

Studi Termodinamika Pembakaran Kombinasi Batu Bara dan Biomassa Limbah

Hendi Riyanto^a, Toto Hardianto^b, Willy Adriansyah^c, Gavriel Y. Jeffry^d

^{a,b,c,d} Kelompok Keahlian Konversi Energi, Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara, Institut Teknologi Bandung, Kota Bandung, 40132
e-mail: hriyanto@office.itb.ac.id, toto@office.itb.ac.id, 132142239@office.itb.ac.id, 13117003@office.itb.ac.id

Kata kunci:

Co-Firing
Batu Bara
Biomassa
Suhu Api Adiabatik
Rasio Udara-Bahan Bakar
Pembakaran Emisi CO₂

ABSTRAK

Pembakaran bersama batubara dan biomassa di pembangkit listrik tenaga batubara yang ada sedang dipertimbangkan sebagai alternatif yang layak untuk transisi pemanfaatan energi yang tidak terbarukan ke terbarukan. Dalam hal ini, berbagai penelitian telah dilakukan dalam dua puluh tahun terakhir, yang sebagian besar kesimpulan umum adalah bahwa efisiensi *boiler* menurun sehubungan dengan peningkatan persentase biomassa dalam *co-firing*, namun studi tambahan dianggap diperlukan, terutama untuk limbah biomassa yang melimpah di Indonesia. Biomassa limbah yang akan digunakan dalam penelitian ini adalah tandan kosong kelapa sawit (TKKS), sekam padi, dan *wood pellet* yang dihasilkan dari serbuk gergaji. Karakteristik termodinamika pembakaran *co-firing* yang akan digunakan dalam penelitian ini adalah *air-to-fuel ratio* (AFR), emisi CO₂ pembakaran, dan temperatur nyala adiabatik. Sebuah *open source Cool Prop* formulasi sifat termodinamika diimplementasikan untuk mengevaluasi sifat termodinamika bahan yang sesuai yang terlibat dalam penelitian ini. Hasil penelitian menunjukkan bahwa AFR menurun dengan bertambahnya komposisi biomassa dalam bahan bakar, dimana laju perubahan masing-masing AFR per persen biomassa adalah -0,018, -0,0406, dan -0,026 untuk campuran batubara-TKKS, batubara-sekam padi, dan batubara-kayu. Adapun karakteristik AFR, emisi karbon dioksida menurun dengan meningkatnya persen massa biomassa dalam komposisi bahan bakar. Laju perubahan CO₂ sehubungan dengan persen biomassa dalam komposisi bahan bakar adalah masing-masing -6.3×10^{-3} , -1.12×10^{-2} , dan -6.48×10^{-3} untuk campuran batubara-TKKS, batubara-sekam padi, dan batubara-kayu. Suhu nyala adiabatik juga menurun sehubungan dengan peningkatan persentase massa biomassa dalam komposisi bahan bakar. Laju perubahan suhu nyala adiabatik dalam K/%biomassa berturut-turut adalah -13,93, -10,70, dan -12,81 untuk campuran TKKS batubara, sekam padi, dan kayu batubara.

Keyword:

Co-Firing
Coal
Biomass
Adiabatic Flame Temperature
Air-To-Fuel Ratio
Combustion Co₂ Emission

ABSTRACT

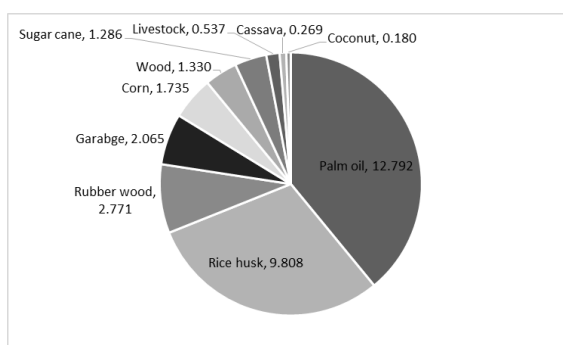
Co-firing of coal and biomass in an existing coal fired power plant is being considered as a viable alternative to transition from non-renewable-to-renewable energy utilization. In this regard, various researches have been conducted in the last twenty years, in most of which the general conclusion is that the boiler efficiency decreases with respect to increasing biomass percentage in co-firing, nonetheless, additional study is deemed to be required, especially for waste biomass which are abundantly available in Indonesia. The waste biomass to be employed in this study are palm empty fruit bunch (EFB), rice husk, and wood pellet produced from sawdust. Co-firing combustion thermodynamic characteristics which are to be deployed in this study are air-to-fuel ratio (AFR), combustion CO₂ emission, and adiabatic flame temperature. An open source CoolProp of thermodynamics properties formulations were implemented in order to evaluate thermodynamic properties of corresponding materials involved in this study. The results of the study show that AFR decreases with increasing biomass composition in the fuel, where the AFR rate of change per percent of biomass are -0.018, -0.0406, and -0.026 for blend of coal-EFB, coal-rice husk, and coal-wood, respectively. As to the AFR characteristic, the emission of carbon dioxide is decreasing with

increasing percent mass of biomass in the fuel composition. The CO_2 rate of change with respect to percent biomass in fuel composition are -6.3×10^{-3} , -1.12×10^{-2} , and -6.48×10^{-3} for the blend of coal-EFB, coal-rice husk, and coal-wood, respectively. The adiabatic flame temperature is also decreasing with respect to increasing biomass mass percentage in fuel composition. The adiabatic flame temperature rate of change in $K/\% \text{biomass}$ are -13.93 , -10.70 , and -12.81 for the blend of coal-EFB, coal-rice husk, and coal-wood, respectively.

1. PENDAHULUAN

Dalam Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2017 tentang Rencana Umum Energi Nasional dicanangkan bahwa Indonesia akan menerapkan penggunaan jenis sumber energi baru dan terbarukan sebesar 23 persen dari keseluruhan penggunaan jenis sumber energi pada akhir 2025, yang segera menjelang. Termasuk dalam kategori jenis energi terbarukan adalah biomassa, terutama biomassa limbah, yang pantas menjadi salah satu opsi penting untuk memenuhi cadangan tersebut. Motivasi utama penggunaan sumber energi terbarukan adalah untuk pengendalian emisi karbon dioksida ke atmosfer bumi.

Penyediaan energi elektrik di Indonesia utamanya masih mengandalkan pembangkit daya pembakaran batu bara (CFPP – *coal-fired power plant*). Untuk itu, metode pembakaran kombinasi batu bara dan biomassa menjadi opsi yang menarik untuk dijajaki dan ditindak. Terutama dalam rangka masa transisi penggunaan sumber energi tak-terbarukan menuju penggunaan sumber energi terbarukan.



GAMBAR 1. Potensi energi biomassa Indonesia dalam GW_{elektrik}

Potensi energi biomassa limbah di Indonesia dalam satuan GW elektrik yang dikompilasi oleh Primadita et al [1] dan kemudian dikutip dan diperlihatkan dalam Gambar 1. Tiga peringkat pertama tentang ketersediaan biomassa di Indonesia adalah energi biomassa yang bersumber dari kelapa sawit, sekam padi, dan kayu karet.

Aneka penelitian fundamental maupun aplikatif mengenai pembakaran kombinasi telah banyak dilakukan semenjak 1990-an. Aziz et al [2] dan Belosevic [3] menerapkan analisis *computational fluid dynamics* (CFD) untuk menyelidiki pembakaran kombinasi batu bara dan biomassa. Mehmood et al [4] melakukan penelitian analitik keenergian mengenai pembakaran kombinasi batu bara (*bituminous and lignite*) dengan biomassa sekam padi, serbuk kayu, kotoran ayam dan *refuse-derived fuel* (RDF). Kazagic et al [5] melakukan penelitian eksperimental tentang pembakaran kombinasi batu bara dan biomassa kayu dengan tujuan untuk mendapatkan karakteristik pembakaran berupa temperatur pembakaran, pasokan udara sekunder, efisiensi pembakaran, serta emisi SO_2 dan NO_x .

Demi melengkapi karakterisasi pembakaran kombinasi bahan bakar batu bara dengan biomassa limbah yang khas Indonesia, dilakukan studi termodinamika tentang karakteristik pembakaran kombinasi yang meliputi parameter-parameter: nisbah udara terhadap bahan bakar (AFR – *air-to-fuel ratio*) sebagai ukuran kebutuhan udara pembakaran, emisi CO_2 produk pembakaran sebagai indikasi emisi gas rumah kaca, dan temperatur nyala adiabatik (*adiabatic flame temperature*) sebagai indikator termal proses pembakaran. Biomassa limbah yang dipertimbangkan dalam studi ini mencakup: tandan kosong (tankos) kelapa sawit, sekam padi, dan pelet kayu yang merupakan tiga besar potensi sumber energi biomassa limbah di Indonesia.

2. METODE PENELITIAN

Studi termodinamika mengenai pembakaran bahan bakar kombinasi batu bara dengan biomassa limbah yang dilakukan di sini akan menerapkan bahan bakar dalam basis kering (d.b. – *dry basis*) dengan alasan bahwa potensi energi pembakaran tertinggi terjadi untuk bahan bakar tunda kandungan air (*moisture*). Karakteristik termodinamika pembakaran yang akan distudi mencakup nisbah udara terhadap bahan bakar (AFR), karbon dioksida sebagai produk pembakaran, dan temperatur nyala adiabatik yang mengindikasikan temperatur pembakaran.

Kandungan unsur-unsur dasar bahan bakar kering meliputi: karbon, hidrogen, nitrogen, sulfur, oksigen dan abu. Reaksi oksidasi cepat (pembakaran) yang melepaskan energi termal adalah reaksi karbon, hidrogen, atau sulfur dengan oksigen. Persamaan (1), persamaan (2), dan persamaan (3) memberikan perumusan reaksi pembakaran sempurna (stoikiometri) untuk unsur karbon, hidrogen, dan sulfur dalam basis massa. Sedangkan unsur nitrogen dan abu (campuran berbagai materi) tidak terlibat dalam reaksi pembakaran sempurna. Pada setiap persamaan tersebut ditunjukkan bahwa untuk setiap pembakaran 1 kg karbon, hidrogen, atau sulfur dibutuhkan, berturut-turut, 8 kg, atau 1 kg oksigen. Produk pembakaran dari 1 kg karbon adalah 3 kg karbon dioksida, dari 1 kg hidrogen adalah 9 kg H₂O, dan dari 1 kg sulfur adalah 2 kg SO₂.



Pasokan oksigen untuk pembakaran lazimnya didapatkan dari udara yang selain mengandung oksigen juga mengandung nitrogen serta uap air untuk kasus udara basah. Untuk setiap penggunaan 1 kg O₂ dibutuhkan $\frac{2897}{32} \times 4,7\%$ kg udara kering.

Parameter pembakaran bahan bakar dan udara dinyatakan dalam nisbah udara terhadap bahan bakar (AFR), yang didefinisikan sebagai nisbah massa udara (m_{udara}) sebagai pemasok oksigen terhadap massa bahan bakar (m_{bb}), dan dirumuskan dalam persamaan (4).

$$AFR = \frac{m_{udara}}{m_{bb}} \quad (4)$$

Pada kenyataan implementasinya, pembakaran bahan bakar dilakukan menggunakan udara eksek (berlebih dari kebutuhan teoritis stoikiometri). Parameter yang menunjukkan penyimpangan pasokan udara dari kebutuhan udara teoritis disimbolkan sebagai huruf Yunani λ (lambda) yang menunjukkan nisbah massa udara pasokan terhadap massa udara teoritis, seperti dirumuskan dalam persamaan (5).

$$\lambda = \frac{m_{udara}}{m_{udara\text{stoikiometri}}} \quad (5)$$

Untuk bahan bakar yang mengandung unsur oksigen, kebutuhan oksigen dari udara akan berkurang mengingat bahwa oksigen yang terkandung tersebut akan berperan serta dalam pemasokan kebutuhan oksigen bagi keberlangsungan proses pembakaran.

Indikator energi termal yang dilepaskan oleh reaksi pembakaran adalah nilai kalor, baik nilai kalor atas (HHV – *higher heating value*) dengan H₂O produk pembakaran berada pada fase cair, atau nilai kalor bawah (LHV – *lower heating value*) dengan H₂O produk pembakaran berada pada fase gas. Dalam studi kali ini, HHV bahan bakar diperoleh dari perhitungan berdasarkan perumusan [6] yang ditampilkan dalam persamaan (6). Unsur-unsur yang terlibat dalam penentuan HHV dalam satuan MJ/kg adalah karbon, hidrogen, sulfur, oksigen nitrogen dan abu yang dikandung oleh bahan bakar.

$$HHV = aC + bH + cS - dO - eN - fA \quad (6)$$

Koefisien-koefisien dalam persamaan (6) adalah $a = 0,3491$, $b = 1,1783$, $c = 0.1005$, $d = 0.1034$, $e = 0,0151$, $f = 0,0211$. Sebagai catatan penting, persamaan (6) shahih jika dan hanya jika dipenuhi batasan-batasan: $0 \leq C \leq 92,25$, $0,43 \leq H \leq 25,25$, $0 \leq O \leq 50$, $0 \leq N \leq 5,6$, $0 \leq S \leq 94,08$, dan $0 \leq A \leq 71,4$ persen massa.

Nilai kalor bawah (LHV) bahan bakar bisa dihitung dari HHV bahan bakar seturut persamaan (7). Dalam hal ini entalpi h_{fg} dari H₂O produk pembakaran dievaluasi pada $T = 298,15$ K (25°C) dan tekanan atmosferik, yaitu sebesar 2440 kJ/kg.

$$LHV = HHV - \frac{m_{H_2O}}{m_{bb}} h_{fg} \quad (7)$$

Temperatur reaksi pembakaran diindikasikan oleh temperatur nyala adiabatik, yaitu temperatur tertinggi yang dicapai oleh reaksi pembakaran pada proses pembakaran adiabatik (tidak ada panas lolos). Temperatur nyala adiabatik, T_{nyala} , diestimasi dengan menggunakan perumusan [7] pada persamaan (8) dengan memasukkan $T_{ambien} = 298,15$ K. Dalam hal ini panas jenis, c_p , adalah panas jenis campuran gas produk pembakaran yang dievaluasi pada T_{nyala} .

$$T_{nyala} = T_{ambien} + \frac{1}{1 + AFR c_p} LHV \quad (8)$$

Dalam melakukan studi termodinamika pembakaran kombinasi batu bara dan biomassa limbah, digunakan data sekunder sifat bahan bakar (analisis proksimat dan analisis *ultimate*). Sifat bahan bakar bahan bakar berbasis a.d.b. (air-dried basis) batu bara dan kayu (pelet) diperoleh dari [8]. Sifat bahan bakar berbasis a.d.b. tandan kosong sawit (tankos) diambil dari penelitian Ninduangdee dan Kuprianov [9]. Sedangkan sifat bahan bakar a.r. (*as-received*) sekam padi dicuplik dari penelitian oleh Anshar et al [10]. Di samping itu, sifat-sifat termodinamika zat diperoleh dari perumusan CoolProp, yang tersedia gratis.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

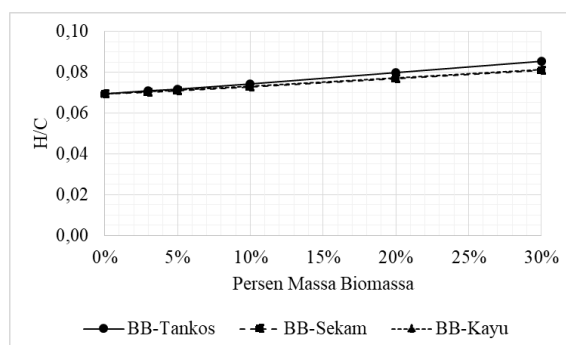
Analisis ultimat berbasis percontoh kering dalam persen massa dari batu bara (BB), tandan kosong (tankos), sekam padi, dan kayu (pelet) ditampilkan pada Tabel 1 yang di dalamnya disertakan HHV dan LHV dari masing-masing bahan bakar yang merupakan hasil perhitungan dengan menggunakan persamaan (6) dan persamaan (7), dan disusuli oleh nisbah udara terhadap bahan bakarnya. Kandungan unsur abu, karbon, hidrogen, nitrogen, sulfur, dan oksigen yang ditampilkan dalam Tabel 1 adalah hasil olahan dari data sekunder.

TABEL 1 Analisis ultimat dalam persen massa, HHV dan LHV dalam MJ/kg untuk batu bara (BB), tankos kering, sekam padi, dan pelet kayu, serta AFR stoikiometri.

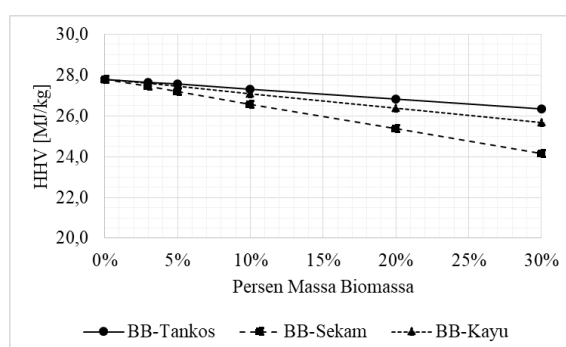
Unsur	BB	Tanko s	Seka m	Kayu
Abu	3,50	5,23	19,11	1,20
Karbon	69,69	52,51	39,28	51,04
Hidrogen	4,83	7,07	5,08	6,11
Nitrogen	1,18	0,51	0,64	0,11
Sulfur	0,10	0,11	0,08	0,01

Oksigen	20,69	34,58	35,81	41,54
HHV	27,80	22,98	15,59	20,69
LHV	26,74	21,43	14,48	19,35
AFR	8,782	6,981	4,722	6.182

Parameter nisbah hidrogen-karbon (H/C) pada bahan bakar lazim dicermati sebagai indikator kecepatan reaksi pembakaran dan emisi karbon dioksida sebagai produk pembakaran. Angka H/C tinggi menandakan kecepatan reaksi yang tinggi. Di samping itu, angka H/C yang tinggi menunjukkan emisi karbon dioksida yang lebih rendah dibandingkan dengan bahan bakar dengan angka H/C rendah. Gambar 2 menampilkan nisbah H/C untuk bahan bakar kombinasi batu bara dengan tankos, sekam, atau kayu: BB-Tankos, BB-Sekam, atau BB-Kayu. Laju kenaikan nisbah H/C per kenaikan persen massa biomassa dalam bahan bakar kombinasi batu bara dengan tankos, sekam, atau kayu adalah $5,32 \times 10^{-4}$, $3,89 \times 10^{-4}$, dan $4,01 \times 10^{-4}$. Angka-angka tersebut menyiratkan bahwa pembakaran kombinasi batu bara dengan tankos bereaksi lebih cepat dibandingkan dengan pembakaran kombinasi batu bara dengan kayu ataupun sekam padi. Nisbah H/C pada bahan bakar kombinasi yang lebih tinggi dibandingkan dengan bahan bakar tunggal batu bara terjadi karena komposisi unsur biomassa yang mengandung hidrogen yang lebih besar dan karbon yang lebih kecil dibandingkan dengan bahan bakar tunggal batu bara.

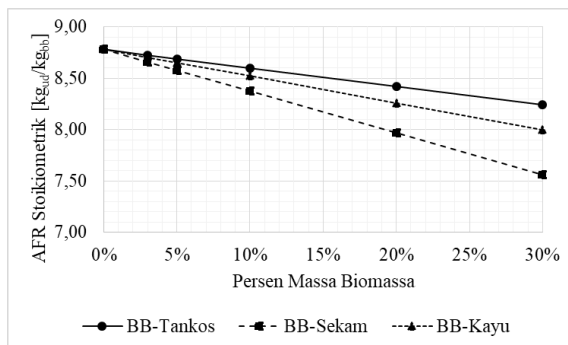


GAMBAR 2 Kenaikan nisbah H/C terhadap persen massa biomassa dalam pembakaran kombinasi.



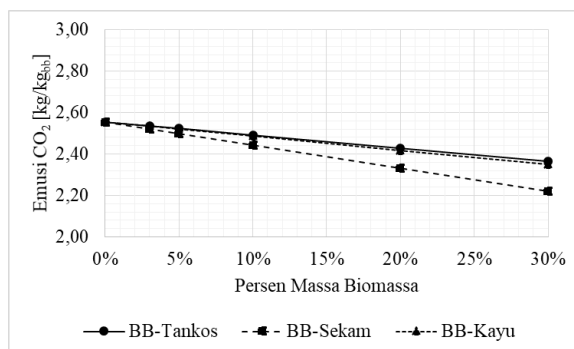
GAMBAR 3 Penurunan HHV terhadap persen massa biomassa dalam pembakaran kombinasi.

Diperlihatkan pada Gambar 3, bahan bakar kombinasi batu bara dengan tankos, sekam, atau kayu menurunkan HHV (ataupun LHV). Hal ini disebabkan oleh karena HHV biomassa, baik tankos, sekam, atau kayu, yang lebih rendah dibandingkan dengan HHV batu bara. Sekam padi memiliki HHV paling rendah di antara dua biomassa yang lain sehingga penurunan HHV bahan bakar kombinasi batu bara dengan sekam menjadi yang paling tajam. Penurunan linier HHV untuk pembakaran kombinasi BB-Tankos, BB-Sekam, dan BB-Kayu adalah $-0,0482$ MJ/kg, $-0,1221$ MJ/kg, dan $-0,0710$ MJ/kg per kenaikan persen massa biomassa.



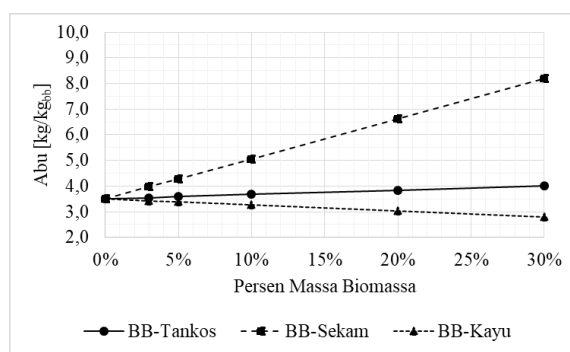
GAMBAR 4 Penurunan AFR stoikiometrik terhadap kenaikan persen massa biomassa dalam pembakaran kombinasi.

Variasi nisbah udara-terhadap bahan bakar (AFR) stoikiometrik dari proses pembakaran kombinasi batu bara dengan tankos, sekam padi, atau kayu disajikan dalam Gambar 4. Penurunan AFR terhadap persen massa biomassa menunjukkan bahwa kandungan hidrogen dalam bahan bakar kombinasi lebih tinggi dari pada dalam bahan bakar tunggal batu bara. Penurunan AFR bahan bakar kombinasi BB-Tankos, BB-Sekam dan BB-Kayu adalah -0,0180, -0,406, dan -0,0260 per kenaikan persen massa biomassa. Laju penurunan AFR terhadap persen massa biomassa terbesar terjadi pada bahan bakar kombinasi batu bara dengan sekam padi.

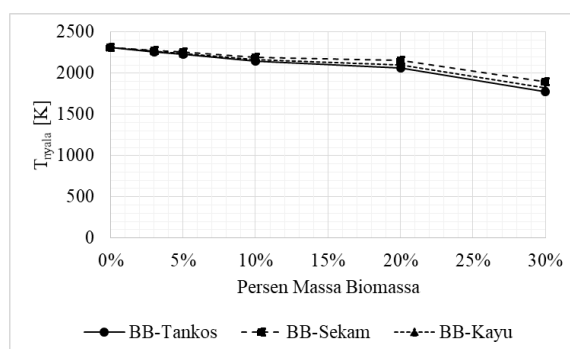


GAMBAR 5. Penurunan emisi massa karbon dioksida per massa bahan bakar terhadap kenaikan persen massa biomassa dalam pembakaran kombinasi.

Emisi CO₂ produk pembakaran dan abu sisa pembakaran untuk pembakaran kombinasi batu bara dengan tankos, sekam padi atau kayu ditunjukkan pada Gambar 5 dan Gambar 6. Pembakaran kombinasi batu bara dengan biomassa sejalasnya menurunkan emisi karbon dioksida dengan laju penurunan: - 6,30x10⁻³, -1,12x10⁻², dan -6,48x10⁻³, masing-masing untuk bahan bakar BB-Tankos, BB-Sekam, dan BB-Kayu. Laju penurunan emisi karbon dioksida terbesar terjadi untuk bahan bakar kombinasi BB-Kayu. Sementara lain, abu sisa pembakaran bahan bakar kombinasi meningkat seiring kenaikan komposisi biomassa, kecuali untuk kayu (pelet). Laju perubahan abu sisa pembakaran terhadap persen massa biomassa adalah 0,0173, 0,1561 dan -0,0230 masing-masing untuk BB-Tankos, BB-Sekam, dan BB-Kayu. Penggunaan sekam padi sebagai bahan bakar pendamping batu bara dalam pembakaran kombinasi menghasilkan peningkatan abu yang paling tajam, dibandingkan dengan penggunaan tankos ataupun kayu.

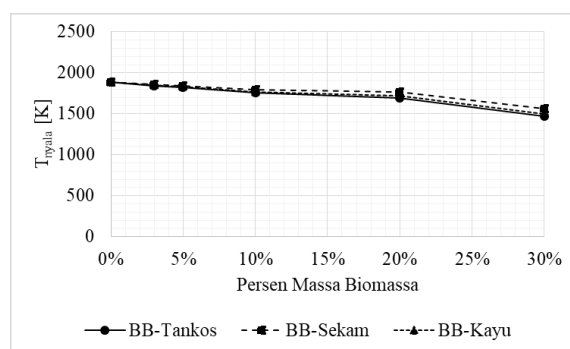


GAMBAR 6 Perubahan abu pembakaran terhadap persen massa biomassa dalam pembakaran kombinasi.

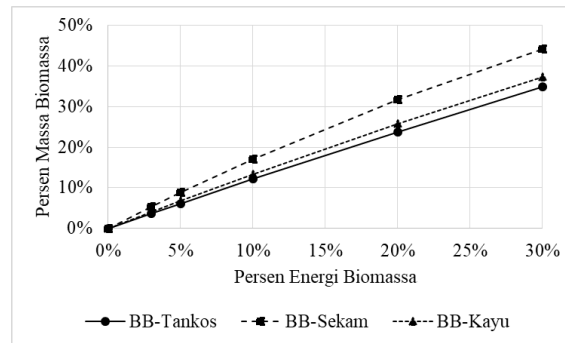


GAMBAR 7 Penurunan temperatur nyala adiabatik stoikiometrik terhadap kenaikan persen massa biomassa dalam pembakaran kombinasi.

Perubahan temperatur nyala adiabatik pada pembakaran stoikiometri ($\phi = 1$) dan pada pembakaran dengan ekse udara 30 persen ($\phi = 1,3$) terhadap kenaikan persen massa biomassa disajikan dalam Gambar 7 dan Gambar 8. Rerata laju penurunan T_{nyala} dalam satuan K/%massa-biomassa pada $\phi = 1$ adalah -17,75, -13,76, dan -16,37 masing-masing untuk bahan bakar kombinasi BB-Tankos, BB-Sekam, dan BB-Kayu. Sedangkan pada kasus $\phi = 1,3$ laju penurunannya adalah -13,93, -10,79, dan -12,81 masing-masing untuk BB-Tankos, BB-Sekam, dan BB-Kayu. Penurunan temperatur nyala adiabatik adalah dipahami sebagai efek dari penurunan nilai kalor (LHV) pada bahan bakar kombinasi.



GAMBAR 8 Penurunan temperatur nyala adiabatik udara ekse 30 persen terhadap kenaikan persen massa biomassa dalam pembakaran kombinasi.



GAMBAR 9. Hubungan antara persen energi biomassa dan persen massa biomassa pada pembakaran kombinasi

Galibnya, spesifikasi bahan bakar kombinasi batu bara dan biomassa dinyatakan dalam persen energi, bukan persen massa seperti yang diterapkan dalam studi ini. Untuk itu Gambar 9 menunjukkan hubungan antara persen energi bahan bakar kombinasi batu bara dengan biomassa dan persen massanya. Sebagai ilustrasi, pada komposisi energi biomassa dalam bahan bakar kombinasi sebesar 20 persen, maka diperlukan persen massa biomassa sebesar 24%, 32%, dan 26%, masing-masing untuk tankos, sekam padi, dan kayu.

4. KESIMPULAN

Studi termodinamika terhadap pembakaran kombinasi batu bara dengan biomassa limbah tankos, sekam padi, atau kayu menawarkan keuntungan dalam hal penurunan AFR dan emisi CO₂. Penurunan AFR adalah menguntungkan ditinjau dari tidak diperlukannya modifikasi pasokan udara pembakaran ke dalam tungku pembakaran. Penurunan emisi karbon dioksida seiring dengan peningkatan persen massa biomassa sudah barang tentu menjadi tujuan dari penerapan pembakaran kombinasi batubara dengan biomassa.

Peningkatan abu sisa pembakaran dan penurunan temperatur nyala adiabatik adalah dua efek pembakaran kombinasi yang tidak menguntungkan. Peningkatan abu sisa pembakaran menandakan perlunya penyesuaian kapasitas tata kelola abu. Sedangkan penurunan temperatur nyala adiabatik mengindikasikan kemungkinan terjadinya penurunan kapasitas pembangkit uap.

UCAPAN TERIMAKASIH

Para penulis menyampaikan terima kasih kepada Institut Teknologi Bandung yang telah memberikan *support* dana dalam P2MI 2021 untuk penelitian implementasi biomassa limbah sebagai bahan bakar pada pembakaran kombinasi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. S. Primadita, I. N. S. Kumara, and W. G. Ariastina, "A review on biomass for electricity generation in Indonesia," *J. Electr. Electron. Informatics*, vol. 4, no. 1, p. 4, 2020.
- [2] M. Aziz, D. Budianto, and T. Oda, "Computational fluid dynamic analysis of co-firing of palm kernel shell and coal," *Energies*, vol. 9, no. 3, p. 137, 2016.
- [3] S. Belosevic, "Modeling approaches to predict biomass co-firing with pulverized coal," *Open Thermodyn. J.*, vol. 4, no. 1, 2010.
- [4] S. Mehmood, B. V Reddy, and M. A. Rosen, "Energy analysis of a biomass co-firing based pulverized coal power generation system," *Sustainability*, vol. 4, no. 4, pp. 462–490, 2012.
- [5] A. Kazagic, N. Hodzic, and S. Metovic, "Co-combustion of low-rank coal with woody biomass and miscanthus: an experimental study," *Energies*, vol. 11, no. 3, p. 601, 2018.
- [6] S. A. Channiwala and P. P. Parikh, "A unified correlation for estimating HHV of solid, liquid and gaseous fuels," *Fuel*, vol. 81, no. 8, pp. 1051–1063, 2002.
- [7] K. W. Ragland and K. M. Bryden, *Combustion engineering*. CRC press Boca Raton, FL, 2011.
- [8] T.-Y. Mun, T. Z. Tumsa, U. Lee, and W. Yang, "Performance evaluation of co-firing various kinds

- of biomass with low rank coals in a 500 MWe coal-fired power plant," *Energy*, vol. 115, pp. 954–962, 2016.
- [9] P. Ninduangdee and V. I. Kuprianov, "A study on combustion of oil palm empty fruit bunch in a fluidized bed using alternative bed materials: Performance, emissions, and time-domain changes in the bed condition," *Appl. Energy*, vol. 176, pp. 34–48, 2016.
- [10] M. Anshar, F. N. Ani, and A. S. Kader, "Combustion Characteristics Modeling of Rice Husk as Fuel for Power Plant in Indonesia," in *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 695, pp. 815–819.