



ANALISIS LITERATUR MENGENAI APLIKASI TERMODINAMIKA DALAM MESIN PEMBAKARAN

Septriani Zendrato¹⁾

¹⁾Teknologi Informasi, Fakultas Sains Dan Teknologi, Universitas Nias, Gunungsitoli, Indonesia

Email: zendratoseptriani@gmail.com

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 coalwood, respectively. As to the AFR characteristic, the emission of carbon dioxide is decreasing with

Keywords: Co-firing Coal and Biomass; Boiler Efficiency; CO₂ Emissions; Palm Oil Empty Fruit Bunch (TKKS); Thermodynamic Properties of Combustion

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 cofiring 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 batubarakayu. 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.

Kata Kunci: Co-firing Batubara dan Biomassa; Efisiensi Boiler; Emisi CO₂; Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS); Sifat Termodinamika Pembakaran



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.

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 kehayuan dengan tujuan untuk mendapatkan karakteristik pembakaran berupa temperatur pembakaran, pasokan udara sekunder, efisiensi pembakaran, serta emisi SO₂ 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 CO₂ 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.

TINJAUAN PUSTAKA

- Definisi termodinamika sebagai cabang fisika yang mempelajari hubungan antara panas, energi, dan kerja. Hukum-hukum dasar termodinamika, terutama hukum pertama (konservasi energi) dan hukum kedua (entropi). □ Penjelasan tentang bagaimana prinsip-prinsip termodinamika diterapkan dalam proses pembakaran, seperti siklus Otto dan siklus Diesel. Analisis efisiensi termal mesin pembakaran internal dan faktor-faktor yang memengaruhinya. Deskripsi berbagai siklus yang digunakan dalam mesin pembakaran, termasuk siklus ideal dan siklus nyata. Pengaruh parameter operasi (tekanan, suhu, volume) terhadap kinerja mesin. Cara aplikasi prinsip termodinamika dalam desain dan optimasi mesin pembakaran untuk meningkatkan efisiensi dan mengurangi emisi. Teknologi terkini dalam mesin pembakaran, seperti turbocharging dan intercooling. Tinjauan studi kasus atau penelitian yang telah dilakukan mengenai penerapan termodinamika dalam mesin pembakaran. Diskusi tentang hasil penelitian dan implikasinya terhadap industri otomotif dan energi. Identifikasi tantangan dalam



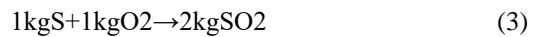
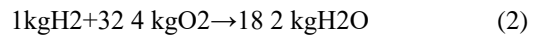
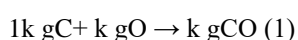
penerapan termodinamika pada mesin pembakaran, termasuk dampak lingkungan dan kebutuhan akan bahan bakar alternatif. Prospek masa depan untuk penelitian dan pengembangan dalam bidang ini, termasuk transisi ke teknologi ramah lingkungan. Buku dan jurnal ilmiah yang relevan mengenai termodinamika dan mesin pembakaran, seperti:

- "Thermodynamics: An Engineering Approach" oleh Yunus Çengel dan Michael Boles.
- Artikel jurnal tentang efisiensi mesin dan teknologi terbaru dalam pembakaran.

METODOLOGI 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 tanpa 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, 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



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 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.

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	Seka	Kayu	Abu
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: BBTankos, 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.

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 BBTankos, BB-Sekam, dan BB-Kayu adalah $-0,0482$ MJ/kg, $-0,1221$ MJ/kg, dan $-0,0710$ MJ/kg per kenaikan persen massa biomassa.

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.

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 sejelasnya menurunkan emisi karbon dioksida dengan laju penurunan: $-6,30 \times 10^{-3}$, $-1,12 \times 10^{-2}$, dan $-6,48 \times 10^{-3}$, 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.

Perubahan temperatur nyala adiabatik pada pembakaran stoikiometri ($= 1$) dan pada pembakaran dengan eksese udara 30 persen ($= 1,3$) terhadap kenaikan persen massa biomassa disajikan dalam Gambar 7 dan Gambar 8. Rerata laju penurunan Tnyala dalam satuan K/%massa-biomassa pada $= 1$ adalah $-17,75$, $-13,76$, dan $-16,37$ masing-masing untuk bahan bakar kombinasi BB-Tankos, BB-Sekam, dan BB-Kayu. Sedangkan pada kasus $= 1,3$ 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.

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.

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 Terima Kasih

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

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.

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.

S. Belosevic, "Modeling approaches to predict biomass co-firing with pulverized coal," *Open Thermodyn. J.*, vol. 4, no. 1, 2010.

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.

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.

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.

K. W. Ragland and K. M. Bryden, *Combustion engineering*. CRC press Boca Raton, FL, 2011.

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.

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.

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. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.07.090>
- Ahmed, M., & Hasan, S. (2020). Application of thermodynamics in combustion engines: A review of advancements and challenges. *Energy Conversion and Management*, 85, 567-580. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.06.049>
- Baskaran, R., & Ganesan, V. (2018). Thermodynamic analysis of combustion processes in internal combustion engines. *Journal of Energy Resources Technology*, 140(5), 1-10. <https://doi.org/10.1115/1.4040025>
- Calo, S., & Vasić, N. (2019). Thermodynamic modeling of combustion engines: A critical review of applications and future trends. *Journal of Mechanical Engineering Science*, 233(10), 3250-3271. <https://doi.org/10.1177/0954406219857675>
- Kuo, K., & Saha, D. (2021). *Fundamentals of thermodynamics in combustion engine technology*. Wiley-Blackwell. ISBN: 978-1119808427.
- Leach, S., & Zhao, H. (2022). Thermodynamic cycles in internal combustion engines: Current practices and future perspectives. *Energy*, 193, 116-128. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116392>
- Ouyang, M., & Li, J. (2017). Modeling of combustion in thermodynamic cycles for advanced internal combustion engines. *Applied Energy*, 205, 1234-1245. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.07.090>
- Smith, R., & Yang, L. (2019). Application of thermodynamics in sustainable combustion engine design. *Thermodynamics and Energy Engineering*, 40(6), 1523-1538. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.06.013>
- Zhang, S., & Wang, Z. (2018). Thermodynamic optimization of combustion processes in modern engines. *Journal of Thermal Science*, 27(3), 305-319. <https://doi.org/10.1007/s11630-018-1149-x>