

Simulasi *co-combustion* batubara dan biomassa tandan kosong kelapa sawit tertorefaksi (*torrefied biomass*)

Zaenal Arifin^{1*}, Amrul², Muhammad Irsyad³

¹Prodi Magister Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Lampung

^{2,3}Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Lampung

Jl. Prof. Sumantri Brojonegoro No.1 Bandar Lampung 35145, Lampung, Indonesia

*Corresponding author: zaenal.1215021078@students.unila.ac.id

Abstract

Coal is still widely used as the main fuel in the industry, especially the power generation industry (PLTU), cement plants and etc. Coal is a fossil fuel whose availability is thinning and its fires produce CO₂ emissions that cause a rise in greenhouse gas (GHG) concentration. On the other biomass is an alternative energy source that is abundant, including empty bunches of oil palm (TKKS), but has poor combustion properties compared to coal when burned directly. The properties of biomass burning can be improved by certain treatment, one of which is through the process of torrefaction. Biomass torrefaction has a calorific value equivalent to sub-bituminous coal B, so it has the potential to be used as an alternative fuel for coal. The purpose of this study was to determine the maximum temperature that occurs in the burner. In this study co-combustion was conducted on simulation of ANSYS program with powder system (pulverized combustion) because this type in recent decades is widely used in industry. In this study conducted a simulation on ANSYS to determine the temperature on the burner and the concentration of emissions produced. The results showed that the simulation of co-combustion burner burner showed the maximum temperature reached 970°C. The effect of burner and burner temperature in the form of swirl provides sufficient oxygen with more perfect combustion resulting in decreased concentration of CO₂ emissions and low concentration of N₂ due to higher nozzle temperature. High temperatures lower the concentration of SO₂ in the burn chamber.

Keyword: *Co-combustion, pulverized co-combustion simulation, TKKS torrefaction, burner.*

Abstrak

Batubara hingga saat ini masih banyak digunakan sebagai bahan bakar utama di industri, khususnya industri pembangkit listrik (PLTU), pabrik semen dan lain sebagainya. Batubara merupakan bahan bakar fosil yang ketersediannya semakin menipis dan pembakarannya menghasilkan emisi CO₂ yang menyebabkan naiknya konsentrasi gas rumah kaca (GRK). Disisi lain biomassa adalah sumber energi alternatif yang jumlahnya melimpah, di antaranya adalah tandan kosong kelapa sawit (TKKS), namun memiliki sifat pembakaran yang buruk dibandingkan dengan batubara apabila dibakar secara langsung. Sifat-sifat pembakaran biomassa bisa diperbaiki dengan cara *treatment* tertentu, salah satunya adalah melalui proses torefaksi. Biomassa tertorefaksi mempunyai nilai kalor yang setara dengan batubara sub-bituminus B, sehingga berpotensi dijadikan sebagai bahan bakar alternatif pengganti batubara. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui temperatur maksimum yang terjadi pada burner. Dalam penelitian ini *Co-combustion* dilakukan pada simulasi program ANSYS dengan sistem serbuk (*pulverized combustion*) karena jenis ini dalam beberapa dekade terakhir banyak digunakan di industri. Pada penelitian ini melakukan simulasi pada ANSYS untuk menentukan temperatur pada *burner* dan konsentrasi emisi yang dihasilkan. Hasil menunjukkan simulasi *co-combustion burner burner* menunjukkan temperatur maksimum mencapai 970 °C. Pengaruh temperatur *burner* dan *burner* yang berbentuk swirl memberikan oksigen yang cukup dengan

pembakaran lebih sempurna sehingga menurunkan konsentrasi emisi CO₂ dan rendahnya konsentrasi N₂ dikarenakan dari *nozzle* yang temperaturnya lebih tinggi. Temperatur yang tinggi menurunkan konsentrasi SO₂ pada ruang bakar.

Kata Kunci: *Co-combustion, pulverized co-combustion simulation, TKKS tertorefaksi, burner.*

Pendahuluan

Energi merupakan salah satu kebutuhan utama pada saat ini terutama pada sektor rumah tangga, transportasi dan industri yang semakin meluas. Kebutuhan energi saat ini masih didominasi dengan sumber daya energi fosil, baik minyak bumi, batu bara, maupun gas. Sebagai energi tak terbarukan jika digunakan terus menerus ketersediaan energi fosil suatu saat akan habis.

Batubara merupakan peran utama dalam pemasokan sumber energi terutama pada sektor industri. Pembangkit listrik berbahan bakar batubara masih menduduki 41% produksi listrik dan diperkirakan akan mencapai 44% pada tahun 2030 [1]. Penggunaan batubara sebagai sumber pembangkit energi memiliki permasalahan yaitu meningkatnya gas rumah kaca (GRK), terutama karbon dioksida (CO₂), yang secara langsung terkait dengan pemanasan global. Perlunya sumber energi alternative yang ramah lingkungan salah satunya energi biomasa. Biomassa memiliki karakteristik karbon netral yang ramah lingkungan, karena produk utama karbondioksida telah dibebaskan selama proses pembakaran sebab berasal dari fotosintesis tanaman [2].

Indonesia merupakan negara agraris, ketersediaan biomasa yang sangat melimpah sehingga berpotensi sangat besar dalam hal energi biomasa. Jika biomasa digunakan sebagai sumber energi, biomasa memiliki beberapa keunggulan diantaranya dapat diperbarui (*renewable*) maka tergolong energi yang berkesinambungan [3]. Permasalahan dalam pemanfaatan biomasa sebagai sumber energi pada ketersediaan biomasa yang tersebar luas. Sehingga perlu pengumpulan yang mengakibatkan menambahnya biaya operasional. Pabrik kelapa sawit merupakan sumber limbah biomasa yang potensial, karena limbah yang

dihasilkan telah terkumpul. Pabrik kelapa sawit memiliki limbah seperti tandan kosong kelapa sawit yang selama ini belum dimanfaatkan secara maksimal. Di sisi lain Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) memiliki kandungan air yang sangat tinggi sekitar 60-65%, mengandung potasium (K) mencapai 2,4%, selain itu juga diketahui mengandung klorin (Cl). Efek korosi akan meningkat dengan meningkatnya kandungan Cl, dan unsur potasium dapat berperan dalam pembentukan deposit pada *superheater* yang dapat mengganggu proses perpindahan panas di tungku bakar [4].

Sehingga dalam pemanfaatan biomasa perlu adanya *pre-treatment* untuk meningkatkan nilai kalor dan menurunkan kadar air, agar menghasilkan bahan bakar padat dengan karakteristik yang baik mendekati karakteristik batubara dalam hal nilai kalor. Salah satu *pre-treatment* yang dapat menghasilkan bahan bakar padat berkalori tinggi adalah proses torefaksi. Proses torefaksi didefinisikan sebagai perlakuan thermal dalam kondisi ringan, yaitu suhu antara 200-300 °C.

Berbagai hasil penelitian torefaksi lanjut terhadap campuran sampah kota menunjukkan nilai kalor yang tinggi setara dengan batubara sub-bituminus B, 5200-5800 kcal/kg [5]. Biomasa sampah kota yang dilakukan proses torefaksi pada temperatur 275 °C dan waktu tinggal 30 menit pada reaktor kontinu tipe tubular menunjukkan nilai kalor yang cukup tinggi yaitu 5425 kcal/kg [6]. Briket tandan kosong sawit (TKKS) sebesar 5914,81 kcal/gr.

Upaya untuk mengurangi penggunaan bahan bakar fosil dan mencegah peningkatan emisi gas rumah kaca (GRK), maka perlu pemanfaatan biomasa TKKS sebagai energi baru dan terbarukan untuk kelanjutan ekosistem lingkungan. Untuk itu, pembakaran bersama (*co-combustion*)

melalui simulasi dengan bantuan *software* ANSYS antara campuran batubara dan torefaksi biomasa TKKS dapat menyelesaikan permasalahan di atas.

Tinjauan Teoritis

Deskripsi singkat *co-combustion*

Co-combustion adalah proses pembakaran dua jenis bahan bakar berbeda dalam proses pembakaran yang sama, seringkali dioperasikan dalam ketel pembangkit uap. Dalam pengertian sederhana, pembakaran *co-combustion* dari batubara dengan biomassa dapat dipandang sebagai bagian dari sistem yang melengkapi perangkat *boiler* berbahan bakar batubara [7]. Biomassa memiliki karakteristik karbon netral yang ramah lingkungan, karena produk utama karbon dioksida telah dibebaskan selama proses pembakaran sebab berasal dari fotosintesis tanaman [2]. Namun, dibandingkan dengan pembakaran batubara, kerugian dari pembakaran biomassa adalah nilai kalori yang rendah, sehingga merusak tungku dan mengakibatkan *slagging* [8]. Akan tetapi, biomassa sebagai pembakaran-improver jika dicampur dengan batubara untuk menurunkan suhu pembakaran dan meningkatkan daya bakar [9].

Selain itu, transisi ini terutama disebabkan oleh menipisnya bahan bakar fosil dan masalah lingkungan seperti emisi gas rumah kaca (GRK) dan pelepasan unsur-unsur yang berpotensi beracun melalui gas buang selama pembakaran batu bara. Unsur-unsur yang berpotensi beracun adalah elemen logam apa pun (As, Ba, Bi, Cd, Cr, Cu, Ga, Ni, Pb, Sb, Sn, Zn, dll.) memiliki potensi untuk menyebabkan bahaya kesehatan yang parah jika hadir dalam konsentrasi yang berlebihan. Apalagi emisinya di lingkungan adalah masalah perhatian utama saat ini [10].

Upaya untuk meningkatkan kualitas dari biomasa terus ditingkatkan, torefaksi merupakan salah satu metode yang bisa dilakukan. Proses dekomposisi termal terdiri dari tahapan yang berbeda tergantung pada suhu pembakaran. Tahap dehidrasi (25–135

°C), tahap pelepasan komponen pembakaran dan volatil (200-500 °C), tahap oksidasi dan kelelahan (500-800 °C) [11].

Sung et al. [12] menemukan bahwa *co-combustion* jelas mengurangi pelepasan SO₂ karena rendahnya kandungan S dan N di biomassa pada suhu tinggi. Hu et al. [13] mengungkapkan bahwa penurunan emisi SO selama *co-combustion* juga bisa disebabkan oleh efek penangkapan oleh logam alkali dan alkali tanah dari biomassa melalui reaksi sulfasi. Peng Wang, dkk., [14] melihat karakteristik pembakaran *co-combustion* menggunakan sampel cangkang inti sawit (PKS) sebagai biochar dan Yangquan batubara antrasit (YQ). Karakteristik pembakaran Bersama dan perilaku kinetik batubara bubuk dan campuran biochar diselidiki dengan analisis termogravimetri. Karakteristik fisik dan kimia YQ dan PKS dipelajari secara sistematis untuk mengeksplorasi perbedaan reaktivitas pembakaran antara YQ dan PKS. Dari beberapa penelitian *co-combustion* batubara dan biomassa TKKS tertorefaksi belum ada yang menggunakan dan memberikan informasi mengenai emisi yang ditimbulkan. Adapun yang memberikan informasi mengenai emisi *co-combustion* biomasa yang digunakan bukan menggunakan TKKS tertorefaksi, seperti yang dilakukan Zeyu dkk [15], biomasa yang digunakan adalah jerami gandum.

Metode Penelitian

A. Pemodelan

Metode *co-combustion* yang akan dilakukan dengan konsep NO_x *reduction Burner* dimana pengurangan NO_x berpengaruh pada reaksi reduksi dalam api. Penerapan ini menggunakan *Swirl* NO_x tipe HT-NR3 yang saat ini banyak diterapkan pada boiler berbahan bakar batubara. Pembakaran *Swirl* NO_x tunggal telah dilakukan oleh Zhou, dkk. [16] untuk mengevaluasi pembakaran batubara dan mengurangi kinerja emisi NO_x yang dihasilkan.

Penelitian yang akan dilakukan dengan mengkombinasi biomassa TKKS

terrefaksi sebagai bahan bakar tambahan. Pemodelan yang dilakukan memiliki geometri yang lebih kecil dengan diameter dalam pipa 20 cm dan panjang 60 cm yang dapat dilihat pada Gambar 1. Pemodelan geometri menggunakan inventor 2019 dan pada simulasi pembakaran *co-combustion* menggunakan *software ANSYS* berlisensi dengan penentuan jumlah *grind* dan *node meshing* yang dapat dilihat pada Gambar 2. Perhitungan iterasi menggunakan FLUENT. Simulasi menggunakan dimensi 2D dengan perpotongan di tengah kolom. Parameter yang diterapkan seperti kondisi batas, kondisi batas (*boundary condition*) pada simulasi digunakan untuk mendefinisikan bagian-bagian dari geometri pemodelan untuk pembacaan saat *render* di *fluent*.



(a)



(b)

Gambar 1. Sekematik *combustor chamber* (a) *Burner Nozzle*; (b) *combustor Burner*



Gambar 2. Mesh ruang bakar

Pada simulasi diperlukan kondisi batas (*boundary condition*) dengan tujuan untuk mendefinisikan bagian-bagian dari geometri model untuk pembacaan pada saat *running* di *fluent*. Kondisi batas pada

simulasi ini dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Kondisi batas

Parameter	Inlet	Outlet	Wall
Velocity [m/s]	15.24	-	-
Mass flow rate of COAL [kg/s]	0.15	-	-
Mass flow rate of TKKS [kg/s]	0.155	-	-
Temperatur [°C]	800	-	-

B. Pembuatan unit *co-combustion*

1. Pengukuran Data Putaran (RPM) Motor Listrik

Tabel 2. Pengukuran data putaran (rpm) motor listrik

No	Mesh	Frekuensi inverter	rpm
1	200	15	250
2	200	30	332
3	200	40	372

2. Perhitungan *Screw Feeder*

a. Perhitungan secara teoritik

$$Q = \frac{60 \cdot \pi \cdot D^2 \cdot S \cdot n \cdot \psi \cdot \rho \cdot C}{4}$$

b. Perhitungan secara aktual

Pengukuran laju massa batubara dihitung dengan alat bantu berupa *stopwatch* dan timbangan. Langkah pertama memasukkan batubara ke dalam *hopper*, setelah itu mengatur frekuensi kecepatan putaran motor yang diinginkan (15, 20, dan 25 Hz) pada *inverter*, kemudian menampung batubara ke dalam timbangan bersamaan dengan turunnya batubara dari *screw feeder* dan mencatat waktu yang dibutuhkan untuk 1 kg sampel yang tertampung. Pengulangan dilakukan sebanyak 3 kali setiap frekuensi.

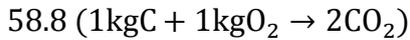
3. Kebutuhan laju udara batubara sub-bituminus

Batubara sub-bituminus mengandung 58.8% C, 1,3 % N₂, 0,7 % O₂ dan 0,7 % S. Berdasarkan hasil pengukuran dan perhitungan kandungan karbon, sulfur, nitrogen, hidrogen, oksigen dalam batubara antracite maka kebutuhan udara dapat dihitung sebagai berikut:

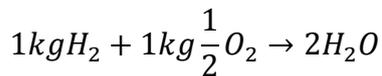
Reaksi pembakaran carbon dengan oksigen adalah:



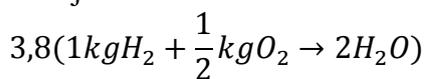
Karena batubara sub-bituminus mengandung 58.8% C maka persamaan reaksi di atas menjadi:



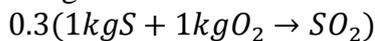
Reaksi pembakaran hidrogen dengan oksigen adalah



Kandungan hidrogen dalam batubara sub-bituminus adalah 3,8 %, maka persamaan reaksi menjadi:



Reaksi pembakaran antara sulfur dengan oksigen adalah:

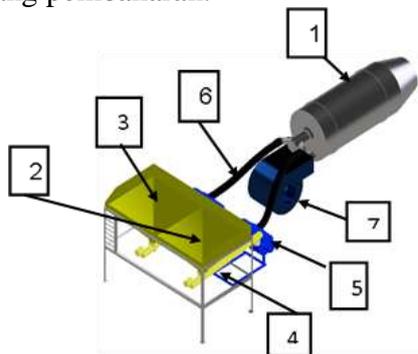


4. Pengukuran laju massa udara pembakaran (m udara)

Pengukuran laju udara yang berasal dari *air blower* dapat diketahui dengan menggunakan persamaan dengan nilai V_b didapat dari hasil pengukuran kecepatan udara menggunakan alat ukur Anemometer.

C. Pekerjaan eksperimetal

1. Alat dan prosedur percobaan
Percobaan dilakukan dengan metode *pulverized co-combustion burner* skala laboratorium. Sistem pengumpanan menggunakan *screw conveyor* yang di umpankan ke blower untuk di tembakan keruang pembakaran.



Gambar 3. Sekema unit *co-combustion* dalam penelitian ini. (1) burner (2) hopper biomassa (3) hopper batubara (4) screw conveyor (5) blower (6) selang (7) blower (secondary air).

Hasil dan Pembahasan

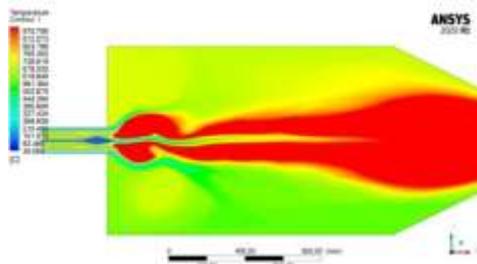
Co-combustion atau pembakaran bersama merupakan salah satu pilihan yang potensial untuk memanfaatkan limbah biomassa dan mengurangi penggunaan energi fosil. *Co-combustion* adalah salah satu pilihan yang berpotensi untuk meningkatkan reaktivasi oksidasi logam pada bahan bakar padat. Karena batubara memiliki kandungan karbon tetap yang lebih tinggi dibandingkan dengan biomassa yang mengakibatkan tidak dapat secara efektif terjadinya reaksi kimia oksidasi logam. Selain itu, dengan pembakaran bersama batubara dan biomassa, akan meningkatkan *flash point* sehingga mengurangi energi aktivasi yang dibutuhkan untuk reaksi pembakaran [17].

Guo dan Zhong [18] melakukan percobaan pembakaran bersama dan membuktikan bahwa biomassa dapat meningkatkan properti pengapian dan mempromosikan reaksi pembakaran batubara. *Co-combustion* dilaporkan secara signifikan mengurangi pelepasan baik NO_x maupun SO_x di pembangkit *pulverized* batubara yang sudah ada. Sung et al. [12] menemukan bahwa *Co-combustion* jelas mengurangi pelepasan SO_2 karena rendahnya kandungan S dan N di biomassa pada suhu tinggi. Hu et al. [19] mengungkapkan bahwa penurunan Emisi SO_2 selama *co-combustion* juga bisa disebabkan efek terikatnya emisi SO_2 oleh logam alkali dan alkali tanah dari biomassa melalui reaksi sulfasi.

Dari beberapa referensi yang telah dilakukan belum adanya informasi mengenai *co-combustion* batubara dan biomassa TKKS tertorefaksi. Sehingga dilakukan penelitian *co-combustion* batubara dan biomassa TKKS tertorefaksi, dengan melihat emisi yang ditimbulkan dari kedua pembakaran bersama material tersebut. Dengan menggunakan bantuan *software Autodesk Inventor* dan *Ansys* sehingga dapat mempermudah melihat data-data yang diperlukan. Simulasi menggunakan dimensi 2D dengan perpotongan di tengah kolom.

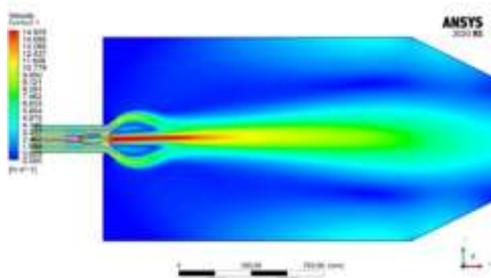
Gambar 4 merupakan gambar

distribusi temperatur pada simulasi yang dilakukan. Kontur berwarna merah menunjukkan tingkat temperatur paling panas pada *burner*. Terjadinya distribusi paling panas mendekati ujung *burner* karena disebabkan bentuk *burner* yang mengerucut dan pada ujung *nozzle*, serta bagian tengah lebih rendah karena sistem dari *nozzle* yang berbentuk *swirl*. Temperatur maksimum dari *burner* mencapai 970,758 °C. Hal ini memungkinkan untuk melakukan eksperimen dengan temperatur *burner* sampai 1000°C sesuai dengan desain eksperimen.



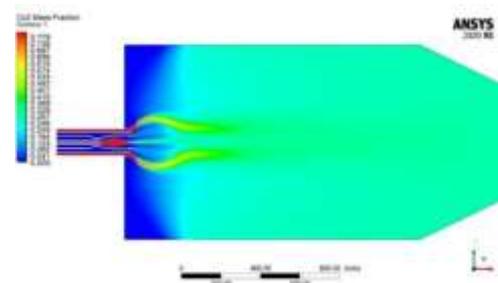
Gambar 4. Distribusi temperatur

Laju aliran dapat dilihat pada Gambar 5. Gambar tersebut merupakan bagian *combustor* yang memberikan informasi mengenai kontur dan distribusi radial kecepatan aksial gas buang di ruang bakar. Jika dilihat dari kontur warna menunjukkan tekanan tertinggi pada *Nozzle outlet*. Untuk *burner* rendah NO_x, zona resirkulasi pada tahap awal pembakaran batubara dan gas buang panas yang disirkulasi ulang dengan cepat dapat memanaskan partikel batubara dan TKKS. Hal ini berkontribusi pada daerah dinding dengan suhu gas tinggi dan konsentrasi oksigen rendah, yang membantu penyalaan cepat partikel batubara bubuk dan pengurangan pembakaran NO_x.



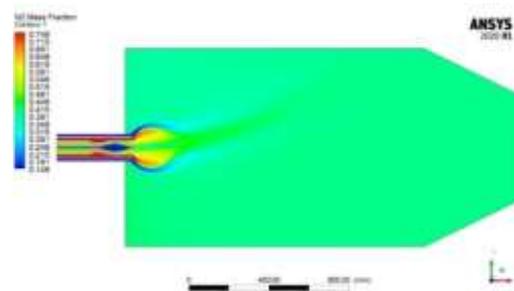
Gambar 5. Laju aliran *Co-combustion*
Konsentrasi CO₂ gas buang di ruang

bakar ditunjukkan pada Gambar 6. Gambar tersebut mengilustrasikan konsentrasi CO₂ di ruang bakar pada *combustor*. Jika dilihat pada gambar konsentrasi CO₂ relatif terdistribusi secara merata sehingga akan memberikan efek pembakaran yang lebih sempurna. Selain itu konsentrasi terbentuk pada *outlet nozzle* dapat mempercepat terjadinya pembakaran sempurna di ruang bakar. Dari kontur Gambar 6 terlihat bahwa *mass fraction* CO₂ paling besar ada pada kondisi *outlet nozzle* yang ditandai dengan warna kuning.



Gambar 6. Konsentrasi CO₂

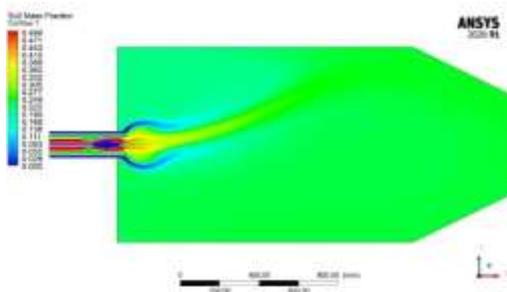
Konsentrasi N₂ gas buang di ruang bakar dapat dilihat pada Gambar 7. Konsentrasi N₂ tertinggi terbentuk pada *outlet nozzle burner* yang ditandai dengan warna *orange* kekuningan dan berwarna hijau seiring dengan menjauhnya dari *outlet nozzle*. Kontur warna hijau menunjukkan rendahnya konsentrasi N₂ hal ini dikarenakan menjauh dari *nozzle* yang temperturnya lebih tinggi.



Gambar 7. Konsentrasi NO₂

Konsentrasi sulfur dioksida (SO₂) gas buang di ruang bakar termasuk ke dalam kelompok sulfur oxide (SO_x). Sebagian besar SO₂ terbentuk dari hasil pembakaran bahan bakar fosil, terutama batubara. Gambar 8 mengilustrasikan kontur konsentrasi SO₂ di ruang bakar atau

combustor. Temperatur yang semakin tinggi akan menurunkan konsentrasi SO₂ di ruang pembakaran.



Gambar 8. Konsentrasi SO₂

Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian simulasi *co-combustion burner* dapat diambil kesimpulan bahwa hasil simulasi pada *burner* menunjukkan temperatur maksimum mencapai 970°C dengan distribusi temperatur paling tinggi di bagian ujung *burner* karena bentuk *burner* yang mengerucut. Pengaruh temperatur *burner* dan *burner* yang berbentuk *swirl* memberikan oksigen yang cukup dengan pembakaran lebih sempurna sehingga penurunan konsentrasi emisi CO₂. Rendahnya konsentrasi N₂ dikarenakan menjauh dari *nozzle* yang temperaturnya lebih tinggi. Temperatur yang tinggi menurunkan konsentrasi SO₂ pada ruang bakar.

Ucapan terimakasih

Diucapkan terimakasih kepada bapak Amrul Hamzah beserta Muhammad Irsyad selaku pembimbing dan juga dari Kementerian RISTEK-DIKTI yang membiayai penelitian ini.

Referensi

- [1] Mehmood, S., Reddy, B. V. and Rosen, M. A. (2012) 'Energy analysis of a biomass co-firing based pulverized coal power generation system', *Sustainability*, 4(4), pp. 462–490. doi:10.3390/su4040462.
- [2] Yildiz, Z., Uzun, H., Ceylan, S., Topcu, Y., 2016. Application of artificial neural networks to co-combustion of hazelnut husk–lignite coal blends. *Bioresour. Technol.* 200, 42–47.
- [3] Hermawati, W., Mahmudi, Maulana, I., Rosaira, I. and Alamsyah, P. (2013) *Sumber daya biomassa: Potensi energi Indonesia yang terabaikan*. Bogor: IPB Press.
- [4] General Guide Biomass, 2010. *The Asian Biomass handbook*. The Japan Institute of energy., 2010.
- [5] Amrul, T. Hardianto, A. Suwono, A.D. Pasek, dan Adrian R.I.(2013): Konversi Bahan Bakar Padat dari Sampah Kota Melalui Torefaksi: Optimasi Temperatur Torefaksi komponennya, Proceedings Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM-XII), 2013, Bandar Lampung, 23-24 Oktober 2013, ISBN: 978-979-8510-61-8.
- [6] Sanjaya, ika. 2018. Karakteristik Bahan Bakar Padat Produk Torefaksi Sampah Biomassa Campuran Pada Reaktor Kontinu Tipe *Tubular*. Bandar Lampung: Universitas Lampung.
- [7] Wijayapala, W. D. A. S. and Mudunkotuwa, S. R. H. (2016). 'Co-firing of biomass with coal in pulverized coal fired boilers at Lakvijaya Power Plant: A case study', *Engineer: Journal of the Institution of Engineers, Sri Lanka*, 49(3), p. 33. doi: 10.4038/engineer.v49i3.7074.
- [8] Mundike et al., 2018. Mundike, J., Collard F.X., Görgens, J.F., 2018. Co-combustion characteristics of coal with invasive alien plant chars prepared by torrefaction or slow pyrolysis. *Fuel*. 225, 62-70.
- [9] Cong et al., (2019). Cong, K., Han, F., Zhang, Y., Li, Q., 2019. The investigation of co-combustion characteristics.
- [10] Lynch D, Low F, Henihan AM, Garcia A, Kwapinski W, Zhang L, et al. *Behavior of heavy metals during fluidized bed combustion of poultry*

- litter. Energy Fuels* 2014;28:5158–66. <http://dx.doi.org/10.1021/ef500981k>.
- [11] He C, Wang K, Yang Y, Wang J. 2014. *Utilization of sewage-sludge-derived hydrochars toward efficient cocombustion with different-rank coals: effects of subcritical water conversion and blending scenarios.* *Energy Fuels* 2014;28:6140–50.
- [12] Sung, Y., Lee, S., Kim, C., Jun, D., Moon, C., Choi, G., Kim, D., 2016. *Synergistic effect of co-firing woody biomass with coal on NO_x reduction and burnout during airstaged combustion. Exp. Therm. Fluid Sci.* 71, 114e125.
- [14] Peng Wang, Guangwei Wang, Jianliang Zhang, Jui-Yuan Lee, Yanjiang Li, Chuan Wang., 2018. *Co-combustion characteristics and kinetic study of anthracite coal and palm kernel shell char.*<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.08.009>.
- [15] Zeyu Xue, Zhaoping Zhong, Xudong Lai., 2019. *Investigation on gaseous pollutants emissions during co-combustion of coal and wheat straw in a fluidized bed combustor.* <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124853>
- [16] Wijono, Agung, 2014. *PLTU Biomasa Tandan Kosong Kelapa Sawit Studi Kelayakan dan Dampak Lingkungan. Balai Rekayasa Disain dan Sistem Teknologi – Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi Gedung 480, Kawasan PUSPIPTEK Serpong, Tangerang Selatan, 15314 Telp. 021-7563213, E-mail: agung.wijono@gmail.com. Simposium Nasional RAPI XIII - 2014 FT UMS.*
- [17] Zhou et al., 2016. *Mechanism analysis on the pulverized coal combustion flame stability and NO_x emission in a swirl burner with deep air staging.* <https://doi.org/10.1016/j.joei.2018.01.0061743-9671/>© 2018 Energy Institute.
- [18] Guo dan Zhong, 2018. *Influence of coal co-firing on the particulate matter formation during pulverized biomass combustion.* <https://doi.org/10.1016/j.joei.2018.05.003>.
- [19] Hu, Z., Wang, X., Wang, Z., Wang, Y., Tan, H., 2014. *Segmented kinetic investigation on condensed KCl sulfation in SO₂/O₂/H₂O at 523e1023 K.* *Energy Fuels* 28, 7560e7568.