menurunkan efisiensi pembangkitan secara signifikan.

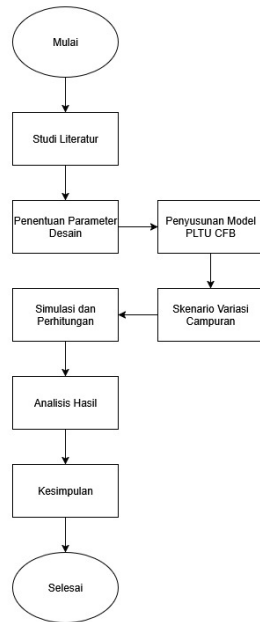
## II. METODE PENELITIAN

Metodologi penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh variasi rasio campuran batu bara dan batu kapur terhadap efisiensi energi serta daya keluaran listrik pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) berbasis *Circulating Fluidized Bed* (CFB). Penelitian dilakukan melalui pendekatan simulatif menggunakan perangkat lunak MATLAB Simulink. Penelitian ini dilakukan dalam beberapa tahapan yang meliputi:

1. Melakukan studi literatur atau studi pustaka yang bertujuan untuk mencari rumusan masalah dan mencari dasar teori yang dapat digunakan untuk dasar acuan dalam memecahkan masalah yang bersumber atau bereferensi dari jurnal nasional, internasional, website maupun dari buku.
2. Menentukan parameter-parameter utama yang digunakan dalam perancangan model. Parameter tersebut meliputi nilai kalor batu bara, laju massa bahan bakar, serta rasio campuran batu bara dan batu kapur pada berbagai skenario.
3. Menyusun model konseptual Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) dengan menerapkan CFB dengan menggunakan *software* Simulink/Matlab
4. Setelah model tersusun, ditentukan beberapa skenario simulasi yang menggunakan rasio campuran batu bara dan batu kapur yang berbeda.
5. Pada tahap ini, setiap skenario campuran dimasukkan ke dalam model Simulink untuk dilakukan simulasi. Hasil simulasi memberikan keluaran berupa daya listrik yang dihasilkan (MW), energi listrik kumulatif selama periode operasi tertentu (MWh), serta efisiensi total sistem.

Selanjutnya dilakukan analisis untuk mengetahui pengaruh variasi campuran batu bara dan batu kapur terhadap kinerja pembangkit. Analisis difokuskan pada hubungan rasio campuran dengan output daya dan efisiensi sistem. Selain itu, dilakukan juga analisis terhadap emisi gas  $\text{SO}_2$ . Diperhatikan pula manfaat penggunaan batu kapur dalam menurunkan emisi sulfur meskipun terdapat kemungkinan penurunan daya akibat berkurangnya fraksi batu bara. Hasil

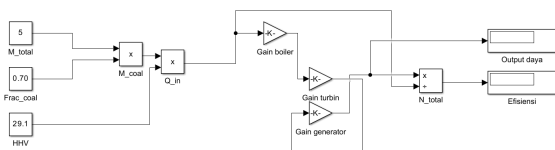
analisis ini menjadi dasar dalam menarik kesimpulan terkait performa desain PLTU CFB.



GAMBAR 1  
 DIAGRAM ALIR PENELITIAN

### III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini membutuhkan data untuk menjadikan kurva perbandingan antara tiap rasio batu kapur yang dicampurkan untuk melakukan simulasi dan melihat perbedaan *output* energi listrik dari setiap rasio perbandingan antara rasio batu kapur yang digunakan. Dalam penelitian ini, penulis ingin melihat perbedaan *output* energi listrik yang dihasilkan ketika adanya batu kapur yang dicampurkan pada ruang pembakaran (*furnance*) sebagai bahan bakar aditif dengan rasio yang berbeda-beda, lalu menganalisis berapa rasio campuran batu bara dengan batu kapur yang menghasilkan *output* energi listrik terbesar dan dapat dinyatakan efisien.



GAMBAR 2  
 RANGKAIAN SIMULASI PADA SIMULINK

Masing-masing blok memiliki fungsinya masing-masing yang saling terhubung membentuk alur

perhitungan energi. Proses dimulai dari *input* berupa massa total bahan bakar ( $M_{total}$ ) dan fraksi batu bara ( $Frac_{coal}$ ), karena dalam sistem CFB bahan bakar yang digunakan dapat berupa campuran batu bara dan batu kapur. Dari kedua variabel tersebut diperoleh massa batu bara yang kemudian dikalikan dengan nilai kalor (HHV) untuk menghitung energi panas yang tersedia ( $Q_{in}$ ). Energi panas yang dihasilkan tidak seluruhnya bisa digunakan, sehingga pada rangkaian diberikan blok *gain* yang merepresentasikan efisiensi tiap komponen utama yang biasanya terdapat dalam sektor pembangkit, yaitu *boiler*, turbin dan generator. Susunan *gain* secara seri mencerminkan tahapan konversi energi dari panas  $\rightarrow$  uap  $\rightarrow$  energi mekanik  $\rightarrow$  energi listrik. Setelah melewati semua tahapan konversi, hasil keluaran daya berupa daya listrik dihitung dan ditampilkan pada blok “*Output Daya*”.

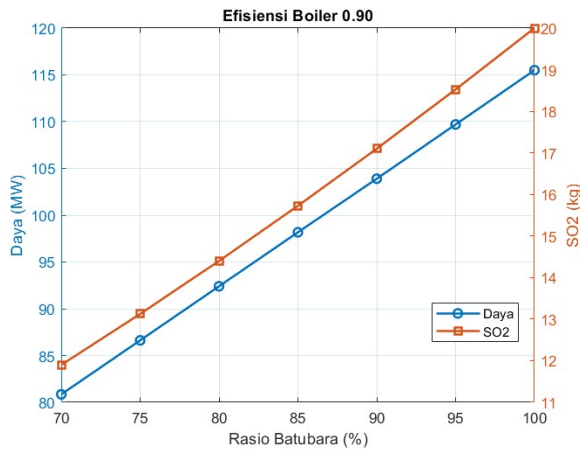
TABEL 1  
 HASIL SIMULASI

No	Batu bara dalam campuran (f_coal)	Efisiensi boiler (n_boiler)	Daya keluaran (p_out)
1	100:00:00	0.90	115,5 MW
2	95:05:00	0.90	109,7 MW
3	90:10:00	0.90	103,9 MW
4	85:15:00	0.90	96,17 MW
5	80:20:00	0.90	92,4 MW
6	75:25:00	0.90	86,62 MW
7	70:30:00	0.90	80,85 MW

Berdasarkan tabel 1, salah satu hasil simulasi dengan penetapan efisiensi *boiler* sebesar 0.90, di mana terlihat terdapat penurunan energi listrik di setiap campuran batu kapur yang dimasukkan, akan tetapi nantinya akan ada trade yang ditukar yaitu penurunan emisi  $SO_2$ . Untuk memvalidasi hasil simulasi pada penelitian ini, maka dilakukan juga perhitungan manual pada sub bab ini dengan mengambil salah satu contoh hasil simulasi pada efisiensi *boiler* 0.90 dengan perbandingan batu bara dan batu kapur sebesar 70:30 dengan menggunakan persamaan.

$$n_{sys} = 0.90 \times 0.98 = 0,882$$

$$P_{out} = 91,67 \times 0,882 = 80,85 \text{ MW}$$



GAMBAR 3  
GRAFIK HASIL SIMULASI

Penambahan batu kapur terbukti efektif menekan emisi  $\text{SO}_2$ , tapi berimplikasi terhadap penurunan daya karena batu kapur tidak memberikan kontribusi energi dalam proses pembakaran. Dapat disimpulkan pemilihan rasio campuran yang optimal dibutuhkan agar sektor Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) yang ingin menerapkan *boiler* bertipe *Circulating Fluidized Bed* (CFB) dapat memaksimalkan *trade-off* antara kebutuhan energi dan target pengendalian emisi.

#### IV. KESIMPULAN

Penelitian ini telah berhasil melakukan pemodelan sistem Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) berbasis *Circulating Fluidized Bed* (CFB) menggunakan MATLAB Simulink sebagai media simulasi untuk merepresentasikan alur konversi energi dari proses pembakaran hingga pembangkitan listrik. Model ini terdiri dari komponen utama seperti boiler, turbin uap, dan generator yang saling terhubung, sehingga mampu memberikan gambaran performa pembangkitan pada berbagai kondisi operasi. Berdasarkan hasil simulasi, variasi rasio campuran batu bara dan batu kapur terbukti memberikan pengaruh signifikan terhadap daya keluaran dan efisiensi energi sistem. Semakin besar persentase batu bara yang digunakan, semakin tinggi pula daya listrik yang dihasilkan. Hal ini terjadi karena batu bara memiliki nilai kalor tinggi yang menjadi sumber utama energi panas dalam proses pembakaran. Sebaliknya, peningkatan persentase batu kapur dalam campuran cenderung menurunkan daya keluaran karena batu kapur tidak memiliki nilai kalor sehingga tidak berkontribusi terhadap pelepasan energi selama pembakaran. Sifat endotermik reaksi dekomposisi  $\text{CaCO}_3$  juga menyerap sebagian panas sehingga

efisiensi energi menjadi lebih rendah. Namun demikian, penambahan batu kapur menunjukkan kinerja yang sangat baik dalam menekan emisi  $\text{SO}_2$  di area pembakaran boiler. Reaksi kimia antara kalsium oksida hasil dekomposisi batu kapur dengan gas sulfur mampu mengubah sulfur menjadi senyawa seperti  $\text{CaSO}_3$  dan  $\text{CaSO}_4$  yang bersifat lebih ramah lingkungan. Semakin tinggi rasio batu kapur dalam campuran, semakin besar pula penurunan emisi  $\text{SO}_2$  yang dapat dicapai. Dengan kata lain, terdapat *trade-off* antara peningkatan performa daya listrik dan pengurangan emisi gas buang pada sistem PLTU berbasis CFB. Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pemanfaatan batu kapur sebagai agen desulfurisasi pada boiler CFB efektif dalam meningkatkan aspek lingkungan pembangkitan listrik, meskipun perlu diperhatikan dampaknya terhadap penurunan daya keluaran.

#### V. SARAN

Penelitian ini dilakukan dengan pendekatan simulasi sehingga masih terdapat ruang pengembangan untuk memperoleh hasil yang semakin mendekati kondisi operasi nyata. Oleh karena itu, bagi peneliti selanjutnya yang ingin meninjau lebih dalam performa energi pada pembangkit dengan teknologi *Circulating Fluidized Bed* (CFB), disarankan untuk menggunakan data primer langsung dari pembangkit yang telah mengoperasikan sistem tersebut. Penggunaan data aktual akan memberikan validasi yang lebih kuat terhadap hasil analisis. Selain itu, model PLTU CFB dalam penelitian ini masih bersifat konseptual dan disederhanakan. Pengembangan model yang lebih detail menggunakan perangkat lunak perancangan pembangkit khusus dapat dilakukan untuk memperoleh representasi yang lebih komprehensif, termasuk proses termodinamika secara menyeluruh dan dinamika operasional setiap komponen pembangkit. Saran berikutnya adalah menambahkan aspek analisis ekonomi dan lingkungan pada penelitian terkait. Evaluasi seperti biaya operasional, konsumsi batu kapur, serta estimasi penghematan biaya penanganan emisi akan membuat pembahasan lebih relevan dengan penerapan nyata di sektor industri. Dengan memperhatikan kedua aspek tersebut, kajian terhadap teknologi CFB pada PLTU dapat memberikan panduan yang lebih tepat dalam pengambilan keputusan teknis maupun investasi untuk masa depan pembangkitan listrik berbahan bakar batu bara yang lebih berkelanjutan.



### UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Laboratorium Teknik Elektro Universitas Siliwangi sebagai fasilitator saya untuk menyelesaikan penelitian tugas akhir ini dan dosen-dosen yang telah membantu untuk menyelesaikan penelitian ini serta penulis mengucapkan terima kasih juga untuk semua elemen yang telah berkontribusi pada penelitian ini yang tidak bisa disebutkan satu persatu.

### DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Yuliyani and M. M. Abdul, "Analisis Sistem Ruang Bakar Boiler Jenis Fluidized Bed Combustion untuk PLTU Kapasitas 8 MW," 2019.
- [2]. L. Guo, M. Zhai, Z. Wang, Y. Zhang, and P. Dong, "Comparison of bituminous coal and lignite during combustion: Combustion performance, coking and slagging characteristics," *Journal of the Energy Institute*, vol. 92, no. 3, pp. 802–812, Jun. 2019, doi: 10.1016/j.joei.2018.02.004.
- [3]. D. A. Maharani, E. Naryono, and A. Eko, "PERHITUNGAN EFISIENSI PADA BOILER di PT. PLTU TANJUNG AWAR-AWAR," vol. 2021, no. 2, pp. 414–420, 2022, [Online]. Available: <http://distilat.polinema.ac.id>
- [4]. O. Wahyu Irawan, L. Susdiawan Pratama, C. Insani, P. Studi Teknik Mesin ITI, J. Raya Puspipstek Serpong, and T. Selatan-Banten, "Analisis Termodinamika Siklus Pembangkit Listrik Tenaga Uap Kapasitas 1500 kW," *JURNAL TEKNIK MESIN-ITI*, vol. 5, no. 3, 2021.
- [5]. G. Sihombing, K. Lubis, and P. Panggabean, "Analisis Performansi Turbin Uap dengan Kapasitas 115 MW dan Putaran 3000 Rpm pada unit 1 PLTU Labuhan Angin Sibolga," *Elektriase: Jurnal Sains dan Teknologi Elektro*, vol. 14, no. 02, pp. 193–202, Oct. 2024, doi: 10.47709/elektriase.v14i02.4803.
- [6]. P. Basu, *Circulating Fluidized Bed Boilers: Design, Operation and Maintenance*, 2nd ed. Cham, Switzerland: Springer, 2015.
- [7]. B. R. Stanmore and P. Gilot, "Review: The calcination and sulfation of limestone in fly ash," *Fuel Processing Technology*, vol. 86, no. 16, pp. 1707–1743, Nov. 2005, doi: 10.1016/j.fuproc.2005.01.023.