

ANALISIS CFD *CO-FIRING* BIOMASSA AMPAS TEBU PADA *STOKER BOILER*

*Yesaya Manalu¹, M.S.K Tony Suryo Utomo², Muchammad²

¹Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

²Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Sudharto, SH., Tembalang-Semarang 50275, Telp. +62247460059

*E-mail: yesayamanalu2@gmail.com

Abstrak

Kebutuhan energi terus meningkat seiring berjalannya waktu dan bertambahnya populasi. Kebutuhan yang masif akan energi, khususnya energi fosil, berdampak signifikan terhadap lingkungan. Penggunaan energi terbarukan menjadi salah alternatif satu solusi yang cukup efisien untuk pengendalian pemanasan global karena dapat menekan emisi karbon dioksida (CO₂) dan polutan lainnya. Salah satu sumber energi terbarukan potensial yang cukup sering digunakan adalah biomassa. Biomassa dapat berupa limbah pertanian dan perkebunan, sampah organik, dan sebagainya. Penggunaan biomassa sebagai sumber energi terbarukan dilakukan melalui proses pembakaran *co-firing* biomassa dan batu bara pada *stoker boiler*. Beberapa hal yang perlu diteliti lebih lanjut mengenai pembakaran *co-firing* biomassa pada *stoker boiler* meliputi temperatur pembakaran dan emisi gas yang dihasilkan. Ampas tebu merupakan salah satu biomassa potensial dengan nilai heating value yang berkisar antara 3890,63 kkal/kg-4254,80 kkal/kg dan ketersediaan yang cukup melimpah. Penelitian ini bertujuan untuk menyelidiki pengaruh *co-firing* biomassa ampas tebu terhadap performa *stoker boiler* dan emisi gas yang dihasilkan. Penelitian ini dilakukan dengan simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Bahan bakar berupa ampas tebu dan batu bara divariasikan dengan persentase 0 dan 10%. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa sering dengan bertambahnya fraksi *co-firing*, temperatur pembakaran mengalami penurunan hingga 1,9%, emisi gas CO₂ meningkat sebesar 1,8%, dan kualitas emisi gas buang mengalami peningkatan yang ditandai dengan penurunan fraksi massa SO₂ dan CO secara berturut-turut sebesar 0,2% dan 4,9%.

Kata kunci: ampas tebu; *co-firing*; *computational fluid dynamics*; emisi; *stoker boiler*; temperatur

Abstract

Energy needs continue to increase over time and population growth. The massive need for energy, especially fossil fuels, has a significant impact on the environment. The use of renewable energy is an alternative solution that is quite efficient for controlling global warming because it can reduce carbon dioxide (CO₂) emissions and other pollutants. One potential renewable energy source that is quite often used is biomass. Biomass can be in the form of agricultural and plantation waste, organic waste, and so on. The use of biomass as a renewable energy source is carried out through the process of co-firing biomass and coal combustion in the boiler stoker. Several things that need to be further studied regarding the co-firing of biomass in the boiler stoker include the combustion temperature and the resulting gas emissions. Bagasse is one of the potential biomass with a heating value ranging from 3890.63 kcal/kg-4254.80 kcal/kg and is quite abundant. This study aims to investigate the effect of bagasse biomass co-firing on the performance of the boiler stoker and the resulting gas emissions. This study was conducted using Computational Fluid Dynamics (CFD) simulation. The fuels in the form of bagasse and coal were varied with percentages of 0 and 10%. The results obtained showed that often with the increase in the co-firing fraction, the combustion temperature decreased by 1.9%, CO₂ gas emissions increased by 1.8%, and the quality of exhaust gas emissions increased as indicated by a decrease in the mass fraction of SO₂ and CO by 0.2% and 4.9% respectively.

Keywords: *bagasse; boiler stoker; co-firing; computational fluid dynamics; emissions; temperature*

1. Pendahuluan

Peningkatan kebutuhan energi seiring bertambahnya populasi dunia telah membawa dampak signifikan terhadap lingkungan, khususnya melalui penggunaan energi fosil yang intensif. Peningkatan dalam penggunaan energi fosil akan memperburuk dampak dari pemanasan global [1]. Untuk mengatasi tantangan ini, energi terbarukan dipandang sebagai solusi yang efisien dan berkelanjutan. Salah satu sumber energi terbarukan yang memiliki potensi besar adalah biomassa, yang dapat dimanfaatkan dari limbah pertanian, perkebunan, serta sampah organik. Penggunaan biomassa sebagai bahan

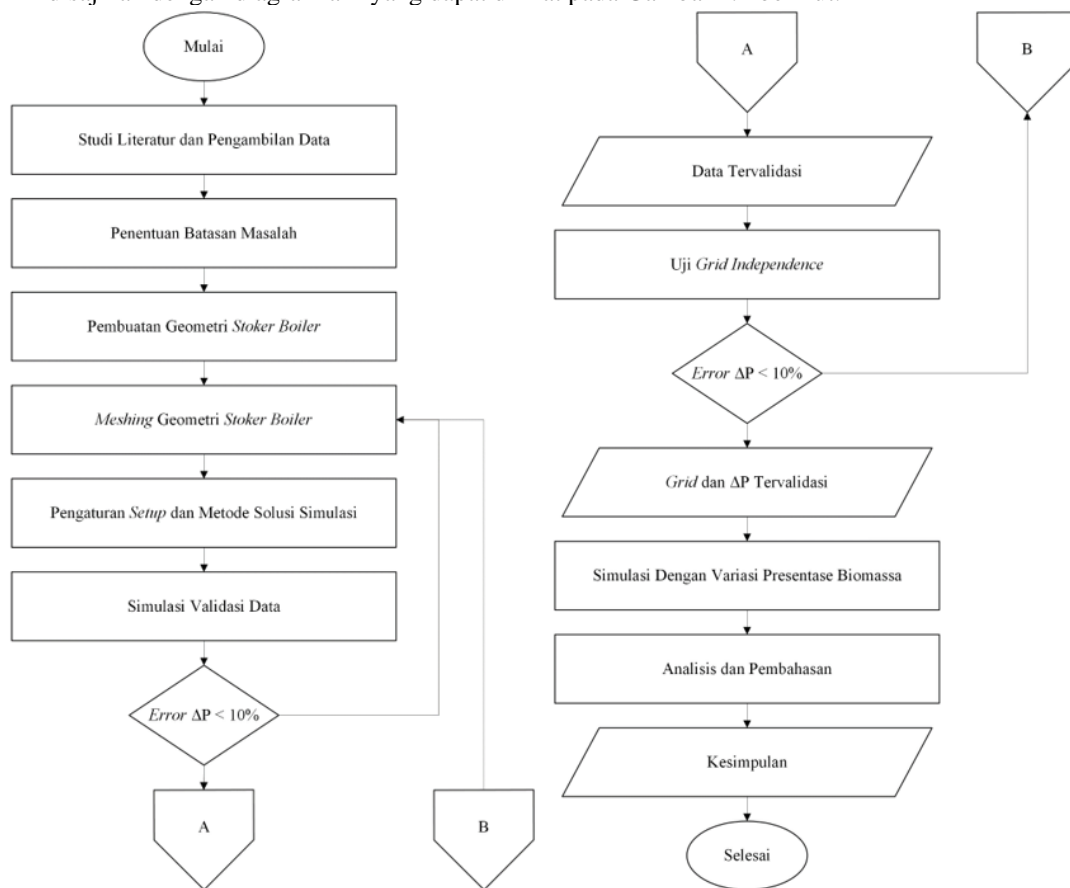
bakar alternatif tidak hanya mengurangi ketergantungan pada energi fosil, tetapi juga berkontribusi pada pengurangan emisi karbon [2, 6].

Indonesia, sebagai negara agraris, menghasilkan biomassa yang melimpah, salah satunya adalah ampas tebu. Ampas tebu, yang merupakan limbah dari proses pengolahan tebu menjadi gula, memiliki rentang nilai kalor 3890,63–4254,80 kkal/kg dan potensi produksi tahunan sekitar 945,7 ribu ton [4]. Dengan potensi energi setara 488 MW, ampas tebu menjadi biomassa yang ideal untuk diterapkan dalam teknologi *co-firing* bersama batu bara pada boiler jenis *stoker*. Proses *co-firing* ini dinilai sebagai langkah ekonomis yang dapat dilakukan pada infrastruktur pembangkit listrik yang sudah ada [10, 20].

Dalam mendukung transisi energi, regulasi di Indonesia mendorong pengurangan emisi gas rumah kaca. Peraturan Presiden Nomor 112 Tahun 2022 mengharuskan pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) mengurangi emisi gas rumah kaca hingga 35% dalam waktu 10 tahun sejak beroperasi dibandingkan dengan rata-rata emisi tahun 2021 [5]. Salah satu strategi utama untuk memenuhi regulasi ini adalah pengembangan energi terbarukan seperti biomassa [7]. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh *co-firing* biomassa ampas tebu terhadap performa boiler dan emisi gas yang dihasilkan. Simulasi menggunakan metode *Computational Fluid Dynamics* (CFD) dilakukan untuk menganalisis temperatur pembakaran dan emisi gas, yang diharapkan dapat mendukung optimalisasi pemanfaatan biomassa dalam mendukung kebijakan energi terbarukan di Indonesia.

2. Bahan dan Metode Penelitian

Penelitian ini dari awal hingga akhir dilakukan mengikuti serangkaian proses. Proses-proses yang dilakukan dalam penelitian ini disajikan dengan diagram alir yang dapat dilihat pada Gambar 1.1 berikut.



Gambar 1.1 Diagram Alir Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan metode dinamika fluida komputasional (*Computational Fluid Dynamics*). Penelitian diawali dengan studi literatur untuk mengumpulkan semua informasi dan data yang dibutuhkan untuk penelitian. Kemudian dilakukan proses simulasi yang mencakup pembuatan geometri, meshing geometri dan input data, pemodelan simulasi, proses komputasi, dan diakhiri dengan pengambilan data serta analisis hasil simulasi.

2.1 Kandungan Batu Bara dan Ampas Tebu

Dalam bahan bakar (ampas tebu dan batu bara) terdapat dua komponen yaitu kandungan ultimate dan proximate. Kandungan ultimate menunjukkan kandungan komponen di dalam bahan bakar yang berupa karbon, hidrogen, oksigen, nitrogen, sulfur. Sementara kandungan proximate pada bahan bakar menunjukkan kadar karbon tetap (*fixed carbon*), air

(moisture), abu (ash), dan bahan mudah menguap (volatile). Nilai kalor pada bahan bakar dipengaruhi oleh kandungan karbon. Bahan bakar dengan nilai kalori yang tinggi memiliki kandungan karbon yang tinggi juga [9]. Kandungan ultimate dan proximate bahan bakar yang dipakai dalam penelitian ini dapat diamati pada Tabel 1.1 dan Tabel 1.2 berikut [3, 8].

Tabel 2.1 Kandungan *Ultimate* Batu bara dan Ampas Tebu

	Kandungan <i>Ultimate</i>				
	<i>Carbon (C)</i>	<i>Hydrogen (H)</i>	<i>Oxygen (O)</i>	<i>Nitrogen (N)</i>	<i>Sulfur (S)</i>
Batu Bara	66,24%	4,43%	20,48%	1,37%	0,60%
Ampas Tebu	47,0%	6,5%	44,0%	0,9%	0,1%

Tabel 2.2 Kandungan *Proximate* Batu bara dan Ampas Tebu

	Kandungan <i>Proximate</i>				
	<i>Volatile</i>	<i>Fixed Carbon</i>	<i>Moisture</i>	<i>Ash</i>	<i>High Calorific Value</i>
Batu Bara	39,70%	33,08%	23,14%	6,88%	6908 kcal/kg
Ampas Tebu	72,7%	3,5%	21,8%	2,5%	3716,54 kcal/kg

2.2 Pemodelan Simulasi

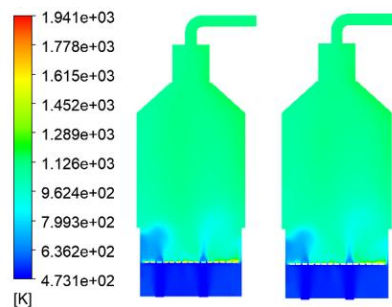
Pada penelitian ini, pemodelan simulasi dilakukan dengan mengacu pada pembakaran *co-firing* keadaan nyata menggunakan stoker boiler. Geometri model mengacu pada geometri *boiler* yang digunakan dalam eksperimen dengan dimensi kasar 1 m x 1 m x 2,5 m. Penelitian ini bertujuan untuk menyelidiki pengaruh pembakaran *co-firing* ampas tebu terhadap performa dan emisi gas *stoker boiler*. Model akan dilakukan *meshing* sebelum dilakukan *setting* pada simulasi. Total sel setelah *meshing* berjumlah 2116960 sel. Simulasi dalam penelitian ini dilakukan dalam kondisi tunak atau *steady*. Pada pengaturan simulasi model Energy dinyalakan karena pada proses *co-firing* terjadi perpindahan panas antar partikel fluida dan dengan dinding-dinding *boiler*. Pembakaran dalam simulasi ini melibatkan fluida yang terdiri dari berbagai campuran seperti senyawa yang mudah terbakar dan hasil pembakaran. Hal ini sesuai dengan model spesies yaitu *Species Transport-Eddy Dissipation*. Model turbulen yang dipilih adalah *K-Epsilon-Realizable*, dimana model ini merupakan jenis yang lebih akurat. Pada simulasi ini, bahan bakar dimodelkan sebagai *discrete phase* yang nantinya akan diinjeksikan dari bagian atas bed [11]. Pemodelan seperti ini akan menyederhanakan proses pembakaran *co-firing* pada penelitian ini.

3. Hasil dan Pembahasan

Performa dan emisi yang didapatkan dari hasil pembakaran *co-firing* biomassa ampas tebu menunjukkan adanya perbedaan pada variasi persentase *co-firing*. Pada penelitian ini, temperatur pembakaran rata-rata menjadi indikator performa *boiler*. Sementara emisi gas hasil pembakaran berupa gas seperti CO₂, O₂, CO, dan SO₂ menjadi indikator kualitas emisi pembakaran *co-firing*.

3.1 Temperatur Pembakaran

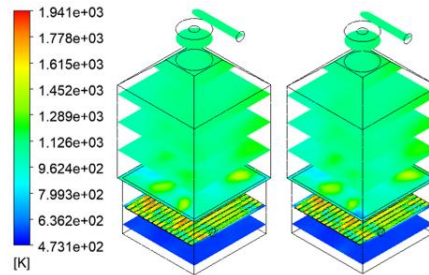
Pada penelitian ini, temperatur pembakaran menjadi salah satu parameter yang menunjukkan performa *boiler*. Performa *boiler* yang semakin baik ditunjukkan dengan temperatur yang semakin tinggi. Interaksi antara udara dengan bahan bakar akan menyebabkan terjadinya pembakaran di dalam *boiler*. Nilai kalor yang berbeda antara ampas tebu dan batu bara menyebabkan variasi temperatur pembakaran. Kandungan yang berbeda pada bahan bakar batu bara dan ampas tebu juga menyebabkan temperatur pembakaran yang bervariasi dengan persentase *co-firing* 0 dan 10% [3, 8]. Kontur distribusi temperatur pembakaran pada bidang XY dan bidang XZ secara berturut-turut dapat diamati pada Gambar 3.1 Dan Gambar 3.2 berikut.



Gambar 3.1 Kontur Temperatur *Boiler* Bidang XY *Co-firing* 0% dan 10%

Secara visual cukup sulit untuk mengamati perbedaan distribusi temperatur pada kedua variasi. Namun hasil pada Tabel 3.1 menunjukkan bahwa temperatur pembakaran *co-firing* mengalami penurunan dengan bertambahnya fraksi massa. Nilai kalori ampas tebu yang lebih rendah dibanding batu bara menghasilkan suhu pembakaran yang semakin

rendah. Pada penelitian lain, ditemukan juga bahwa temperatur pengapian (ignition temperature), temperatur maksimum, dan temperatur rata-rata pada *co-firing* ampas tebu mengalami penurunan seiring dengan bertambahnya fraksi ampas tebu [12, 13, 18].



Gambar 3.2 Kontur Temperatur *Boiler* Bidang XZ *Co-firing* 0% dan 10%

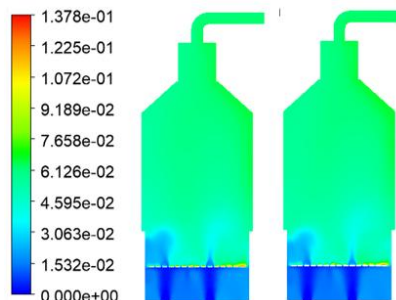
Temperatur pembakaran dengan variasi *co-firing* 0 dan 10% dapat dilihat pada Tabel 3 berikut. Dari tabel dapat diamati secara langsung bahwa temperatur pembakaran semakin menurun seiring bertambahnya fraksi *co-firing* (persentase biomassa). Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa *co-firing* dengan variasi 0 dan 10% menyebabkan penurunan temperatur pembakaran hingga 1,9%. Data temperatur pembakaran dapat diamati pada Tabel 3.1 berikut.

Tabel 3.1 Data Temperatur *Boiler Co-firing* 0 dan 10%

No.	Persentase Biomassa (%)	Temperatur (°C)
1	0	728,67
2	10	714,23

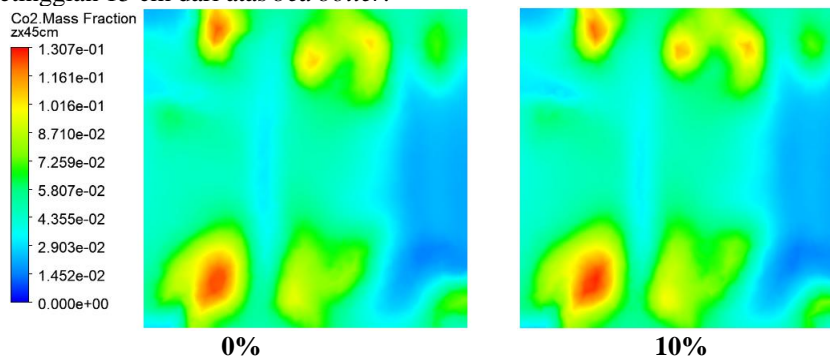
3.2 Emisi Gas CO₂

Gas karbon dioksida (CO₂) merupakan salah satu gas hasil reaksi pembakaran sempurna antara kandungan karbon (C) dalam bahan bakar dengan oksigen (O₂). Kontur fraksi massa CO₂ pada bidang XY dapat diamati pada Gambar 3.3 dan berikut.



Gambar 3.3 Kontur Fraksi Massa CO₂ Bidang XY *Co-firing* 0 dan 10%

Karbon dioksida terbentuk dalam zat yang mudah menguap dan merupakan salah satu gas yang sulit terbakar. Bahan bakar dengan kandungan oksigen lebih tinggi dan karbon lebih rendah akan menghasilkan lebih banyak karbon dioksida. Dari analisis kandungan bahan bakar dapat diamati bahwa ampas tebu memiliki komposisi oksigen yang lebih banyak dan karbon yang lebih sedikit [8]. Hal ini menjadi salah satu penyebab semakin bertambahnya fraksi massa CO₂ seiring dengan meningkatnya persentase biomassa. Gambar 3.4 berikut merupakan kontur fraksi massa CO₂ pada bidang XZ yang diambil pada ketinggian 15 cm dari atas *bed boiler*.



Gambar 3.4 Kontur Fraksi Massa CO₂ Bidang XZ *Co-firing* 0 dan 10%

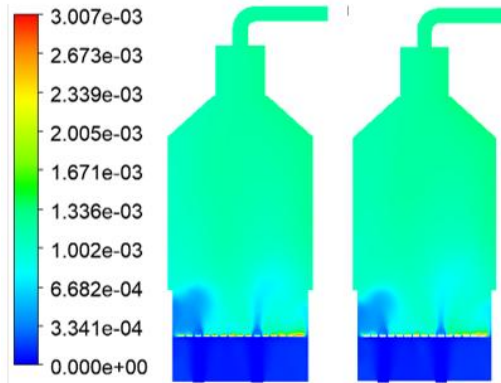
Data hasil simulasi berupa fraksi massa CO₂ dapat diamati pada Tabel. Dari Tabel berikut di atas dapat diamati secara langsung bahwa fraksi massa CO₂ meningkat seiring dengan bertambahnya fraksi *co-firing*. Hal ini terjadi karena kandungan oksigen pada ampas tebu lebih tinggi dibanding batu bara. Kandungan oksigen yang lebih tinggi akan meningkatkan proses oksidasi, dimana hal ini juga akan meningkatkan emis gas CO₂ yang lebih banyak [3,8]. Meskipun demikian, peningkatan emisi gas CO₂ ini dianggap tidak berdampak pada lingkungan, karena ampas tebu yang dikenal sebagai biomassa netral karbon pada semasa hidupnya telah menyerap banyak karbon [14]. Dari penelitian ini diperoleh bahwa emisi gas CO₂ mengalami peningkatan sebesar 1,8% sebagaimana tertera pada Tabel 3.2 berikut.

Tabel 3.2 Data Fraksi Massa CO₂ *Co-firing* 0 dan 10%

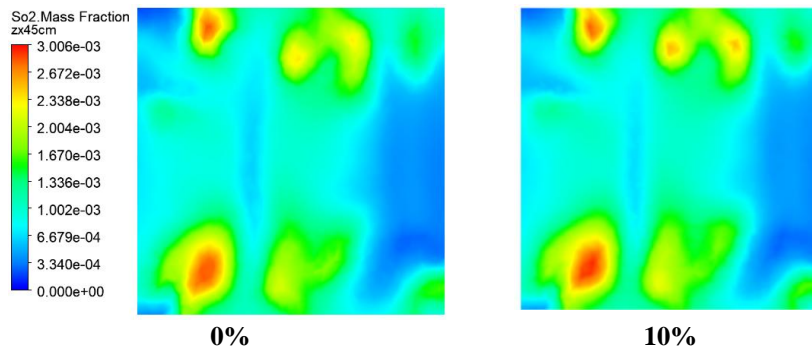
No.	Persentase Biomassa (%)	Fraksi Massa CO ₂
1	0	5,97E-02
2	10	6,08E-02

3.3 Emisi Gas SO₂

Reaksi antara sulfur (S) dan oksigen pada bahan bakar akan membentuk gas sulfur dioksida (SO₂). Gas SO₂ merupakan salah satu gas yang berbahaya bagi makhluk hidup. Gas bersifat racun sehingga berbahaya apabila terhirup. Selain itu, gas SO₂ juga berperan dalam terbentuknya hujan asam (acid rain) yang dapat merusak tumbuhan dan ekosistem [15]. Kontur fraksi massa SO₂ pada bidang XY dan pada bidang XZ (ketinggian 15cm di atas *bed boiler*) secara berturut-turut dapat diamati pada Gambar 3.5 berikut.



Gambar 3.5 Kontur Fraksi Massa SO₂ Bidang XY *Co-firing* 0 dan 10%



Gambar 3.6 Kontur Fraksi Massa SO₂ Bidang XZ *Co-firing* 0 dan 10%

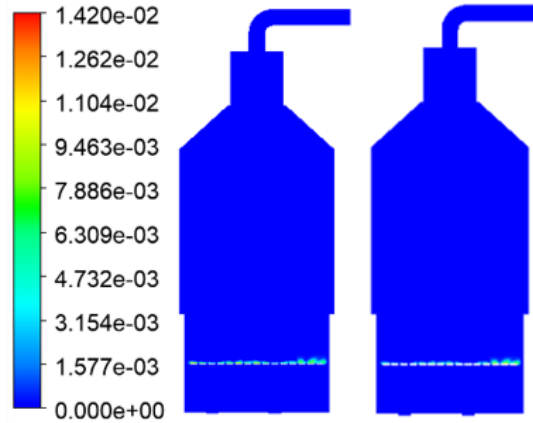
Data hasil penelitian berupa fraksi massa SO₂ dapat dilihat pada Tabel berikut. Dapat diamati langsung bahwa fraksi massa SO₂ cenderung menurun seiring bertambahnya persentase *co-firing*. Kandungan sulfur yang berbeda pada ampas tebu dan batu bara menyebabkan fraksi massa SO₂ yang terbentuk bervariasi [3,8]. Dari analisis ultimate diketahui bahwa kandungan sulfur pada batu bara lebih besar dibanding ampas tebu. Hal ini membuat gas SO₂ yang terbentuk semakin berkurang seiring dengan bertambahnya persentase biomassa ampas tebu pada *co-firing* [16]. Dengan demikian dapat diamati langsung bahwa pembakaran *co-firing* ampas tebu meningkatkan kualitas emisi yang ditandai dengan penurunan emisi SO₂. Pada penelitian ini, diperoleh bahwa emisi SO₂ mengalami penurunan hingga 0,2%. Data fraksi massa SO₂ hasil pembakaran dapat diamati pada Tabel 3.3 berikut.

Tabel 3.3 Data Fraksi Massa SO₂ *Co-firing* 0 dan 10%

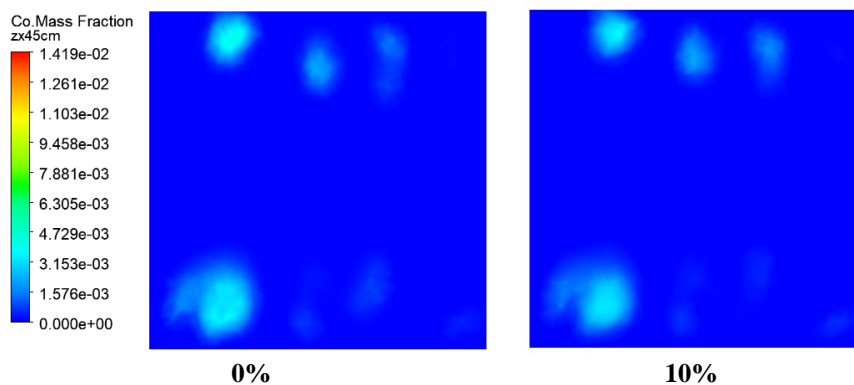
No.	Persentase Biomassa (%)	Fraksi Massa SO ₂
1	0	1,272E-03
2	10	1,270E-03

3.4 Emisi Gas CO

Karbon monoksida (CO) merupakan salah satu gas yang dihasilkan dari rekasi pembakaran *co-firing*. Gas ini terbentuk dari reaksi tidak sempurna antara unsur karbon pada bahan bakar dengan oksigen. Karbon dioksida akan terbentuk dalam senyawa yang mudah menguap pada primary pyrolysis. Karbon monoksida memiliki sifat yang mudah terbakar. Keberadaan gas di udara berbahaya bagi makhluk hidup dan lingkungan. Gas CO merupakan gas yang reaktif dan beracun sehingga berbahaya bagi pernapasan [17]. Kontur fraksi massa CO pada bidang XY dan pada bidang XZ (ketinggian 15cm di atas *bed boiler*) secara berturut-turut dapat diamati pada Gambar 3.5 berikut.



Gambar 3.7 Kontur Fraksi Massa CO Bidang XY *Co-firing* 0 dan 10%



Gambar 3.8 Kontur Fraksi Massa CO Bidang XZ *Co-firing* 0 dan 10%

Jumlah gas CO yang terbentuk dari hasil pembakaran bergantung pada kandungan karbon dan oksigen pada bahan bakar. Dari analisis ultimate diperoleh bahwa kandungan karbon pada batu bara lebih tinggi dibanding ampas tebu [3,8]. Sementara kandungan oksigen pada batu bara lebih rendah dibanding ampas tebu. Ketika reaksi pembakaran terjadi, gas CO yang terbentuk akan semakin menurun seiring dengan bertambahnya persentase ampas tebu [16]. Hal ini disebabkan karena gas CO akan lebih banyak terbentuk ketika bahan bakar mengandung lebih banyak karbon (C) dibanding oksigen (O).

Dapat diamati langsung pada tabel bahwa fraksi massa CO cenderung menurun seiring bertambahnya persentase ampas tebu pada *co-firing*. Dengan demikian pembakaran *co-firing* ampas tebu akan meningkatkan kualitas emisi gas yang ditandai dengan penurunan fraksi massa CO. Hasil penelitian menunjukkan penurunan CO sebesar 4,9%. Data fraksi massa CO hasil pembakaran dapat diamati pada Tabel 3.4 berikut.

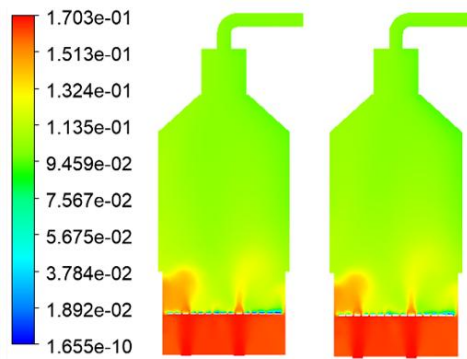
Tabel 3.4 Data Fraksi Massa CO *Co-firing* 0 dan 10%

No.	Persentase Biomassa (%)	Fraksi Massa CO
1	0	1,44E-03
2	10	1,37E-03

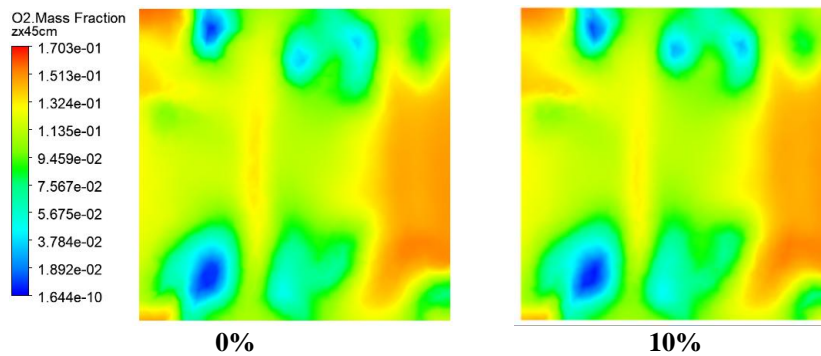
3.5 Emisi Gas O2

Gas oksigen (O₂) pada *boiler* berasal dari udara primer dan sekunder. Gas oksigen berperan sebagai oksidator yang akan menyebabkan reaksi pembakaran dengan bahan bakar. Jumlah emisi gas O₂ hasil pembakaran menjadi salah satu indikator kualitas emisi. Gas O₂ yang semakin banyak menunjukkan kualitas emisi yang semakin baik [18]. Kontur fraksi

massa O₂ pada bidang XY dan bidang XZ (ketinggian 15cm di atas *bed boiler*) dapat dilihat pada Gambar dan Gambar berikut.



Gambar 3.9 Kontur Fraksi Massa O₂ Bidang XY *Co-firing* 0 dan 10%



Gambar 3.10 Kontur Fraksi Massa O₂ Bidang XZ *Co-firing* 0 dan 10%

Secara visual, dapat diamati secara langsung bahwa fraksi massa O₂ cenderung meningkat seiring dengan bertambahnya persentase ampas tebu pada *co-firing*. Hal ini dapat diamati juga pada Tabel 3.5. Kandungan oksigen yang lebih tinggi pada ampas tebu dibanding batu bara merupakan salah satu penyebab meningkatnya jumlah fraksi massa O₂ pada *boiler* [3, 8]. Semakin bertambahnya persentase ampas tebu akan menyebabkan fraksi massa SO₂ yang tersisa semakin banyak. Penyebab lainnya adalah karena proses pembakaran ampas tebu yang lebih banyak membentuk CO₂ dibanding CO yang kemudian akan menguap sebagai volatile matter. Karena sifat gas CO₂ yang sulit terbakar, maka gas O₂ akan sulit bereaksi dengan CO₂ sehingga oksigen akan tersisa lebih banyak [19]. Hasil penelitian menunjukkan peningkatan emisi O₂ sebesar 1,2%. Data fraksi massa O₂ dapat diamati pada Tabel 3.5 berikut.

Tabel 3.5 Data Fraksi Massa O₂ *Co-firing* 0 dan 10%

No.	Persentase Biomassa (%)	Fraksi Massa O ₂
1	0	9,58E-02
2	10	9,74E-02

4. Kesimpulan

Berikut adalah beberapa kesimpulan yang diperoleh dari penelitian pembakaran *co-firing* biomassa ampas tebu pada *boiler stoker*:

1. Temperatur pembakaran *co-firing* mengalami penurunan seiring dengan bertambahnya persentase ampas tebu. Salah satu penyebab utamanya adalah nilai kalor ampas tebu yang lebih rendah dibanding dengan batu bara. Hal ini menunjukkan penurunan performa *boiler* seiring dengan meningkatnya fraksi *co-firing*.
2. Semakin bertambahnya persentase ampas tebu pada *co-firing* meningkatkan kualitas emisi. Hal ini ditandai dengan semakin menurunnya emisi gas CO dan SO₂ seiring dengan bertambahnya fraksi *co-firing*.
3. Perbedaan kandungan batu bara dan ampas tebu yang ditunjukkan oleh analisis *ultimate* dan *proximate* dapat mempengaruhi kinerja *boiler* dan kualitas emisi hasil pembakaran *co-firing*.

5. Daftar Pustaka

- [1] Aji, S. M. B., Adiawan, I., Kawahyuning, D. I. (2024). Dampak Pemanfaatan Energi, Perkembangan Ekonomi, dan Wilayah Hutan Terhadap Emisi Gas Rumah Kaca di AS, Rusia, Cina, dan Brasil. *Jurnal Ekonomi Manajemen dan Sosial* 7(1), hal. 11.

- [2] Sulasminingsih, S., Hafiz, F., Sari, K., Yuninda, S. (2023). Penggunaan Biomassa Sebagai Energi Alternatif Pembangkit Listrik di Wilayah Pedesaan. *Journal of Optimization System and Ergonomy Implementation* 1(1), hal. 42.
- [3] Tanggara, Deddy N.S.P., Kristiana, Wita. (2023). Karakteristik Batubara Daerah Katanjung dan Sekitarnya. *Jurnal Teknik Pertambangan* 23(2), hal. 15-16.
- [4] BPS-Statistics Indonesia. (2023). *Statistik Tebu Indonesia 2022* 13. Jakarta: BPS RI.
- [5] Pemerintah Pusat. (2022). Peraturan Presiden (Perpres) Nomor 112 Tahun 2022 tentang Percepatan Pengembangan Energi Terbarukan untuk Penyediaan Tenaga Listrik. Jakarta: Sekretariat Negara. LN. 2022/No.181. Tersedia di: jdih.setneg.go.id.
- [6] Ariyanto, A. D., Mustakim, L. (2023). Analisis Pengujian *Co-firing* Biomassa Pada PLTU Batubara Dengan Beberapa Bahan Bakar Alternatif Sebagai Upaya Bauran Energi Baru Terbarukan. *Martabe: Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat* 6(1), hal. 61-66.
- [7] Febriani, A. V., Hanum, F. F., Rahayu, A. (2024). Review: Analisis Potensi dan Tantangan Biomassa Sebagai Bahan Bakar pada PLTU dan PLTBm. *Prosiding Seminar Nasional Sains dan Teknologi 2024*.
- [8] Machado, G., Santos, F., Faria, D., Queiroz, T. N. d., Zinani, F., Queiroz, J. H. d., Gomes, F. (2018). Characterization and Potential Evaluation of Residues from the Sugarcane Industry of Rio Grande do Soul in Biorefinery Processes. *Natural Resources* 16(1).
- [9] Anshariah, Imran, A.M., Widod, S., Irvan, U. R. (2020). Correlation of fixed carbon content and calorific value of South Sulawesi Coal, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Enviromental Science* 473. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/473/1/012106>
- [10] Belosevic, S. (2010). Modeling Approaches to Predict Biomass *Co-firing* with Pulverized Coal. *The Open Thermodynamics Journal* 4, hal. 50-70.
- [11] Zhang, X., Ghamari, M., Ratner, A. (2013). Numerical Modeling of *Co-firing* a Light Density Biomass, Oat (*Avena Sativa*) Hulls, and Chunk Coal in Fluidized Bed *Boiler*. *Biomass and Bioenergy* 56, hal. 239-246.
- [12] Mortari, D. A., Torquato, L. D. M., Crespi, M. S., Crnkovic, P. M. (2018). *Co-firing* of Blends of Sugarcane Bagasse and Coal. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*.
- [13] Destalia, R., Aryanny, E. (2024). Analisa Karakteristik Pengujian *Co-firing* Biomassa Bagasse Tebu di PLTU Rembang Kapasitas 2x315 MW. *INSOLOGI: Jurnal Sains dan Teknologi* 3(1).
- [14] Winaya, I. N. S., Susila, I. B. A. D. (2010). *Co-firing* Sistem Fluidized Bed Berbahan Bakar Batubara dan Ampas Tebu. *Jurnal Energi dan Manufaktur* 4(2).
- [15] Gumirat, M. I. I., Satriawan, D., Wahyunigtyas, D. (2021). Dampak Hujan Asam Pada Lingkungan. *Jurnal Pengendalian Pencemaran Lingkungan (JPPL)* 3(2).
- [16] Liu, L., Memon, M., Z., Xie, Y., Gao, S., Guo, Y., Dong, J., Gao, Y., Li, A., Ji, G. (2023). Recent Advances of Research in Coal and Biomass *Co-firing* for Electricity and Heat Generation. *Circular Economy* 2(4).
- [17] Kent, R., Olson, M.D. (1984). Carbon Monoxide Poisoning: Mechanisms, Presentation, and Controversies in Management. *The Journal of Emergency Medicine* 1(3).
- [18] Fan, H., Feng, J., Hu, W., Li, W., Gao, J. (2021). Effect of Excess Air Coefficient on the Combustion Characteristics of a Multi-stage Dual Swirl Burner. *Journal of Physics: Conference Series* 2009.
- [19] Nolan, D. P. (2011). *Handbook of Fire and Explosion Protection Engineering Principles*, hal 211-242. Norwich: William Andrew Publishing.
- [20] Narayan, K. V., Natarajan, E. (2006). Experimental Studies on Cofiring of Coal and Biomass Blends in India. *Renewable Energy* 32(2007), hal. 2548-2558.