



Simulasi CFD Pengurangan CO₂ pada *Co-firing* Batubara dan Tandan Kosong Kelapa Sawit Menggunakan Model Pembakaran *Non-Premixed*

CFD Simulation of CO₂ Reduction in Co-firing of Coal and Palm Oil Empty Fruit Bunches using a Non-Premixed Combustion Model

AGUS PRASETYO NURYADI^{1*}, MUHAMMAD PENTA HELIOS¹, ANDHY MUHAMMAD FATHONI¹, CHAIRUNNISA¹, FITRIANTO¹, HARIYOTEJO PUJOWIDODO¹, KANON PRABANDARU SUMARAH¹, RIKI JAKA KOMARA², FAIRUZ MILKIY KUSWA¹, RESPATYA TEGUH SOEWONO¹

¹Pusat Riset Konversi dan Konservasi Energi (PRKKE), Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN)

²Direktorat Pengelolaan Laboratorium, Fasilitas Riset, dan Kawasan Sain & Teknologi (DPLFRKST), Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN)

*agus130@brin.go.id

ARTICLE INFO

Article history:

Received 28 April 2023

Accepted 14 July 2023

Published 31 July 2023

Keywords:

Computational fluid dynamic

Co-firing

Carbon dioxide reduction

Non-premixed combustion model

Palm oil empty fruit bunches

ABSTRACT

Co-firing is one of the Indonesian programs to reduce emissions in power plants dominated by coal-fired power plants. Indonesia has potential palm oil waste, palm oil empty fruit bunches (POEFB), which have yet to be utilized for co-firing. The combustion analysis is required before using the POEFB as a solid fuel in the boiler. This study aimed to characterize co-firing combustion of coal and POEFB. Various mixing ratios of POEFB and coal used in this study were 10, 20, and 30%. A computational fluid dynamic (CFD) simulation was carried out to determine the temperature, gas emissions, and carbon dioxide (CO₂). The domain CFD used a structured grid to increase numerical accuracy. Non-premixed combustion and probability density function (PDF) were used to describe combustion chemistry. The results of this study showed that the highest co-firing temperature was at 30% POEFB. It was due to the mixing of POEFB and coal increasing the volatile value, which affects the temperature combustion. In addition, at 30% POEFB, the mass fraction of CO₂ decreased significantly, causing the mass fraction of CO to increase. While the mass fraction of NO increased at the increase of POEFB, it was still under the threshold of 200 mg/Nm³

INFORMASI ARTIKEL

Histori artikel:

Diterima 28 April 2023

Disetujui 14 Juni 2023

Diterbitkan 31 Juli 2023

Kata kunci:

Co-firing

Dinamika fluida komputasi

Pengurangan karbon dioksida

Model pembakaran Non-

premixed

Tandan kosong kelapa sawit

ABSTRAK

*Co-firing merupakan salah satu program Indonesia untuk mengurangi emisi pada pembangkit listrik yang didominasi oleh pembangkit listrik tenaga batubara. Indonesia memiliki potensi limbah kelapa sawit yaitu tandan kosong kelapa sawit (TKKS), yang belum dimanfaatkan untuk co-firing. Analisis pembakaran diperlukan sebelum menggunakan TKKS sebagai bahan bakar padat dalam boiler. Penelitian ini bertujuan untuk mengkarakterisasi pembakaran batubara dan TKKS secara bersama. Variasi rasio pencampuran TKKS dan batubara yang digunakan dalam penelitian ini adalah 10, 20, dan 30%. Simulasi *computational fluid dynamic* (CFD) dilakukan untuk mengetahui temperatur, emisi gas, dan karbon dioksida (CO₂). Domain CFD menggunakan grid terstruktur untuk meningkatkan akurasi numerik. Pembakaran *non-premixed* dan *probability density function* (PDF) digunakan untuk menjelaskan kimia pembakaran. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa temperatur *co-firing* tertinggi adalah pada 30% TKKS. Hal ini disebabkan karena pencampuran TKKS dan batubara meningkatkan nilai volatilitas yang mempengaruhi temperatur pembakaran. Selain itu, pada 30% TKKS di mana fraksi massa CO₂ mengalami penurunan yang cukup signifikan, sehingga menyebabkan fraksi massa CO meningkat. Sedangkan fraksi massa NO meningkat pada peningkatan TKKS namun masih di bawah ambang batas 200 mg/Nm³.*

1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pengurangan emisi CO₂ merupakan isu mendesak saat ini dengan dorongan dekarbonisasi pada setiap bidang khususnya pada sektor energi. Pencapaian netralitas karbon dengan tetap mempertahankan efisiensi biaya untuk pembangkit listrik dari batubara (PLTU-pembangkit listrik tenaga uap) masih menjadi tantangan yang besar. Hal ini membutuhkan strategi untuk mengganti batubara dengan bahan bakar rendah karbon dengan mengurangi emisi karbon secara bertahap. Salah satunya adalah pembakaran dengan mencampur batubara dengan biomassa atau *co-firing* (Barzak, 2011). Biomassa dimanfaatkan sebagai pilihan energi berkelanjutan dan pengganti sumber energi tak terbarukan. Limbah pertanian dan kehutanan, limbah makanan, dan limbah industri berpotensi diubah menjadi listrik untuk keperluan rumah tangga dan industri (Saleem, 2022). Indonesia memiliki potensi biomassa yang melimpah dan dapat menjadi solusi untuk meningkatkan rasio EBT (energi baru dan terbarukan) dalam waktu dekat dengan mencampur biomassa dengan batubara sebagai bahan bakar *co-firing* untuk pembangkit listrik saat ini. Tandan kosong kelapa sawit (TKKS) mendapat perhatian yang sangat tinggi karena ketersediaannya yang besar akan tetapi masalah lingkungan yang tinggi karena belum dimanfaatkan. Oleh karena itu pemanfaatan TKKS untuk energi termasuk *co-firing* diyakini mampu meningkatkan nilai ekonomi dan mengurangi permasalahan lingkungan (Praevia & Widayat, 2022).

Di Indonesia, PLTU didominasi menggunakan teknik yang disebut *pulverized coal combustion* (PC boiler), di mana batubara dihancurkan menjadi partikel halus dan kemudian diinjeksikan ke dalam ruang bakar, hal itu menyebabkan polusi udara yang signifikan (Smoot & Baxter, 2003). *Co-firing* akan di terapkan pada 52-unit PLTU sesuai Rencana Umum Ketenagalistrikan Nasional (RUKN) untuk mendukung pemerintah dalam program energi terbarukan sehingga pemerintah tidak perlu membangun PLTU baru. Pada 2021 *co-firing* sudah diterapkan di 26 PLTU dengan persentase satu sampai lima persen biomassa (Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, 2021). Oleh karena itu, diperlukan penelitian untuk menganalisis pembakaran *co-firing* sebelum biomassa dicampur batubara menjadi bahan bakar padat pada boiler PLTU. Metode simulasi numerik memungkinkan perolehan informasi tentang sifat pembakaran yang sulit dilakukan secara langsung pada boiler PLTU karena mahal dan rawan gagal.

Studi ini adalah model baru pembakaran *co-firing* dengan bahan bakar padat TKKS dan batubara menggunakan tungku pembakaran *Drop Tube Furnace* (DTF) untuk memprediksi perubahan temperatur dan produk gas emisi, terutama dapat menjelaskan penurunan CO₂ dengan bahan bakar batubara dan campuran persentase biomassa tandan kosong kelapa sawit. Pendekatan simulasi numerik dengan *Computational Fluid Dynamic* (CFD) berbasis pada model pembakaran *non-premixed* dan *Probability Density Function* (PDF) untuk menjelaskan pembakaran menggunakan formulasi laju hingga dan kimia pembakaran. Studi sebelumnya hanya fokus pembakaran batubara dan pengurangan emisi dengan menambahkan konsentrasi dan mengganti fluida oksidiser.

Model PDF digunakan untuk menjelaskan pembakaran bubuk batubara karena lebih efektif dan lebih sedikit persamaan transportasi spesies yang harus diselesaikan (Sahajwalla et al., 1997). Investigasi ini juga memprediksi bagaimana distribusi gas dan partikel mempengaruhi transmisi panas radiasi dalam pembakaran batu bara bubuk dengan asumsi geometri asimetris (Ettouati et al., 2007). Selain itu, bagaimana distribusi gas dan partikel mempengaruhi transmisi panas radiasi dalam pembakaran batu bara bubuk asimetris (Rahmanian Kooshkaki & Ghazikhani, 2009). Studi dua dimensi dengan batubara bubuk dibakar dalam kondisi yang berbeda, dan fokus untuk menyelidiki efek gas yang berbeda untuk mengurangi polutan. Para peneliti telah menganalisis bagaimana gas-gas pengganti oksidiser memengaruhi berbagai parameter, seperti temperatur, kecepatan, dan NO_x, pada berbagai konsentrasi gas (Rahmanian et al., 2014). Kemudian, sebuah model dibuat untuk menyelidiki bagaimana NO_x berkurang saat membakar batubara bubuk. Pembakaran batubara disimulasikan dengan menggunakan metode SIMPLE, dan interaksi antara turbulensi dan kimia disimulasikan dengan menggunakan model PDF (Rahmanian et al., 2014).

Analisis pembakaran batubara bubuk di pabrik semen yang melibatkan perhitungan numerik menggunakan *Fluent* dengan menerapkan persamaan energi untuk memperkirakan medan aliran internal temperatur dan jumlah bahan kimia yang mudah menguap serta polutan, yang mencakup model tradisional (P1) dan model pembakaran *non-premixed* (Dong et al., 2014). Investigasi pembakaran dua dimensi pada *blast furnace* menggunakan partikel batubara yang tidak tercampur diinjeksikan sebagai aliran berkecepatan tinggi, sementara udara disuplai dari saluran masuk atas dan bawah. Karena geometri simetris, hanya setengah dari domain yang dipertimbangkan menggunakan *Fluent* (Naik & Dewangan, 2017). Studi tentang boiler *pulverized coal* berbahan bakar tangensial dengan model PDF dan pembakaran *non-premixed* menggambarkan kondisi pembakaran *pulverized coal*, seperti sifat nyala api, pola pembakaran batubara, dan pelepasan polutan NO_x (Sun et al., 2019). Pemodelan dua dimensi pembakaran bubuk dengan tiga batubara dipelajari dengan menggunakan pembakaran *non-premixed* turbulen kondisi tunak. Dampak dari berbagai faktor ini telah dibahas pada temperatur puncak di dalam tungku, perpindahan panas ke/dari sistem ke lingkungan sekitar, dan emisi gas menggunakan *Fluent* (Dewangan et al., 2020).

1.2 Tujuan

Penelitian ini bertujuan untuk memprediksi penurunan CO₂ dan gas emisi lainnya dengan pendekatan simulasi numerik pembakaran *co-firing* TKKS pada tungku DTF menggunakan komersial perangkat lunak CFD *Fluent* dengan model pembakaran *non-premixed*. Hasil penelitian ini dapat dijadikan rekomendasi awal dalam menganalisis pembakaran *co-firing* menggunakan biomassa TKKS.

2. METODOLOGI

Domain simulasi CFD pada perangkat lunak ANSYS *Fluent* 2020 R1 menggunakan mesh terstruktur sesuai dengan dimensi tungku pembakaran DTF. Parameter yang

diterapkan pada simulasi sesuai dengan pengujian DTF mengacu pada studi yang dilakukan oleh Hariana (Hariana et al., 2022; Hariana, Prismantoko, et al., 2023; Hariana, Putra, et al., 2023). DTF adalah tungku dan tabung keramik silinder dengan diameter 70 mm, panjang 1200 mm dan dioperasikan pada temperatur 1.200°C. Bahan bakar padat dimasukkan dari hopper penyimpanan dengan laju 50–100 g/jam dan dicampur dengan udara yang mengalir dengan laju 22,5 L/menit dengan rasio bahan bakar udara 1:7. Bahan bakar yang digunakan dalam simulasi adalah batubara bituminous yang bersumber dari Kutai di Kalimantan Timur, dan Tandan kosong kelapa sawit (TKKS) dari Tangerang Selatan di Banten. Tabel 1 menampilkan hasil analisis yang meliputi analisis proksimat dan ultimate batubara dan tandan kosong kelapa sawit (TKKS).

Tabel 1. Proximate dan ultimate analisis (Hariana et al., 2022)

Proximate analisis	Batubara	TKKS	10% TKKS	20% TKKS	30% TKKS
Volatile Matter	0,4328	0,7457	0,46409	0,49538	0,52667
Fixed Carbon	0,3816	0,1742	0,36086	0,34012	0,31938
Ash	0,0678	0,0320	0,06422	0,06064	0,05706
Moisture	0,1178	0,0481	0,11083	0,10386	0,09689
Ultimate analisis					
C	0,5948	0,4536	0,58068	0,56656	0,55244
H	0,0408	0,0559	0,04231	0,04382	0,04533
O	0,2872	0,4034	0,29882	0,31044	0,32206
N	0,0075	0,0062	0,00737	0,00724	0,00711
S	0,0019	0,0008	0,00179	0,00168	0,00157

Persamaan yang mengatur meliputi persamaan kekekalan massa, persamaan kekekalan momentum dan persamaan kekekalan energi (Echehki & Mastorakos, 2011; Li et al., 2003; Sahajwalla et al., 1997).

Persamaan kekekalan massa:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \dots\dots\dots(1)$$

Persamaan kekekalan momentum:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{u}) + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \vec{g} \dots\dots\dots(2)$$

Persamaan energi untuk Model Pembakaran Non-Premixed:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho H) + \nabla \cdot (\rho \vec{u} H) = \nabla \cdot \left(\frac{k_t}{c_p} \nabla H \right) + S_h \dots\dots\dots(3)$$

H adalah total enthalpi:

$$H = \sum_j Y_j H_j \dots\dots\dots(4)$$

S_h pada Persamaan (3), adalah sumber energi akibat reaksi kimia:

$$S_h = -\sum \frac{h_j^0}{M_j} R_j \dots\dots\dots(5)$$

Persamaan yang digunakan untuk mengangkut energi kinetik turbulen (K) dan efek turbulen dipertimbangkan dengan memanfaatkan model turbulen ke-ε (Yan et al., 2012) :

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} k) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + G_k - \rho \epsilon + P_K \dots\dots\dots(6)$$

Untuk persamaan Discrete Ordinates (DO) model (Goodarzi et al., 2014).

$$\nabla \cdot (I_\lambda(\vec{r}, \vec{s}) \vec{s}) + (a_\lambda + \sigma_s) I_\lambda(\vec{r}, \vec{s}) = a_\lambda n^2 I_{b\lambda} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I_\lambda(\vec{r}, \vec{s}') \varphi(\vec{s}, \vec{s}') d\Omega' \dots\dots\dots(7)$$

Sedangkan devolatilisasi (Yan et al., 2012):

$$\frac{-dm_p}{dt} = k(m_p - (1 - f_{v,0} - f_{w,0})m_{p,0}) \dots\dots\dots(8)$$

dimana:

$$K = A_1 \exp \frac{-E}{RT}$$

Fraksi Campuran dan Pemodelan PDF (Yan et al., 2012):

Fraksi Campuran (\bar{f}) :

$$\frac{\partial(\rho \bar{f})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{f} \vec{u}) = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_t}{\sigma_f} \nabla \bar{f} \right) + \frac{\dot{m}_{p,0}}{m_{p,0}} (m_{p,in} - m_{p,out}) \dots\dots\dots(9)$$

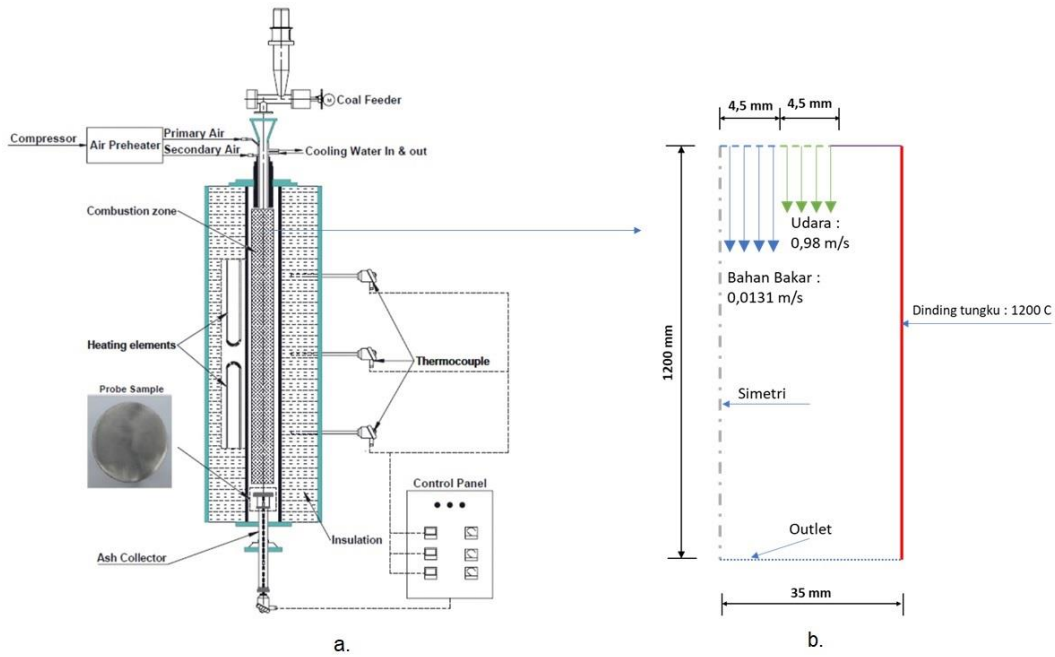
Rata-rata varian fraksi campuran (\bar{f}'^2):

$$\frac{\partial(\rho \bar{f}'^2)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{f}'^2 \vec{u}) = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_t}{\sigma_g} \nabla \bar{f}'^2 \right) + 2,86 \mu_t (\nabla \bar{f}'^2) - 2 \rho \frac{\epsilon}{k} \bar{f}'^2 \dots\dots\dots(10)$$

ANSYS Fluent 2020 R1 digunakan untuk mensimulasikan pembakaran pada studi ini. Fluent digunakan untuk menyelesaikan persamaan diferensial parsial yang mengatur aliran ini. Metode QUICK digunakan untuk semua suku konvektif, algoritma SIMPLE digunakan untuk kecepatan, serta interaksi antara turbulensi dan kimia disimulasikan menggunakan Probability Density Function (PDF) untuk menyelesaikan persamaan transpor soliter (Madejski, 2018; Stöllinger et al., 2013; Zheng et al., 2023; Zhu et al., 2023). Proses perhitungan dihentikan setelah nilai sisa untuk semua persamaan berada di bawah 10⁻⁷. Untuk mengatasi masalah pada sistem non-adiabatik, kecepatan inlet tungku yang ditentukan dihubungkan dengan rasio udara bahan bakar dan kondisi dinding, dan ini termasuk perpindahan panas ke campuran pada dinding tungku. Dinding tungku dipertahankan pada temperatur stabil 1.200°C (Hariana et al., 2022), itulah sebabnya kondisi batas isothermal dibuat untuk mensimulasikan kondisi tungku DTF.

Model 2D digunakan untuk mensimulasikan hanya separuh tungku, dengan garis tengah mengalami kondisi simetris.

Kondisi arus keluar diterapkan di pintu keluar, dan detail spesifik dari DTF dan domain dapat ditemukan di Gambar 1.

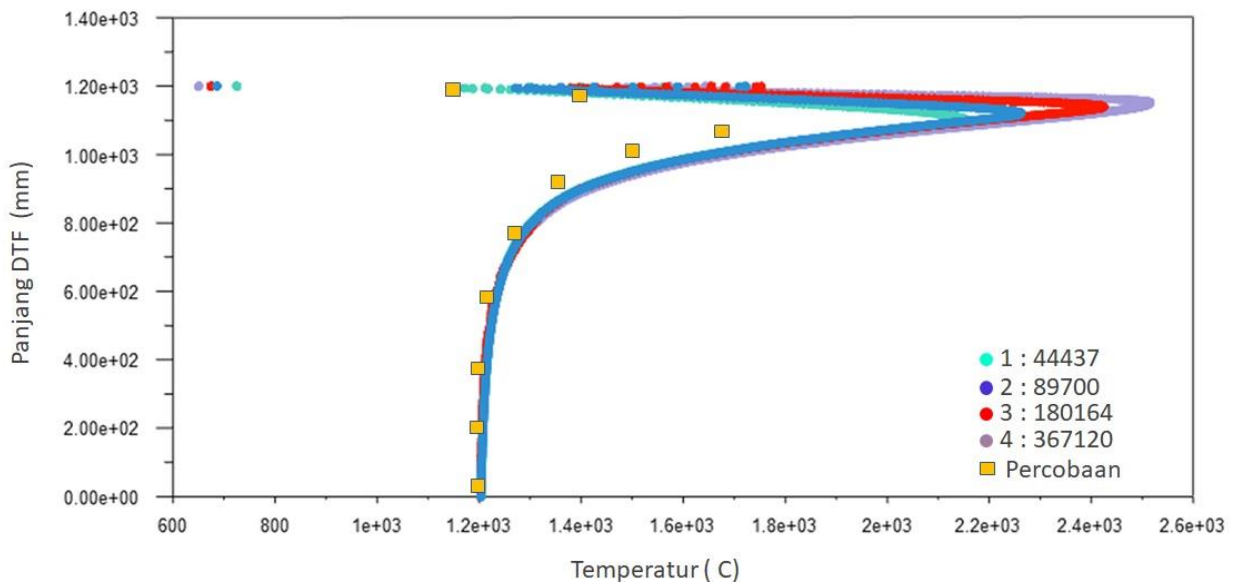


Gambar 1. a. DTF (Hariana et al., 2022; Hariana, Prismantoko, et al., 2023; Hariana, Putra, et al., 2023) dan b. Domain CFD.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Verifikasi dan validasi dilakukan untuk mengecek perhitungan numerik sebelum menganalisis lebih lanjut dengan bahan bakar batubara, kemudian dibandingkan dengan percobaan pembakaran aktual di DTF. Gambar 2 menjelaskan hasil simulasi batubara dalam bentuk temperatur dan fraksi massa CO₂ dengan beberapa jumlah

mesh untuk mengetahui keakuratan simulasi numerik kemudian dibandingkan dengan hasil ekperimental dari studi (Darmawan et al., 2018). Gambar 2. menunjukkan bahwa terjadi perbedaan temperatur pada awal masuk bahan bakar dan kemudian konstan hal itu selaras dengan hasil percobaan. Berdasarkan hasil tersebut, grid ke empat dipilih dengan jumlah mesh 367.120 untuk semua skenario simulasi *co-firing*.

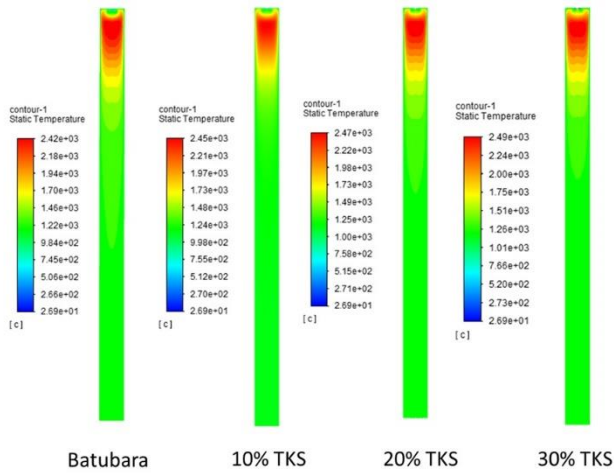


Gambar 2. Tes independensi *grid* dan perbandingan percobaan pada temperatur

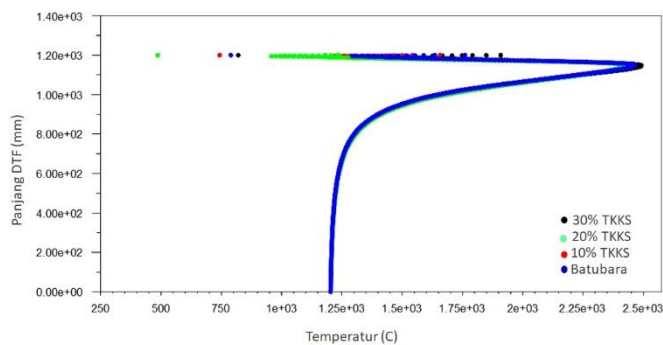
Model baru komputasi diterapkan untuk memprediksi pembakaran *co-firing* dalam *drop tube furnace* (DTF) dengan persentase 10, 20, dan 30% TKKS untuk mengetahui karakteristik polutan dan temperatur. Gambar 3 dan 4

menjelaskan perbedaan temperatur variasi persentase TKKS *co-firing* dan batubara dimana temperatur pembakaran untuk *co-firing* 30% TKKS tertinggi karena nilai *volatile matter* pada proximate bertambah dikarenakan batubara dicampur

dengan TKKS, dapat dilihat pada Tabel 1. nilai volatilitas bertambah seiring dengan bertambahnya persentase biomassa. Gambar 4 menjelaskan fenomena distribusi temperatur di sepanjang garis tengah, pada ketinggian 1.200-800 mm terjadi perbedaan, kemudian setelah ketinggian 800 mm sampai 0 mm temperatur antara bahan bakar sama sesuai temperatur *furnace* 1.200°C.



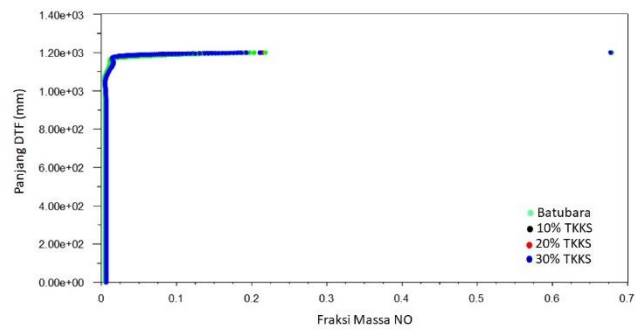
Gambar 3. Perbandingan kontur temperatur



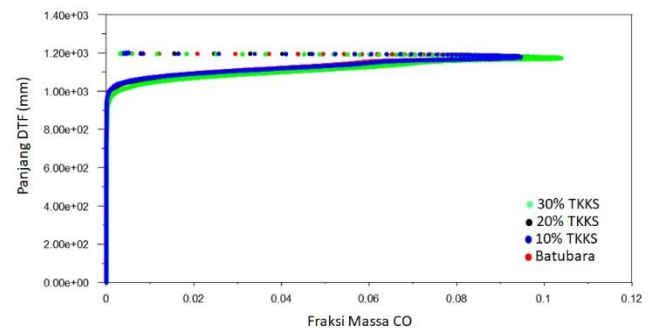
Gambar 4. Grafik perbandingan temperatur

Peningkatan temperatur pada pembakaran *co-firing* dapat disebabkan oleh beberapa faktor. Pertama, biomassa memiliki reaktivitas yang lebih tinggi dibandingkan dengan batubara. Biomassa mengandung senyawa organik yang mudah menguap yang dengan mudah melepaskan gas yang mudah terbakar ketika dipanaskan. Gas-gas tersebut adalah metana dan karbon monoksida yang berkontribusi pada temperatur pembakaran yang lebih tinggi (Glushkov *et al.*, 2021). Kemudian, bahan bakar biomassa memiliki kadar abu yang lebih rendah dibandingkan dengan bahan bakar fosil. Abu memiliki kapasitas panas yang lebih tinggi di mana dapat menimbulkan proses pembakaran pada biomassa *co-firing* dapat mencapai temperatur yang lebih tinggi (Choo *et al.*, 2021; Tumuluru *et al.*, 2012; Wu *et al.*, 2023). Pembakaran *co-firing* meningkatkan pasokan udara pembakaran untuk memastikan pencampuran dan pembakaran campuran biomassa dan bahan bakar fosil yang tepat. Aliran udara yang meningkat menyediakan lebih banyak oksigen untuk mendukung pembakaran yang mengarah ke temperatur yang lebih tinggi (Pérez-Jeldres *et al.*, 2017; Triani *et al.*, 2022). Pembakaran biomassa dengan bahan bakar fosil dapat menciptakan efek sinergis, di mana kombinasi kedua bahan bakar tersebut meningkatkan proses pembakaran secara

keseluruhan. Pembakaran biomassa dapat mempengaruhi karakteristik pembakaran bahan bakar fosil, mendorong pembakaran yang lebih efisien dan sempurna serta menghasilkan temperatur yang lebih tinggi (Matveeva *et al.*, 2023; Paiman *et al.*, 2018; Trinh *et al.*, 2021; Variny *et al.*, 2021). Peningkatan temperatur spesifik dalam pembakaran biomassa *co-firing* dapat bergantung pada berbagai faktor, termasuk jenis dan kadar air biomassa, rasio pencampuran biomassa dengan bahan bakar fosil, kondisi pembakaran, dan desain sistem pembakaran.



Gambar 5. Grafik perbandingan fraksi massa NO

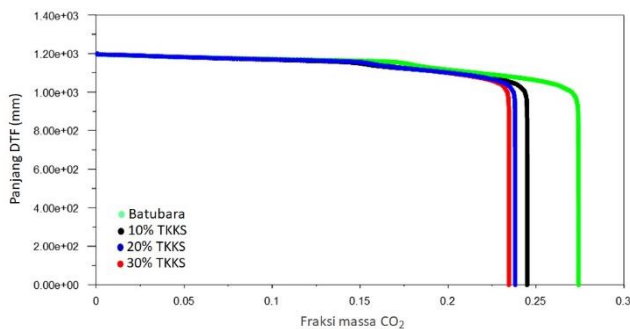


Gambar 6. Grafik perbandingan fraksi massa CO

Gambar 5 menjelaskan fraksi massa NO dan Gambar 6 menjelaskan fraksi massa CO, dari gambar distribusi fraksi massa di sepanjang garis tengah menunjukkan bahwa semakin tinggi persentase TKKS semakin tinggi fraksi massa NO dan CO hal tersebut disebabkan oleh kandungan oksigen meningkat setiap persentase TKKS meningkat hal tersebut dapat di lihat pada Tabel 1 di ultimate analisis. Peningkatan NO_x termal dapat memberikan penjelasan yang baik untuk fenomena ini, di mana sangat bergantung pada temperatur nyala api. Termal NO_x dihasilkan oleh serangkaian reaksi kimia dengan adanya oksigen dan nitrogen dalam pembakaran, yang selanjutnya bereaksi membentuk nitrogen oksida. Reaksi kimia utama yang berpartisipasi dikenal sebagai mekanisme Zeldovich (Akbari *et al.*, 2021; Normann *et al.*, 2008; Rao *et al.*, 2022, 2023), dan ini terjadi di wilayah temperatur tinggi dari ruang pembakaran. Dalam mekanisme Zeldovich terjadi pembentukan NO_x termal yang meningkat secara eksponensial dengan meningkatnya temperatur dan secara linear dengan meningkatnya waktu tinggal. Temperatur nyala api tergantung pada rasio udara-bahan bakar. Rasio stoikiometri udara-bahan bakar adalah titik temperatur teoretis tertinggi di mana api menyala.

Biomassa memiliki tingkat nitrogen yang lebih tinggi dibandingkan dengan bahan bakar fosil (Qian *et al.*, 2011).

Selama pembakaran, nitrogen dalam biomassa bereaksi dengan oksigen di udara membentuk nitrogen oksida (NO_x), terutama NO. Oleh karena itu, peningkatan kandungan nitrogen dalam biomassa menyebabkan emisi NO yang lebih tinggi dibandingkan dengan batubara. Bahan bakar biomassa sering kali memiliki komposisi yang kompleks dan dapat mengandung kadar air yang lebih tinggi dibandingkan dengan batubara (Zhao *et al.*, 2021). Adanya uap air memengaruhi proses pembakaran dan dapat menyebabkan pembakaran yang tidak sempurna. Pembakaran yang tidak sempurna menghasilkan pelepasan karbon monoksida (CO) yang lebih tinggi. Pembakaran biomassa dengan bahan bakar fosil dapat mengubah kondisi pembakaran di dalam tungku. Biomassa biasanya memiliki nilai kalor yang lebih rendah dan karakteristik pembakaran yang berbeda dibandingkan dengan bahan bakar fosil. Perbedaan kondisi pembakaran dapat mempengaruhi pencampuran dan waktu tinggal bahan bakar dan udara, yang menyebabkan pembakaran tidak sempurna dan peningkatan emisi CO dan NO (Demirbas, 2004; Variny *et al.*, 2021).



Gambar 7. Grafik perbandingan fraksi massa CO₂

Gambar 7 menjelaskan fraksi berat polutan CO₂ yang menunjukkan penurunan *co-firing* dengan tandan kosong. Terjadi penurunan signifikan antara fraksi massa CO₂ antara Batubara dan 10% TKKS, kemudian sedikit penurunan pada 20 ke 30% TKKS, Gambar 7 menunjukkan bahwa semakin ditambah persentase TKKS terjadi penurunan fraksi CO₂. Keseluruhan emisi CO₂ dari proses pembakaran berkurang karena biomassa dianggap netral karbon. Meskipun sejumlah CO₂ masih dilepaskan selama pembakaran biomassa, hal ini tidak berkontribusi pada peningkatan jangka panjang dalam kadar CO₂ di atmosfer karena diimbangi oleh penyerapan CO₂ selama fase pertumbuhan biomassa (Yang *et al.*, 2019, 2021). CO₂ adalah indikator penyelesaian proses pembakaran dan dapat memainkan peran pelengkap temperatur. Fraksi mol CO₂ meningkat secara signifikan dengan penurunan rasio udara berlebih di atmosfer yang kaya bahan bakar. Produksi CO₂ berbanding lurus dengan jumlah pasokan bahan bakar. Namun, lajunya menunjukkan tren yang berbeda pada atmosfer reduksi yang berbeda di mana tingkat produksi CO₂ menurun tajam dengan oksigen yang terbatas bahkan dengan tingkat pasokan bahan bakar dua kali lipat. Penting untuk dicatat bahwa pengurangan emisi CO₂ secara keseluruhan melalui pembakaran biomassa bergantung pada persentase biomassa yang digunakan, jenis biomassa, efisiensi proses pembakaran, dan faktor lainnya. Namun, secara umum, pembakaran bersama biomassa menawarkan opsi energi terbarukan dengan emisi CO₂ bersih yang lebih rendah

dibandingkan dengan pembakaran bahan bakar fosil saja (Cherubini *et al.*, 2011; Loha *et al.*, 2020).

3. KESIMPULAN

Model numerik pembakaran *non-premixed co-firing* dengan variasi persentase 10, 20, dan 30% tandan kosong kelapa sawit (TKKS) dan batubara pada tungku *Drop tube furnace* (DTF) menggunakan *Computational fluid dynamic* (CFD) dapat memprediksi dan analisis temperatur dan gas emisi pembakaran. Simulasi pembakaran menunjukkan persamaan dengan percobaan pembakaran di *Drop tube furnace* (DTF) dan menunjukkan bahwa semakin tinggi persentase tandan kosong kelapa sawit (TKKS) membuat temperatur meningkat. Emisi atau polutan gas hasil pembakaran dapat diprediksi dengan simulasi pembakaran ini, di mana terjadi penurunan kadar CO₂ pada pembakaran *co-firing* dibanding dengan pembakaran batubara dan semakin tinggi persentase biomassa semakin menurun kadar CO₂. Studi ini menyajikan hasil analisis pembakaran *co-firing* campuran batubara dan TKKS yang dapat digunakan rekomendasi awal sebelum dalam penggunaan bahan bakar padat pada PLTU.

NOMENKLATUR

- $I_{b\lambda}$: intensitas benda hitam (W m⁻²)
- x, y : koordinat kartesian (mm)
- d : diameter partikel (m)
- h_j^0 : entalpi species j (Jol mol⁻¹)
- f_{V0} : fraksi volatil berikutnya pada awal reaksi
- \vec{g} : gravitasi (m s⁻²)
- h : koefisien perpindahan panas (W m⁻² K⁻¹)
- k : laju kinetik (s⁻¹)
- Y_j : fraksi massa lokal dari spesies ke-j (kg)
- m : masa (kg)
- $f_{w,0}$: fraksi massa bahan penguapan/pendidihan (kg)
- Nu : bilangan Nusselts (cp μ K⁻¹)
- Pr : bilangan Prandtl ($v \alpha^{-1}$)
- P : tekanan
- R_j : laju pembentukan spesies j per satuan volume (mol dm⁻³ s⁻¹)
- Re : bilangan Reynolds ($Re = V D v^{-1}$)
- C_p : kapasitas panas spesifik (J kg⁻¹ K⁻¹)
- T : temperatur (C)
- k : konduktifitas termal (Wm⁻¹ K⁻¹)
- t : waktu (s)
- K : energi kinetik turbulensi (m² s⁻²)
- D_t : difusivitas massa turbulen (m² s⁻²)
- K_t : konduktivitas termal turbulen (W m⁻¹ K⁻¹)
- R : konstanta *gas universal*, R = 8.314472 (J K⁻¹ mol⁻¹)
- u, v : komponen kecepatan dalam arah X dan Y (m s⁻¹)

Simbol

- ρ : densitas (kg m⁻³)
- ϵ : laju disipasi energi kinetik turbulen (m² s⁻³)
- μ : viskositas dinamis (Pa s)
- ν : viskositas kinematika (m² s⁻¹)
- σ_D : koefisien dispersi Prandtl
- α_m : difusivitas termal

β : koefisien ekspansi termal (K⁻¹)
 σ_T : difusivitas termal turbulen (m² s⁻¹)
 λ : panjang gelombang (mm)

PERSANTUNAN

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Pusat Riset Konversi dan Konservasi Energi (PRKKE), Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) yang telah memfasilitasi dalam penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Akbari, S., Farmahini Farahani, M., Sadeghi, S., Hajivand, M., Xu, F., Mohtarami, E., & Bidabadi, M. (2021). Pulsating diffusion flames fed with biomass particles in counter-flow arrangement: Zeldovich and Lewis numbers effects. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 46, 101263. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101263>
- Barzak, C. (2011). The Closing Window. In *New Labor Forum (Sage Publications Inc.)* (Vol. 20, Issue 2). <http://10.0.16.83/NLF.202.0000015%0Ahttp://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=a9h&AN=61439533&site=ehost-live&scope=site>
- Cherubini, F., Peters, G. P., Berntsen, T., Strømman, A. H., & Hertwich, E. (2011). CO₂ emissions from biomass combustion for bioenergy: atmospheric decay and contribution to global warming. *GCB Bioenergy*, 3(5), 413–426. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1757-1707.2011.01102.x>
- Choo, H., Won, J., & Burns, S. E. (2021). Thermal conductivity of dry fly ashes with various carbon and biomass contents. *Waste Management*, 135, 122–129. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.08.033>
- Darmawan, A., Budianto, D., Ajiwibowo, M. W., Aziz, M., & Tokimatsu, K. (2018). Coal co-firing with hydrothermally-treated empty fruit bunch using computational fluid dynamics. *Chemical Engineering Transactions*, 70(August), 2101–2106. <https://doi.org/10.3303/CET1870351>
- Demirbas, A. (2004). Combustion characteristics of different biomass fuels. *Progress in Energy and Combustion Science*, 30(2), 219–230. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.peccs.2003.10.004>
- Dewangan, S. K., Naik, M. P. K., & Deshmukh, V. (2020). Parametric Study Of The Non-Premixed Coal Combustion In Furnace For Heat Transfer And Emission Characteristics. *Journal of Thermal Engineering*, 6(6), 323–353. <https://doi.org/10.18186/THERMAL.833556>
- Dong, L. L., Zhao, W. L., & Xing, N. N. (2014). Analysis of Pulverized Coal Combustion in Precalciner Based on Fluent Software. *Advanced Design and Manufacturing Technology IV*, 635, 40–43. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.635-637.40>
- Echekki, T., & Mastorakos, E. (2011). Turbulent combustion: Concepts, governing equations and modeling strategies. *Fluid Mechanics and Its Applications*, 95, 19–39. https://doi.org/10.1007/978-94-007-0412-1_2
- Ettouati, H., Boutoub, A., Benticha, H., & Sassi, M. (2007). Radiative heat transfer in pulverized coal combustion: Effects of gas and particles distributions. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 31(6), 345–353. https://www.researchgate.net/publication/237397379_Radiative_Heat_Transfer_in_Pulverized_Coal_Combustion_Effects_of_Gas_and_Particles_Distributions
- Glushkov, D. O., Nyashina, G. S., Anand, R., & Strizhak, P. A. (2021). Composition of gas produced from the direct combustion and pyrolysis of biomass. *Process Safety and Environmental Protection*, 156, 43–56. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.09.039>
- Goodarzi, M., Safaei, M. R., Oztop, H. F., Karimipour, A., Sadeghinezhad, E., Dahari, M., Kazi, S. N., & Jomhari, N. (2014). Numerical Study of Entropy Generation due to Coupled Laminar and Turbulent Mixed Convection and Thermal Radiation in an Enclosure Filled with a Semitransparent Medium. *The Scientific World Journal*, 2014, 761745. <https://doi.org/10.1155/2014/761745>
- Hariana, Karuana, F., Prabowo, Hilmawan, E., Darmawan, A., & Aziz, M. (2022). Effects of Different Coals for Co-Combustion with Palm Oil Waste on Slagging and Fouling Aspects. *Combustion Science and Technology*, 00(00), 1–23. <https://doi.org/10.1080/00102202.2022.2152684>
- Hariana, Prismantoko, A., Prabowo, Hilmawan, E., Darmawan, A., & Aziz, M. (2023). Effectiveness of different additives on slagging and fouling tendencies of blended coal. *Journal of the Energy Institute*, 107(November 2022), 101192. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2023.101192>
- Hariana, Putra, H. P., Prabowo, Hilmawan, E., Darmawan, A., Mochida, K., & Aziz, M. (2023). Theoretical and experimental investigation of ash-related problems during coal co-firing with different types of biomass in a pulverized coal-fired boiler. *Energy*, 269(November 2022), 126784. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.126784>
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. (2021). *Rencana Co-Firing pada PLTU*. 12–13. <https://www.esdm.go.id/assets/media/content/content-rencana-co-firing-pada-pltu.pdf>
- Li, Z. Q., Wei, F., & Jin, Y. (2003). Numerical simulation of pulverized coal combustion and NO formation. *Chemical Engineering Science*, 58(23), 5161–5171. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ces.2003.08.012>
- Loha, C., Chattopadhyay, H., Chatterjee, P. K., & Majumdar, G. (2020). Co-Firing of Biomass to Reduce CO₂ Emission. In S. Hashmi & I. A. Choudhury (Eds.),

- Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials* (pp. 385–394). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.11006-9>
- Madejski, P. (2018). Numerical study of a large-scale pulverized coal-fired boiler operation using CFD modeling based on the probability density function method. *Applied Thermal Engineering*, 145, 352–363. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.09.004>
- Matveeva, A. G., Patrakov, Y. F., Sechin, A. I., Plyusnin, P. E., Kuznetsov, A. V., Podgorbunskikh, E. M., Bukhtoyarov, V. A., Bychkov, A. L., Lomovsky, I. O., & Lomovsky, O. I. (2023). Co-milling as a synergy factor for co-firing. A case study of wood/coal blends. *Carbon Resources Conversion*, 6(1), 51–57. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.crcon.2022.11.011>
- Naik, M. P. K., & Dewangan, S. K. (2017). CFD modeling of non-premixed combustion of pulverized coal in a furnace. *Computational Thermal Sciences: An International Journal*. <https://doi.org/10.1615/ComputThermalScien.2017019027>
- Normann, F., Andersson, K., Leckner, B., & Johnsson, F. (2008). High-temperature reduction of nitrogen oxides in oxy-fuel combustion. *Fuel*, 87(17), 3579–3585. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2008.06.013>
- Paiman, M. E. S., Hamzah, N. S., Idris, S. S., Rahman, N. A., & Ismail, K. (2018). Synergistic Effect of Co-utilization of Coal and Biomass Char: An Overview. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 358(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/358/1/012003>
- Pérez-Jeldres, R., Cornejo, P., Flores, M., Gordon, A., & García, X. (2017). A modeling approach to co-firing biomass/coal blends in pulverized coal utility boilers: Synergistic effects and emissions profiles. *Energy*, 120, 663–674. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.11.116>
- Praevia, M. F., & Widayat, W. (2022). Analisis Pemanfaatan Limbah Tandan Kosong Kelapa Sawit Sebagai Cofiring pada PLTU Batubara. *Jurnal Energi Baru Dan Terbarukan*, 3(1), 28–37. <https://doi.org/10.14710/jebt.2022.13367>
- Qian, F. P., Chyang, C. S., Huang, K. S., & Tso, J. (2011). Combustion and NO emission of high nitrogen content biomass in a pilot-scale vortexing fluidized bed combustor. *Bioresource Technology*, 102(2), 1892–1898. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.08.008>
- Rahmanian, B., Safaei, M. R., Kazi, S. N., Ahmadi, G., Oztop, H. F., & Vafai, K. (2014). Investigation of pollutant reduction by simulation of turbulent non-premixed pulverized coal combustion. *Applied Thermal Engineering*, 73(1), 1222–1235. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.09.016>
- Rahmanian Kooshkaki, B., & Ghazikhani, M. (2009). Effect of steam injection in pulverized coal combustion to reduce pollutants. *The 6th International Chemical Engineering Congress*. <https://profdoc.um.ac.ir/paper-abstract-1013740.html>
- Rao, A., Liu, Y., & Ma, F. (2022). Study of NOx emission for hydrogen enriched compressed natural along with exhaust gas recirculation in spark ignition engine by Zeldovich' mechanism, support vector machine and regression correlation. *Fuel*, 318, 123577. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123577>
- Rao, A., Liu, Y., & Ma, F. (2023). Numerical simulation of nitric oxide (NO) emission for HCNG fueled SI engine by Zeldovich', prompt (HCN) and nitrous oxide (N2O) mechanisms along with the error reduction novel sub-models and their classification through machine learning algorithms. *Fuel*, 333, 126320. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.126320>
- Sahajwalla, V., Eghlimi, A., & Farrell, K. (1997). Numerical simulation of pulverized coal combustion. *CSIRO Division of Minerals, Melbourne, Vic. (Australia)*. <https://www.osti.gov/etdweb/biblio/300871>
- Saleem, M. (2022). Possibility of utilizing agriculture biomass as a renewable and sustainable future energy source. *Heliyon*, 8(2), e08905. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e08905>
- Smoot, L. D., & Baxter, L. L. (2003). Fossil Fuel Power Stations—Coal Utilization. In R. A. Meyers (Ed.), *Encyclopedia of Physical Science and Technology (Third Edition)* (Third Edit, pp. 121–144). Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B0-12-227410-5/00257-X>
- Stöllinger, M., Naud, B., Roekaerts, D., Beishuizen, N., & Heinz, S. (2013). PDF modeling and simulations of pulverized coal combustion – Part 2: Application. *Combustion and Flame*, 160(2), 396–410. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2012.10.011>
- Sun, W., Zhong, W., & Echehki, T. (2019). Large eddy simulation of non-premixed pulverized coal combustion in corner-fired furnace for various excess air ratios. *Applied Mathematical Modelling*, 74(x), 694–707. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2019.05.017>
- Triani, M., Tanbar, F., Cahyo, N., Sitanggang, R., Sumiarsa, D., & Lara Utama, G. (2022). The Potential Implementation of Biomass Co-firing with Coal in Power Plant on Emission and Economic Aspects: A Review. *EKSAKTA: Journal of Sciences and Data Analysis*, 3(2), 83–94. <https://doi.org/10.20885/eksakta.vol3.iss2.art4>
- Trinh, V. T., Jeong, T.-Y., Lee, B.-H., & Jeon, C.-H. (2021). Comparative Study of the Synergistic Effects of Blending Raw/Torrefied Biomass and Vietnamese Anthracite Using Co-pyrolysis. *ACS Omega*, 6(43),

- 29171–29183. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c04610>
- Tumuluru, J. S., Hess, J. R., Boardman, R. D., Wright, C. T., & Westover, T. L. (2012). Formulation, Pretreatment, and Densification Options to Improve Biomass Specifications for Co-Firing High Percentages with Coal. *Industrial Biotechnology*, 8(3), 113–132. <https://doi.org/10.1089/ind.2012.0004>
- Variny, M., Varga, A., Rimár, M., Janošovský, J., Kizek, J., Lukáč, L., Jablonský, G., & Mierka, O. (2021). Advances in Biomass Co-Combustion with Fossil Fuels in the European Context: A Review. *Processes*, 9(1). <https://doi.org/10.3390/pr9010100>
- Wu, R., Beutler, J., & Baxter, L. L. (2023). Biomass char gasification kinetic rates compared to data, including ash effects. *Energy*, 266, 126392. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.126392>
- Yan, B., Cheng, Y., Jin, Y., & Guo, C. Y. (2012). Analysis of particle heating and devolatilization during rapid coal pyrolysis in a thermal plasma reactor. *Fuel Processing Technology*, 100, 1–10. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2012.02.009>
- Yang, B., Wei, Y.-M., Hou, Y., Li, H., & Wang, P. (2019). Life cycle environmental impact assessment of fuel mix-based biomass co-firing plants with CO₂ capture and storage. *Applied Energy*, 252, 113483. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113483>
- Yang, B., Wei, Y.-M., Liu, L.-C., Hou, Y.-B., Zhang, K., Yang, L., & Feng, Y. (2021). Life cycle cost assessment of biomass co-firing power plants with CO₂ capture and storage considering multiple incentives. *Energy Economics*, 96, 105173. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.eneco.2021.105173>
- Zhao, N., Li, B., Ahmad, R., Ding, F., Zhou, Y., Li, G., Zayan, A. M. I., & Dong, R. (2021). Dynamic relationships between real-time fuel moisture content and combustion-emission-performance characteristics of wood pellets in a top-lit updraft cookstove. *Case Studies in Thermal Engineering*, 28, 101484. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101484>
- Zheng, J., Liu, B., & Liu, B. (2023). Simulation of Pulverized Coal Combustion Process Considering Turbulence-Radiation Interaction. *ACS Omega*. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c00115>
- Zhu, B., Shang, B., Guo, X., Wu, C., Chen, X., & Zhao, L. (2023). Study on Combustion Characteristics and NO_x Formation in 600 MW Coal-Fired Boiler Based on Numerical Simulation. *Energies*, 16(1). <https://doi.org/10.3390/en16010262>