

ANALISIS CFD *CO-FIRING* BIOMASSA BATOK KELAPA PADA STOKER *BOILER*

Rangga Hatta Suarga¹, 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: ranggahatta@gmail.com

Abstrak

Menurut Lembaga Energi Baru Terbarukan Dan Konservasi Energi (EBTK), Indonesia memiliki target bauran EBT sesuai Rencana Umum Energi Nasional (RUEN) sebesar 23% di tahun 2025 dan 31% di tahun 2050. Hal itu menjadikan Masyarakat Indonesia harus memanfaatkan sumber energi terbarukan. Kementerian ESDM telah melaporkan bahwa Indonesia memiliki potensi biomassa sebesar 443 ribu megawatt (MW), sehingga pemerintah Indonesia menetapkan program pelaksanaan program *co-firing* biomassa di 52 lokasi Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Batubara milik PT PLN (Persero) dengan total kapasitas 18.154 MW. Maka dari itu pada penelitian ini dilakukan simulasi pembakaran *co-firing* pada *boiler* stoker dengan tujuan melihat performa hasil pembakaran antara batu bara dan biomassa batok kelapa dengan fraksi 0-20% dengan menggunakan metode elemen hingga Computational Fluid Dynamics (CFD). Parameter penelitian ini adalah temperatur *boiler* dan emisi gas buang *boiler*. Hasil yang didapat bahwa terjadi penurunan temperatur seiring peningkatan biomassa 0-20%. Hal serupa terjadi pada kandungan CO dan SO₂ yang terjadi penurunan seiring peningkatan biomassa 0-20%. Namun, pada kandungan CO₂ dan O₂ terjadi peningkatan seiring peningkatan biomassa 0-20%. Penurunan CO dan SO₂ mengindikasikan penurunan emisi gas berbahaya bagi lingkungan.

Kata Kunci : batok kelapa; *co-firing*; emisi gas; *stoker boiler*; temperatur

Abstract

According to the New and Renewable Energy and Energy Conservation Agency (EBTK), Indonesia has set a target for the renewable energy mix in accordance with the National Energy General Plan (RUEN) of 23% by 2025 and 31% by 2050. This requires the Indonesian society to utilize renewable energy sources. The Ministry of Energy and Mineral Resources (ESDM) has reported that Indonesia has a biomass potential of 443,000 megawatts (MW). As a result, the Indonesian government has established a program for implementing *co-firing* of biomass in 52 locations of Coal-Fired Power Plants (PLTU) owned by PT PLN (Persero) with a total capacity of 18,154 MW. Therefore, this research aims to simulate *co-firing* combustion in a stoker boiler to observe the combustion performance between coal and coconut shell biomass with a fraction of 0-20% using the finite element Computational Fluid Dynamics (CFD) method. The parameters of this research are boiler temperature and boiler flue gas emissions. The results indicate that the temperature decreases as biomass increases from 0 to 20%. Similar trends are observed in the levels of CO and SO₂ emissions, which decrease with increasing biomass from 0 to 20%. However, the levels of CO₂ and O₂ increase as biomass increases from 0 to 20%. The reduction in CO and SO₂ emissions indicates a decrease in harmful emissions for the environment.

Keywords : *co-firing*; coconut shell; gas emissions; *stoker boiler*; temperature

1. Pendahuluan

Batu bara akan terus memainkan peran penting dalam sistem energi global selama beberapa dekade ke depan. Isu lingkungan telah menjadi perhatian utama bagi banyak lembaga perlindungan lingkungan, otoritas kesehatan, dan pemerintah, terutama terkait dengan tata guna lahan, polusi udara, pengelolaan limbah, dan pengelolaan air. Manajemen debu batu bara yang mengandung logam berat, emisi gas seperti karbon dioksida (CO₂), sulfur dioksida (SO₂), dan nitrogen oksida (NO_x), serta zat seperti metana dan ozon, serta dampak radiasi, semuanya merupakan fokus utama dari badan pelestarian lingkungan dan pemerintah. Isu-isu ini telah mendorong banyak negara untuk membuat kebijakan baru dalam penggunaan batu bara [1]. Pemerintah Indonesia mengeluarkan Peraturan Presiden nomo 5 tahun 2006 dan Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) yang isinya mengenai kebijakan pemanfaatan energi terbarukan untuk pembangunan yang berkelanjutan dan untuk penyedia pembangkit listrik. Dengan demikian, Indonesia menetapkan target bauran EBT sesuai Rencana Umum Energi Nasional (RUEN) sebesar 23% di tahun 2025 dan 31% di tahun 2050 [2]. Kementerian ESDM telah melaporkan bahwa Indonesia memiliki potensi biomassa sebesar 443 ribu megawatt (MW), namun pemanfaatan energi ini saat ini hanya mencapai 1,9 persen, terutama dalam pembangkit listrik. Masyarakat Energi Biomassa Indonesia (MEBI) juga mengungkapkan bahwa sumber daya pembangkit dari energi

biomassa mencapai 32,6 Giga Watt. Tetapi, dalam Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) 2021-2030, Pembangkit Listrik Tenaga Biomassa (PLTBM) baru mencapai 5,5 GW. Total luas Hutan Tanaman Energi mencapai 10,8 juta hektare. Hasil energi biomassa bisa berasal dari kelapa sawit, karet, singkong, kayu, kotoran sapi, sekam, jagung, tebu, dan sejenisnya. Dengan potensi yang dimiliki, pemerintah Indonesia menetapkan program pelaksanaan program *co-firing* biomassa di 52 lokasi Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Batubara milik PT PLN (Persero) dengan total kapasitas 18.154 MW [3].

Menggabungkan bahan bakar batu bara dengan biomassa atau *co-firing* merupakan cara yang efisien dalam keberlanjutan pembangkit listrik di Indonesia. *Co-firing* adalah metode yang menggunakan rasio spesifik batubara terhadap bahan bakar biomassa. Pemanfaatan biomassa, terutama dari limbah pertanian, merupakan pilihan lain karena dapat menjadi solusi lingkungan, terutama mengingat banyaknya bahan. Serbuk gergaji, kulit kayu, serpihan kayu, limbah kayu perkotaan, jerami padi, sekam padi, dan tanaman herba merupakan contoh biomassa yang dapat digunakan dalam pembakaran [4].

Dengan demikian, dilakukan penelitian simulasi dengan memodelkan pembakaran *co-firing* pada boiler stoker. Variasi yang digunakan adalah bahan bakar batu bara dan biomassa (batok kelapa) menggunakan software CFD. Penelitian ini dilakukan dengan maksud menginvestigasi distribusi panas dan gas emisi yang dihasilkan pembakaran pada boiler stoker dengan variasi biomassa 0-20%. Investigasi hasil pembakaran biomassa dengan batu bara dengan variasi yang berbeda akan menjadikan pertimbangan dalam menentukan komposisi yang tepat yang akan digunakan.

2. Bahan dan Metode Penelitian

Metode penelitian *Computational Fluid Dynamics* diawali dengan pengambilan data kandungan cangkang sawit dan batubara. Proses simulasi meliputi pembuatan geometri, meshing geometri, input data, pemodelan simulasi, dan tahap akhir adalah tahap pengambilan data hasil simulasi.

2.1 Kandungan Batu Bara dan Batok Kelapa

Kandungan dalam batubara dan batok kelapa terdiri dari dua aspek, yaitu kandungan *ultimate* dan kandungan *proximate*. Kandungan *proximate* merujuk pada komponen yang ada dalam bahan bakar berdasarkan bentuk fisiknya, dan pengujian *proximate* mencakup penentuan kadar air (moisture), kadar abu (ash), dan bahan mudah menguap (volatile matter) [5]. Di sisi lain, kandungan *ultimate* mengacu pada unsur kimia yang terkandung dalam bahan bakar, dan analisis *ultimate* melibatkan penentuan kandungan karbon, hidrogen, oksigen, nitrogen, sulfur total, serta nilai kalor [6]. Informasi mengenai kandungan *ultimate* dan *proximate* dalam cangkang sawit dan batubara pada penelitian dapat ditemukan dalam Tabel 1. Dan Tabel 2

Tabel 1 Kandungan Ultimate Batu bara dan Batok Kelapa

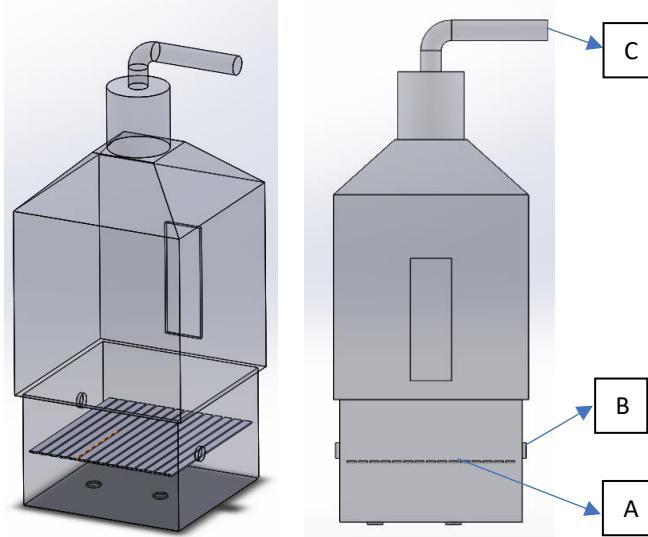
	Ultimate (%)				
	carbon	hydrogen	oxygen	nitrogen	sulfur
Batu bara	0,762416	0,09698	0,108837	0,017226	0,014541
Batok kelapa	0,641979	0,068866	0,275962	0,007696	0,005497

Tabel 2 Kandungan Proximate Batu bara dan Batok Kelapa

	Proximate (%)			
	volatile	fix carbon	moisture	ash
Batu bara	0,4794	0,3561	0,0585	0,106
Batok kelapa	0,755	0,112	0,101	0,032

2.2 Gemoteri Boiler Stoker

Pada penelitian ini, geometri yang digunakan untuk permodelan simulasi mengacu pada geometri boiler stoker yang digunakan dalam eksperimen. Dalam pembuatan model geometri menggunakan software Solidworks dan proses simulasi menggunakan *Computational Fluids Dynamics*. Model geometri ini memiliki ukuran kasar 0.9 m x 0.9 m x 2 m Adapun bentuk permodelan geometri yang digunakan untuk simulasi tertera pada Gambar 1.



Gambar 1. Model geometri boiler stoker (a) coal inlet, (b) air inlet, dan (c) outlet

2.3 Permodelan Simulasi

Sebelum melakukan pengaturan simulasi, geometri boiler akan dilakukan *meshing* yang bertujuan untuk membagi domain komputasi yang akan disimulasikan menjadi elemen-elemen kecil. Dalam setiap elemen ini, persamaan matematis yang menggambarkan fenomena yang sedang disimulasikan akan dipecahkan. Total jumlah sel pada *meshing* ini adalah 1787306. Pada gambar 2 dibawah ini memperlihatkan *meshing* untuk model geometri boiler stoker.



Gambar 2. Hasil *meshing* model boiler stoker

Penelitian ini menggunakan pemodelan simulasi yang merujuk pada fenomena nyata yang terjadi selama pembakaran partikel bahan bakar dalam tungku stoker boiler. Tujuan utama penelitian ini adalah untuk mengamati proses pembakaran (*co-firing*) biomassa batok kelapa dalam keadaan pembakaran yang sudah mencapai keseimbangan, di mana kondisi ini tidak bervariasi seiring berjalannya waktu. Dalam konteks ini, simulasi dilakukan dalam *steady state*. Dalam tungku stoker boiler, terjadi perpindahan panas antara partikel fluida dan dinding sekitarnya, oleh karena itu, simulasi ini memasukkan pemodelan energi dalam pengaturan simulasi.

Fluida dalam tungku stoker boiler adalah campuran berbagai senyawa, termasuk senyawa yang mudah terbakar dan hasil pembakaran. Oleh karena itu, simulasi ini menggunakan pemodelan species dengan jenis *Species Transport-Eddy Dissipation*. Dalam pemodelan ini, aliran turbulen diaktifkan dengan jenis *K-Epsilon-Realizable*, karena jenis pemodelan turbulen ini akurat karena menggunakan 2 persamaan. Untuk memodelkan pembakaran partikel di dalam

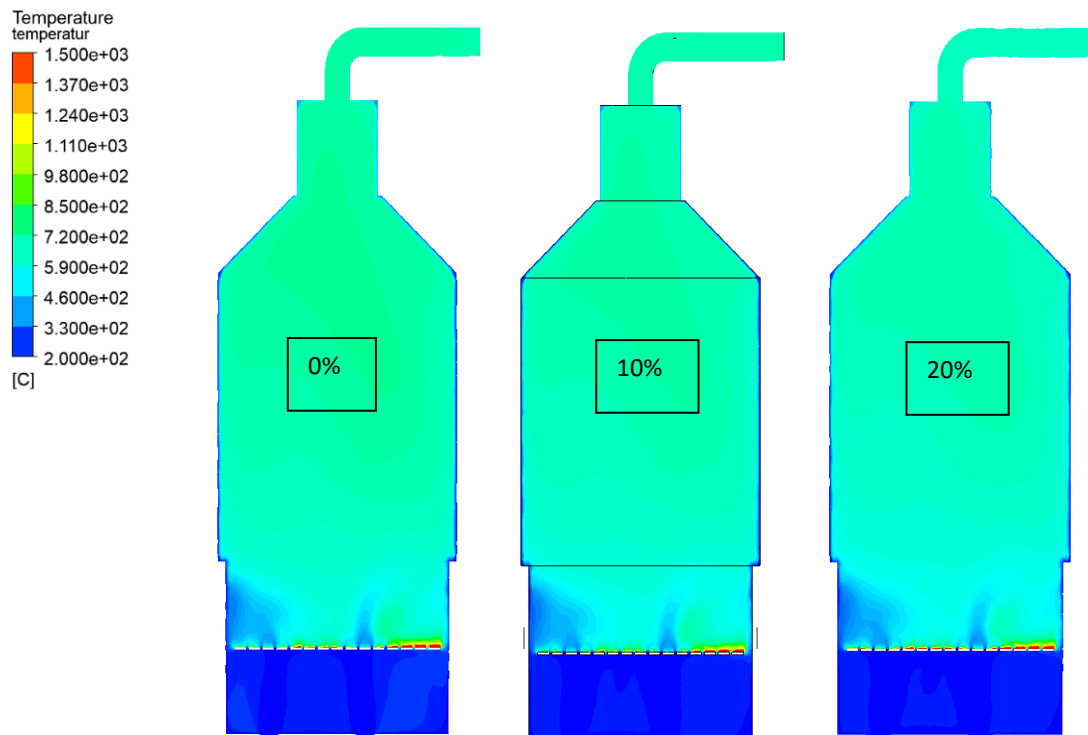
tungku stoker *boiler*, simulasi ini menggunakan pemodelan *Discrete Phase*. Partikel batok kelapa dan batubara dimasukkan ke dalam *bed* pembakaran dari sisi atas. Penting untuk mencatat bahwa injeksi partikel bahan bakar ke dalam tungku *boiler* harus dimodelkan dengan tepat di atas *bed* pembakaran. Dengan pendekatan ini, partikel batok kelapa dan batubara dapat diinjeksikan langsung ke bagian atas *bed* untuk menyederhanakan proses pembakaran [7].

3. Hasil dan Pembahasan

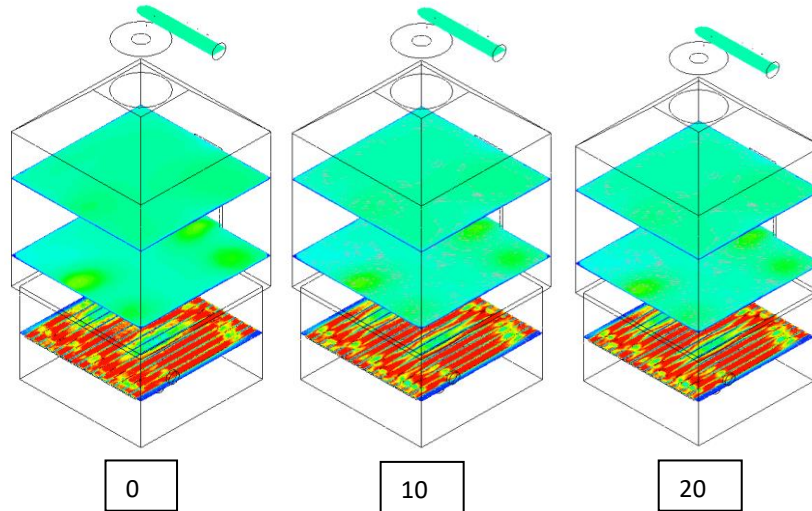
Hasil penelitian *co-firing* biomassa batok kelapa menunjukkan adanya perubahan dalam suhu *boiler* dan emisi yang dihasilkan selama proses pembakaran. Dalam penelitian ini, performa *boiler* merujuk pada suhu yang dihasilkan oleh setiap fraksi *co-firing* biomassa batok kelapa, baik suhu maksimum maupun suhu rata-rata yang terjadi di dalam stoker *boiler*. Sementara itu, emisi gas yang dihasilkan oleh stoker *boiler* merujuk pada berbagai senyawa yang dihasilkan selama pembakaran setiap fraksi *co-firing* biomassa batok kelapa, termasuk kandungan CO₂, O₂, CO, dan SO₂ di dalam tungku stoker *boiler*.

3.1 Temperatur Pembakaran

Temperatur pembakaran adalah salah satu indikator kunci yang menggambarkan kinerja *boiler*, dan semakin tinggi suhu yang dihasilkan, semakin baik kinerja *boiler* tersebut. Proses pembakaran dalam *boiler* terjadi karena interaksi antara bahan bakar, udara primer, dan udara sekunder. Perbedaan dalam komposisi antara biomassa batok kelapa dan batubara menyebabkan variasi suhu yang dihasilkan selama pembakaran setiap fraksi *co-firing* biomassa batok kelapa. Salah satu karakteristik utama bahan bakar biomassa yang signifikan dalam mempengaruhi kualitas pembakaran adalah tingginya kandungan zat volatil dengan nilai kalor yang rendah. Keberadaan nilai kalor rendah ini dapat mengakibatkan penurunan suhu maksimum selama proses pembakaran [8]. Hasil dari simulasi *co-firing* pada penelitian ini tertera pada gambar 3 untuk bidang XY dan gambar 4 untuk 3D..



Gambar 3 Kontur temperature bidang XY dengan *co-firing* 0-20%



Gambar 4 Kontur temperature bidang XY dengan *co-firing* 0-20%

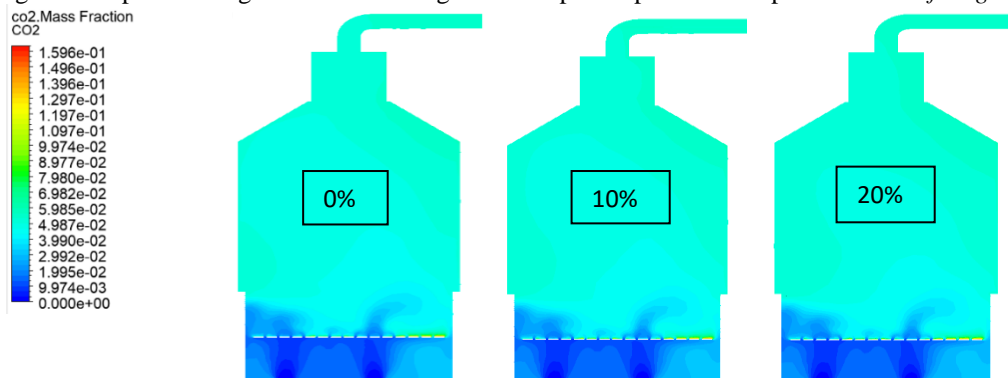
Gasifikasi dalam sebuah *boiler* terjadi ketika bahan bakar padat seperti batubara, biomassa, atau bahkan beberapa limbah, dipanaskan pada suhu tinggi dalam kondisi terkontrol dengan jumlah oksigen yang terbatas. Data suhu yang dihasilkan menunjukkan bahwa semakin besar presentase biomassa dalam campuran bahan bakar, suhunya akan semakin rendah, data temperatur spesifik tertera pada Tabel 3. Penurunan suhu ini terjadi karena nilai kalor biomassa dari batok kelapa lebih rendah daripada batubara. Selain itu, jika kita melihat komposisi ultimate dan proximate dari keduanya, biomassa batok kelapa memiliki kandungan oksigen (O) dan hidrogen (H) yang lebih tinggi. Hal ini menyebabkan sebagian besar energi panas digunakan untuk menguapkan dan mengoksidasi unsur-unsur tersebut sebelum mencapai suhu yang lebih tinggi.

Tabel 3. Data temperatur pada boiler dengan *co-firing* 0-20%

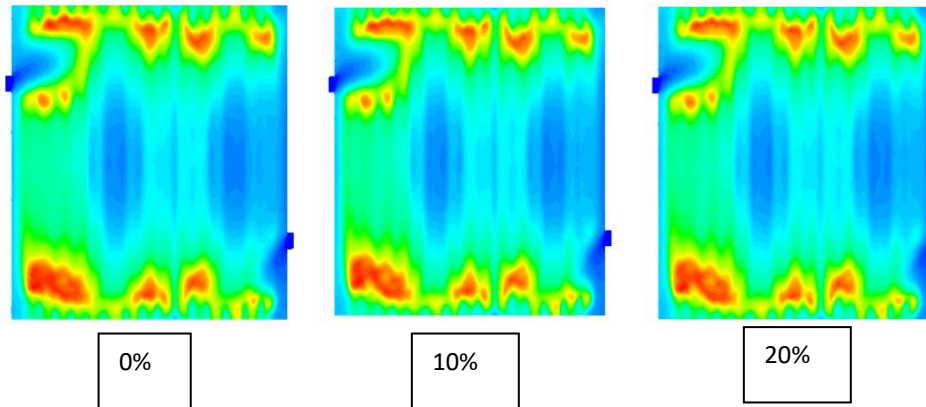
No.	Presentase Biomassa (%)	Temperatur (°C)
1	0	692,70
2	10	670,92
3	20	652,72

3.2 Emisi Gas CO₂ Pembakaran

Gas CO₂ merupakan salah satu gas yang muncul selama pembakaran bahan bakar seperti batubara dan biomassa di dalam *boiler*. Gas CO₂ ini dihasilkan ketika pembakaran berlangsung secara sempurna, yaitu ketika kandungan karbon dalam bahan bakar bereaksi sepenuhnya dengan oksigen (O₂). Namun, jika reaksi pembakaran tidak sempurna, maka akan menghasilkan gas karbon monoksida (CO) sebagai produk sampingan. Oleh karena itu, kandungan oksigen dalam bahan bakar dan kandungan oksigen dalam udara primer memiliki pengaruh yang signifikan terhadap jumlah fraksi CO₂ yang dihasilkan selama proses pembakaran bahan bakar. Gambar 5 memperlihatkan fraksi massa CO₂ pada bidang XY dan gambar 6 pada bidang XZ dalam emisi gas selama proses pembakaran pada fraksi *co-firing* 0%, 10%, dan 20%.



Gambar 5. Kontur CO₂ bidang XY dengan *co-firing* 0-20%



Gambar 6. Kontur CO2 bidang XZ dengan *co-firing* 0-20%

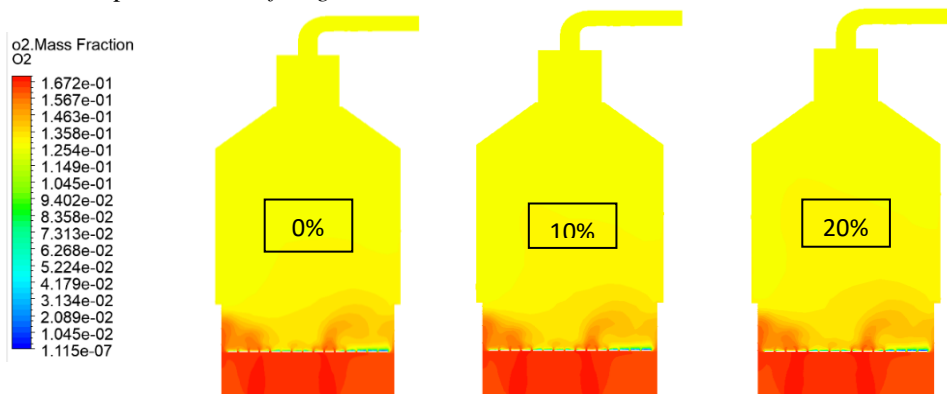
Pada gambar 5 dan 6 terlihat bahwa peningkatan fraksi biomassa batok kelapa menghasilkan peningkatan emisi gas CO₂ walaupun peningkatan itu dalam kontur terlihat kecil akan tetapi perubahan tetap berarti. Data spesifik CO₂ tertera pada Tabel 4. Berdasarkan kandungan proximate dan ultimate, batok kelapa memiliki kandungan karbon yang rendah tetapi kandungan oksigen yang lebih tinggi dibanding batu bara. Kandungan oksigen yang lebih tinggi menyebabkan proses oksidasi yang lebih besar pula, dimana hasil dari oksidasi adalah CO₂. Seperti yang tulis dipembahasan sebelumnya bahwa bahan bakar yang mengandung banyak oksigen memiliki kecenderungan untuk menghasilkan lebih banyak CO₂. Selain itu kandungan air pada batok kelapa lebih tinggi sehingga terjadi penguapan sebelum karbon terbakar. Proses penguapan ini membutuhkan energi yang lebih dan dapat menghasilkan gas CO₂ berlebih.

Tabel 4. Data emisi gas CO₂ dalam *co-firing* 0-20%

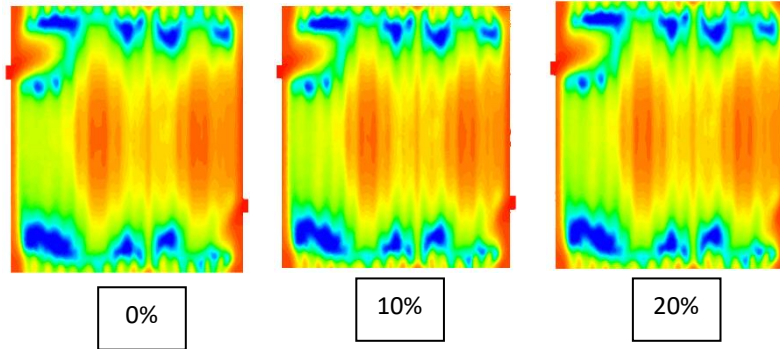
NO	Presentase Biomassa (%)	Fraksi Massa CO ₂
1	0	0,055
2	10	0,057
3	20	0,059

3.3 Emisi Gas O₂ Hasil Pembakaran

Gas oksigen (O₂) dalam *boiler* diperoleh melalui pasokan udara primer dan sekunder pada inlet tungku *boiler*. Oksigen ini berperan sebagai zat pengoksidasi yang memicu reaksi pembakaran pada komponen bahan bakar yang mudah terbakar yang dilepaskan dari partikel bahan bakar. Semakin banyak O₂ yang digunakan dalam proses oksidasi bahan bakar untuk pembakaran, semakin rendah emisi gas O₂ yang dihasilkan selama proses pembakaran bahan bakar. Emisi gas O₂ yang terjadi selama proses pembakaran bahan bakar di tungku *boiler* adalah salah satu indikator penting dalam menilai tingkat keberlanjutan lingkungan dari hasil emisi gas tersebut. Semakin banyak gas O₂ yang tersisa sebagai hasil dari proses pembakaran, semakin baik kualitas emisi gas buang yang dihasilkan dan semakin ramah lingkungan. Gambar 7 memperlihatkan fraksi massa O₂ pada bidang XY dan gambar 8 pada bidang XZ dalam emisi gas selama proses pembakaran pada fraksi *co-firing* 0%, 10%, dan 20%.



Gambar 7. Kontur O₂ bidang XY dengan *co-firing* 0-20%



Gambar 8. Kontur O₂ bidang XY dengan *co-firing* 0-20%

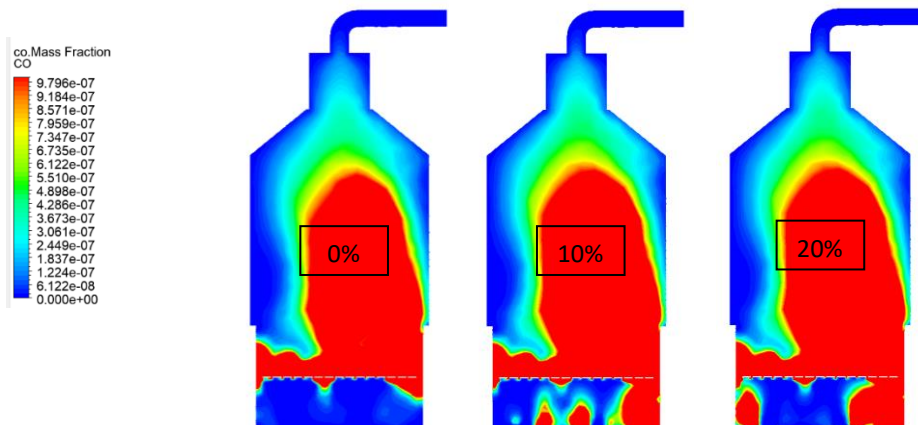
Hasil kontur fraksi massa O₂ dalam gas buang menunjukkan bahwa dengan peningkatan fraksi *co-firing* biomassa batok kelapa, fraksi massa O₂ cenderung meningkat walaupun peningkatan itu dalam kontur terlihat kecil akan tetapi perubahan tetap berarti. Data spesifik tertera pada Tabel 5. Peningkatan fraksi massa O₂ dalam *furnace stoker boiler* mengindikasikan bahwa jumlah oksigen dari udara primer dan sekunder yang terlibat dalam reaksi pembakaran semakin berkurang. Hal ini disebabkan oleh kandungan oksigen (O) yang lebih tinggi dalam biomassa dibandingkan dengan batubara, sehingga fraksi massa oksigen dalam *furnace* menjadi lebih tinggi [7]. Lalu penyebab utama lainnya adalah kadar oksigen biomassa lebih tinggi dibandingkan batu bara sehingga produksi oksigen meningkat [9]. Proses pembakaran biomassa pada suhu tertentu mengakibatkan oksigen pada bahan bakar bergabung dengan karbon (C) untuk membentuk CO₂, yang kemudian menguap sebagai volatile matter. Akibatnya, pembakaran biomassa menghasilkan lebih banyak CO₂ daripada CO, sesuai dengan hasil penelitian yang terlihat dalam Gambar 3 dan Gambar 5. Dengan demikian, udara primer dan sekunder tidak banyak digunakan untuk membakar gas CO, sehingga lebih banyak fraksi massa O₂ yang tersisa dalam *furnace*.

Tabel 5. Emisi gas O₂ dalam *co-firing* 0-20%

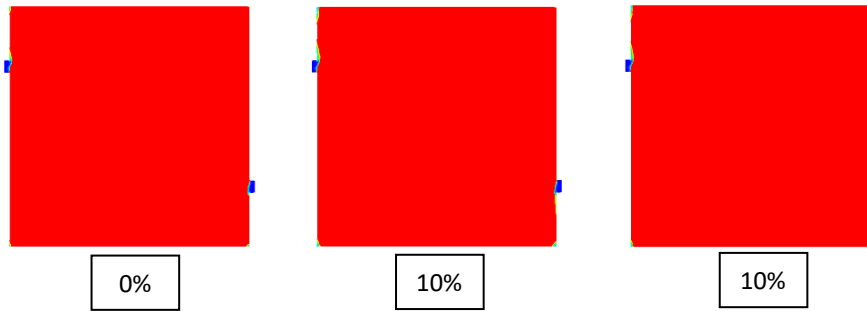
No.	Presentase Biomassa (%)	Fraksi Massa O ₂
1	0	0,127
2	10	0,127
3	20	0,127

3.4 Emisi Gas CO Hasil Pembakaran

CO adalah gas yang sangat mudah terbakar. Ketika gas CO yang dilepaskan dari materi volatil terbakar, suhu dalam *furnace* meningkat. Oleh karena itu, suhu dalam *furnace* selama proses pembakaran dapat digunakan sebagai indikator jumlah CO yang dihasilkan oleh bahan bakar. Keberadaan CO dalam gas buang hasil pembakaran di tungku *boiler* menandakan bahwa tidak semua senyawa CO telah terbakar sepenuhnya, yang mengindikasikan bahwa proses pembakaran tidak berlangsung dengan sempurna. Fraksi massa CO dalam emisi gas pembakaran pada fraksi *co-firing* 10% dan 20% ditunjukkan pada Gambar 8 pada bidang XY dan gambar 9 pada bidang XZ.



Gambar 8. Kontur CO bidang XY dengan *co-firing* 0-20%



Gambar 8. Kontur CO bidang XY dengan *co-firing* 0-20%

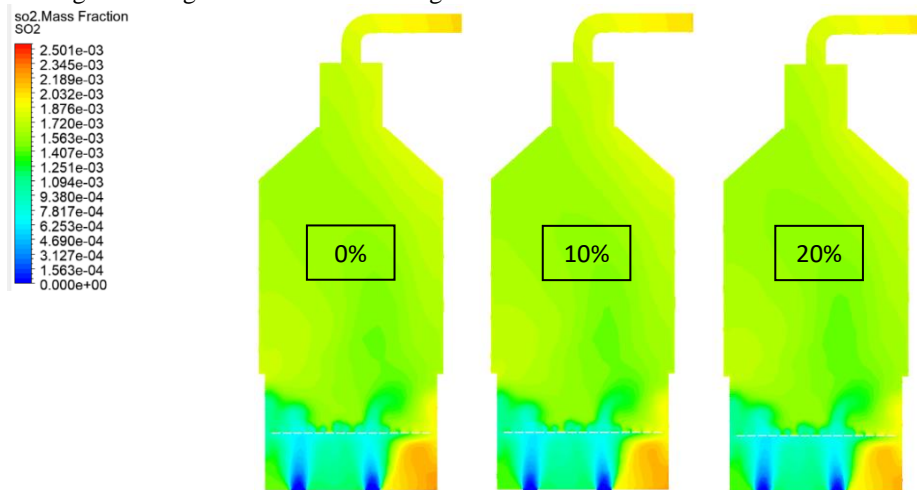
Hasil simulasi *co-firing* untuk tingkat fraksi *co-firing* 0-20% biomassa batok kelapa menunjukkan bahwa emisi gas CO mengalami penurunan seiring dengan peningkatan fraksi *co-firing* tersebut. Data spesifik CO tertera pada Tabel 6. Beberapa faktor yang memengaruhi penurunan kandungan CO dalam emisi gas buang seiring dengan peningkatan fraksi *co-firing* melibatkan temperatur pembakaran, kandungan karbon dalam bahan bakar, dan jumlah oksigen yang masuk ke dalam tungku *boiler*. Batubara memiliki kandungan karbon yang lebih tinggi dan kandungan oksigen yang lebih rendah daripada biomassa cangkang sawit. Sebagai akibatnya, jumlah gas CO yang terbentuk selama tahap primary *pyrolysis* dalam pembakaran batubara lebih besar dibandingkan dengan biomassa cangkang sawit. Dengan jumlah oksigen pada udara primer dan sekunder yang sama pada setiap tingkat fraksi *co-firing*, maka jumlah gas CO yang tetap ada dalam emisi gas hasil pembakaran batubara akan lebih besar daripada dalam pembakaran biomassa batok kelapa [10].

Tabel 6. Emisi gas CO dalam *co-firing* 0-20%

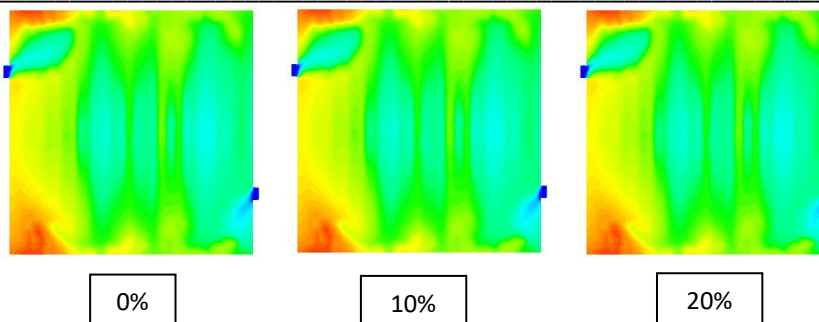
No.	Presentase Biomassa (%)	Fraksi Massa CO
1	0	6,31E-15
2	10	7,23E-15
3	20	6,94E-15

3.5 Emisi Gas SO₂ Hasil Pembakaran

Bahan bakar seperti batubara dan berbagai jenis biomassa, termasuk batok kelapa, mengandung unsur sulfur (S) dalam proporsi yang bervariasi. Ketika bahan bakar terbakar pada suhu tinggi, unsur sulfur ini bereaksi dengan oksigen dan membentuk senyawa sulfur dioksida (SO₂), yang kemudian terlarut dalam gas emisi pembakaran. SO₂ mulai terbentuk setelah gas *volatile matter* mengalami *secondary pyrolysis*. Kandungan SO₂ dalam gas buang berkontribusi pada pencemaran lingkungan udara dan dapat menjadi berbahaya bagi kesehatan makhluk hidup, terutama sistem pernapasan. Emisi gas SO₂ hasil pembakaran pada fraksi *co-firing* 0%, 10%, dan 20% dapat dilihat pada gambar 10 untuk bidang XY dan gambar 11 untuk bidang XZ.



Gambar 10. Kontur SO₂ bidang XY dengan *co-firing* 0-20%



Gambar 10. Kontur SO₂ bidang XY dengan *co-firing* 0-20%

Fraksi massa SO₂ yang dihasilkan selama pembakaran *co-firing* di dalam tungku *boiler* dipengaruhi oleh berbagai faktor. Salah satu faktor utama yang mempengaruhi produksi fraksi massa SO₂ selama pembakaran bahan bakar adalah kandungan sulfur dalam bahan bakar tersebut. Semakin tinggi kandungan sulfur dalam suatu bahan bakar, semakin besar pula fraksi massa SO₂ yang dihasilkan selama pembakaran. Hal ini wajar karena batubara memiliki kandungan sulfur yang lebih tinggi daripada biomassa cangkang sawit. Oleh karena itu, dari perspektif emisi fraksi massa SO₂ selama pembakaran, *co-firing* biomassa cangkang sawit dengan fraksi yang lebih tinggi akan menghasilkan emisi gas yang lebih ramah lingkungan. Data spesifik SO₂ tertera pada Tabel 7 dibawah ini.

Tabel 7. Data emisi gas SO₂ dalam *co-firing* 0-20%

No.	Presentase Biomassa (%)	Fraksi Massa SO ₂
1	0	1,56E-03
2	10	1,54E-03
3	20	1,51E-03

4. Kesimpulan

Dari hasil penelitian pembakaran dengan *co-firing* biomassa batok kelapa pada *boiler* stoker, maka kesimpulan yang dapat diambil sebagai berikut.

1. Temperatur yang didapat pada pembakaran *co-firing*, terjadi penurunan temperatur yang dihasilkan seiring peningkatan biomassa dari 0-20%. Hal itu disebabkan nilai kalor batu bara lebih tinggi dari pada biomassa batok kelapa.
2. Emisi gas yang dihasilkan dari pembakaran *co-firing* adalah terjadi peningkatan CO₂ dan O₂, serta penurunan pada CO dan SO₂ seiring bertambahnya biomassa. Walaupun CO₂ meningkat, hal tersebut bernilai kecil dan masih dibatas toleransi karena gas CO₂ masih bisa diserap oleh tumbuhan. Sementara itu, penurunan gas CO dan SO₂ mengindikasikan pembakaran *co-firing* ini bisa mengurangi emisi gas buang yang tidak ramah lingkungan seperti CO dan SO₂. Gas CO sangat berbahaya bagi lingkungan karena tidak bisa diserap oleh tumbuhan dan dapat menipiskan lapisan ozon,

5. Daftar Pustaka

- [1] Safty & Siha, 2013. *Environmental And Health Impact Of Coal Use For Energy Production*. *Egyptian Journal of Occupational Medicine*, 2013; 37 (2) : 181-194
- [2] Direktorat Jenderal Energi Baru, Terbarukan dan Konservasi Energi. Potensi sumber daya bioenergi dan potensi pengembangan proyek PLT Bioenergi di Indonesia. Available from: <https://ebtke.esdm.go.id/lintas/id/investasi-ebtke/sektor-bioenergi/program-pemerintah/>
- [3] Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. Optimalisasi Pemanfaatan Biomassa Pengganti Batubara. Available from: <https://www.esdm.go.id/>
- [4] Triani et al., 2022. *The Potential Implementation of Biomass Co-firing with Coal in Power Plant on Emission and Economic Aspects: A Review*. *Journal of Sciences and Data Analysis*. 2720-9326
- [5] Sukarta IN, Ayuni PS. Analisis Proksimat Dan Nilai Kalor Pada Pellet Biosolid Yang Dikombinasikan Dengan Biomassa Limbah Bambu. *JST (Jurnal Sains dan Teknol*. 2016;5(1):728–35.
- [6] Nurlela N. Analisa Total Moisture Dan Ash Content Pada Briket Batubara. *J Redoks*[Internet]. 2019;4(1):36–43. Available from: <https://jurnal.univpgri-palembang.ac.id/index.php/redoks/article/view/3073>

-
- [7] Zhang, Xinsui., 2013. *Numerical modeling of co-firing a light density biomass, oat (Avena ativa) hulls, and chunk coal in fluidized bed boiler*. Biomass and Bioenergy, 56. 239-246.
- [8] I Nyoman Suprpta Winaya., & Ida Bagus Agung Darma Susila. (2010). *Co-firing Sistem Fluidized Bed Berbahan Bakar Batubara dan Ampas Tebu*. Jurnal Ilmiah Teknik Mesin, 4(2): 180-188
- [9] Sutarto et al., 2020. *Pembakaran Bersama Biomassa dan Batu Bara: Pengaruh Rasio Biomassa-Batu Bara dan Excess Air*. Mekanika: Majalah Ilmiah Mekanika/Halaman 29 Volume 19 Nomor 1
- [10] Aziz, M., Budianto, D., & Oda, T. (2016). *Computational fluid dynamic analysis of co-firing of palm kernel shell and coal*. Energies, 9(3), 1–13. <https://doi.org/10.3390/en9030137>