

Dampak penambahan limbah biomassa cangkang kelapa sawit sebagai bahan bakar boiler terhadap heat rate dengan metode co-firing

Nefri Yurisman¹, Rafil Arizona²

¹Program Studi Teknik Mesin, Universitas Islam Riau

²Staf Pengajar, Program Studi Teknik Mesin, Universitas Islam Riau
Jl. Kaharuddin Nasution No. 113 P. Marpoyan, Pekanbaru 28284

Email korespondensi: nef.yrsmn348@student.uir.ac.id

Abstrak

Pembangkit listrik yang terdapat di Indonesia sebagian besar menggunakan sumber daya tidak terbarukan untuk memenuhi kebutuhan listrik masyarakat atau industri seperti batu bara. Permasalahan krisis ini mengharuskan untuk mencari alternatif bahan bakar untuk menggantikan batu bara atau setidaknya mengurangi pemakaian batu bara. Salah satunya menggunakan bahan bakar biomassa dengan menerapkan metode co-firing. Tujuan proses co-firing dilakukan guna meningkatkan energi termal pada boiler, maka dari itu diharapkan dapat menaikkan nilai tara kalor bahan bakar boiler. Penerapan kajian menggunakan metode komparatif analisis yang akan membandingkan heat rate (tara kalor) menggunakan metode co-firing dengan heat rate (tara kalor) tanpa menggunakan metode co-firing. Hasil analisis menunjukkan dampak penambahan limbah biomassa sebagai bahan bakar boiler mengakibatkan heat rate (tara kalor) dengan co-firing meningkat 19810,41 kkal/kWh dibandingkan saat tanpa co-firing 19207,08 kkal/kWh yang nilai selisihnya 603,33 kkal/kWh. Pengujian ini juga mempengaruhi kandungan karbonnya yang meningkat dari 57,62% menjadi 57,88%, sedangkan pada total sulfur dari 0,20% menjadi lebih rendah sebesar 0,19%.

Kata kunci: co-firing, biomassa, batu bara, boiler, heat rate.

Abstract

Indonesia's electricity plants mostly use off-renewable resources to meet the electricity needs of people or industries such as coal. This crisis problem requires that we seek a fuel alternative to replace coal or at least reduce coal consumption. One of them biomass fuel by applying co-firing methods. The co-firing process aims to raise thermal energy in the boilers, and therefore it is expected to raise the heat rate of the boiler fuel. The application of research uses a comparative analysis method that will compare heat rate using co-firing method with heat rate without the co-firing method. Analysis shows the impact of adding biomass waste as a boiler fuel to create a heat rate with co-firing increased by 19810.41 kkal/kWh compared to the time without co-firing 19207.08 kkal/kWh. The test also affected its carbon content of 57.62% increased 57.88%, while in total sulfur from 0.20% to lower by 0.19%.

Keywords: co-firing, biomass, coal, boiler, heat rate.

1. Pendahuluan

Minyak bumi, gas alam serta batu bara merupakan energi konvensional yang sumber energinya tidak dapat diperbaharui, kedepannya akan terjadi krisis pasokan energi dengan semakin menipisnya bahan bakar konvensional, sedangkan kebutuhan energi listrik di Indonesia terus meningkat setiap tahunnya, hal ini dapat dilihat dari pertumbuhan realisasi penjualan tenaga listrik diproyeksikan akan mengalami pertumbuhan rata-rata sebesar 8,3% selama 10 tahun mendatang [1]. Hal ini juga dapat dilihat mayoritas industri ataupun pembangkit di Indonesia masih menggunakan bahan bakar fosil.

Serta ketersediaan pasokan yang akan habis seiring dengan penggunaannya secara terus-menerus. Permasalahan krisis ini mengharuskan kita mencari alternatif bahan bakar untuk menggantikan batu bara atau setidaknya mengurangi pemakaian batu bara [4]. Oleh karena itu, saat ini banyak dikembangkannya

energi terbarukan yang tidak akan habis dan lebih ramah lingkungan untuk memenuhi kebutuhan. Salah satunya menggunakan bahan bakar limbah biomassa cangkang kelapa sawit [5].

Pemanfaatan hasil pertanian kelapa sawit di Indonesia memberikan banyak kontribusi pada ekonomi negara. Pada tahun 2013, Indonesia telah berhasil mengembangkan perkebunan kelapa sawit sekitar 9,1 juta hektar dengan produksi Tandan Buah Segar (TBS) sebanyak 24,4 juta ton [9]. Dengan perkembangan ini industri kelapa sawit di Indonesia, akan meningkatkan produktivitas pengolahan produk utama kelapa sawit, yang akan berdampak juga pada tingginya produksi limbah yang dihasilkan. Namun cukup disayangkan pemanfaatan akan limbah biomassa kelapa sawit belum digunakan secara maksimal baik oleh industri secara khusus maupun pemerintah secara umum. Padahal program energi kedepan dari Dewan Energi Nasional (DEN) 2005–2025 adalah mengatasi pengeluaran energi listrik adalah memanfaatkan Energi Baru Terbarukan

(EBT), salah satunya dengan cara memanfaatkan limbah biomassa cangkang kelapa sawit. Untuk setiap ton TBS diperoleh 60 kg cangkang (6%), dengan nilai kalor sebesar 20093 kJ/kg dalam kondisi kering yang memiliki rata-rata *calorific value* yang cukup tinggi dengan kisaran 19500 – 20750 kJ/kg [3]. Hal ini dapat ditunjukkan pada Tabel 1 di bawah ini.

Tabel 1. Nilai energi panas limbah biomassa kelapa sawit.

Jenis Limbah	Rata-rata <i>calorific value</i> (kJ/kg)	Kisaran (kJ/kg)
TKKS	18795	18000 – 19920
Serat	19055	18800 – 19580
Cangkang	20093	19500 – 20750
Batang	17471	17000 – 17800
Pelepah	15719	15400 – 15680

Potensi teoritis ini memang sangat besar, dan ini didukung hasil kajian yang sama di Propinsi Riau tentang potensi energi limbah pertanian kelapa sawit (cangkang, serabut, tankos, batang, pelepah dan POME/*Palm Oil Mill Effluent*), yang menunjukkan potensi energi limbah biomassa sebesar 77.466.754,8 GJ atau setara dengan 21.518.542,8 MWh [11].

Pada kajian ini akan dilakukan dengan metode *co-firing* (pembakaran dua bahan bakar yang berbeda secara bersamaan) dengan bahan bakar batu bara dan limbah biomassa yang digunakan cangkang kelapa sawit (Gambar 1) merupakan limbah yang paling besar dalam pengolahan kelapa sawit, serta memiliki potensi nilai energi panas (*calorific value*) yang tinggi [13]. Tujuan proses *co-firing* dilakukan guna meningkatkan energi termal pada *boiler*, maka dari itu diharapkan menaikkan nilai kalor bahan bakar biomassa [2].



Gambar 1. Cangkang kelapa sawit.

Berikut beberapa kandungan dari batu bara dan cangkang kelapa sawit [6].

Analisis Proksimat (Proximate Analysis)

Suatu analisis untuk menentukan kualitas bahan bakar yang meliputi kandungan air bawaan, kandungan abu, zat terbang dan karbon tertambat. Adapun analisis proksimat tersebut yaitu sebagai berikut ini.

Kandungan Air Total (Total Moisture)

Kandungan air total adalah banyaknya air yang terkandung dalam batu bara baik yang terikat secara kimiawi (kandungan air bawaan) maupun akibat pengaruh kondisi luar (kandungan air bebas). Kandungan air total sangat dipengaruhi oleh faktor keadaan seperti ukuran butir dan faktor iklim.

Kandungan Air Bawaan (Inherent Moisture)

Kandungan air bawaan adalah air yang terikat pada struktur kimia batu bara itu sendiri. Kandungan air bawaan berhubungan erat dengan nilai kalori, di mana bila kandungan air bawaan kecil, maka nilai kalori meningkat.

Kadar Abu (Ash Content)

Merupakan sisa-sisa zat organik yang terkandung dalam batu bara setelah dibakar. Kandungan abu tersebut dapat dihasilkan dari pengotor bawaan dalam proses pembentukan batu bara maupun dari proses penambahan.

Kandungan Zat Terbang (Volatile Matter)

Zat terbang merupakan zat aktif yang menghasilkan energi atau panas apabila batu bara tersebut dibakar. Zat terbang ini umumnya terdiri dari gas-gas yang mudah terbakar seperti hidrogen (H), karbon monoksida (CO) dan metana (CH₄). Dalam pembakaran batu bara dengan zat terbang tinggi akan mempercepat pembakaran karbon padatnya, sebaliknya zat terbang rendah akan mempersulit proses pembakaran.

Kandungan Karbon Tertambat (Fixed Carbon)

Merupakan karbon yang tertinggal sesudah kandungan air dan zat terbangnya hilang. Dengan adanya pengeluaran kandungan air dan zat terbang, maka karbon tertambat secara otomatis akan naik, sehingga makin tinggi kandungan karbonnya kelas batu bara makin baik.

Analisis Ultimat (Ultimate Analysis)

Komponen organik batu bara secara umum merupakan senyawa kimia yang mengandung karbon, hidrogen, nitrogen, sulfur, dan oksigen. Analisis ultimat merupakan kegiatan untuk menentukan kandungan unsur karbon, hidrogen, nitrogen, sulfur, dan oksigen dalam batubara serta dapat juga digunakan untuk menentukan peringkat batu bara dalam pengklasifikasian.

Nilai Kalori (Calorific Value)

Nilai kalori yaitu besarnya panas yang dihasilkan dari pembakaran batu bara, yang dinyatakan dalam kkal/kg, kJ/kg, BTU/lb, atau MJ/kg.

Metode Co-Firing

Co-firing merupakan suatu proses pembakaran dua material yang berbeda secara bersamaan. Dengan menggunakan *co-firing* emisi dari pembakaran suatu bahan bakar fosil dapat dikurangi. *Co-firing*

merupakan salah satu metode alternatif untuk mengubah biomassa menjadi tenaga listrik, yaitu dengan cara substitusi sebagian batu bara dengan biomassa ke dalam sebuah unit pembangkit [15]. Biomassa dikenal sebagai *zero CO₂* emisi, dengan kata lain tidak menyebabkan akumulasi CO₂ di atmosfer, dan biomassa juga mengandung lebih sedikit sulfur jika dibandingkan dengan batu bara [17]. Oleh karena itu, *co-firing* batu bara dan biomassa menyebabkan menurunnya emisi CO₂ dan jumlah polutan NO_x dan SO_x dari bahan bakar fosil [12]. Hingga saat ini, terdapat tiga jenis konfigurasi *co-firing* yang telah digunakan, yaitu *Direct co-firing*, *Indirect co-firing*, dan *Parallel co-firing* [2].

Direct Co-Firing

Pada konfigurasi ini, biomassa (sebagai bahan bakar sekunder) dimasukkan bersamaan dengan batu bara (sebagai bahan bakar primer) ke dalam boiler yang sama. *Direct co-firing* lebih umum digunakan karena paling murah. Pada *direct co-firing* sendiri, ada dua pendekatan yang dapat dilakukan. Yang pertama adalah pencampuran dan perlakuan awal terhadap biomassa dan batu bara dilakukan bersamaan sebelum diumpankan ke pembakar. Yang kedua, perlakuan awal biomassa dan batu bara dilakukan secara terpisah, kemudian baru diumpankan ke pembakar [14].

Indirect Co-Firing

Konfigurasi *indirect co-firing* mengacu pada proses gasifikasi biomassa, di mana gas hasil gasifikasi biomassa kemudian diumpankan ke dalam pembakar dan dibakar bersama batu bara [14]. Dengan menggunakan konfigurasi ini, abu dari biomassa akan terpisah dari abu batu bara dengan tetap menghasilkan rasio *co-firing* yang sangat tinggi. Kekurangan dari *indirect co-firing* adalah biaya investasinya yang tinggi.

Parallel Co-Firing

Pada metode ini memerlukan investasi pembangunan boiler berbahan bakar biomassa yang terpisah, kemudian uap yang dihasilkan dari boiler biomassa diumpankan ke dalam sistem uap boiler berbahan bakar batu bara eksisting. Pendekatan ini menggunakan boiler biomassa yang terpisah dari boiler batu bara yang memungkinkan pemanfaatan biomassa lebih maksimal [18]. Walaupun konfigurasi ini membutuhkan investasi yang lebih besar dari pada *direct co-firing*, konfigurasi ini memiliki kelebihan tersendiri. Dengan menggunakan konfigurasi ini, sangatlah mungkin untuk digunakan bahan bakar dengan kandungan logam alkali dan klorin tinggi dan abu dari hasil pembakaran batu bara serta biomassa akan dihasilkan terpisah.

Circulating Fluidized Boiler

Jenis boiler yang dipakai pada kajian ini ialah jenis *Circulating Fluidized Boiler*. Pada *Circulating Fluidized Boiler* (Gambar 2) terjadi sirkulasi bahan

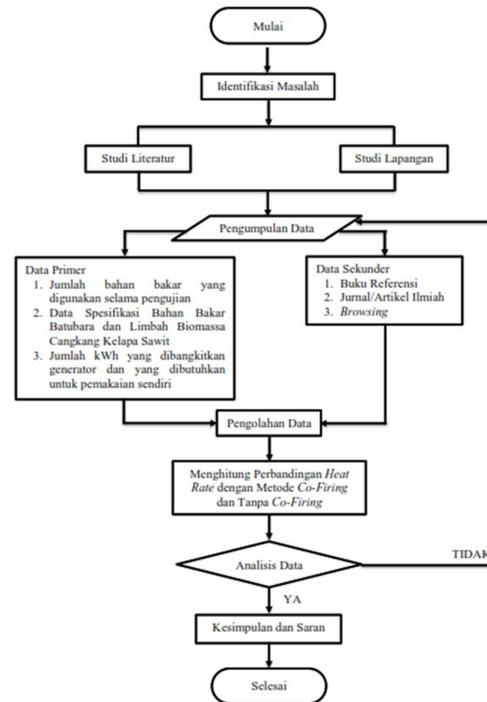
bakar yang belum habis terbakar dari furnace dialirkan ke cyclone dan kemudian masuk ke seal pot selanjutnya kembali ke furnace [7].



Gambar 2. Circulating Fluidized Boiler

2. Metode

Tahapan kajian yang dilakukan, dapat digambarkan pada diagram alir di Gambar 3 berikut.



Gambar 4. Diagram alir.

Identifikasi dan Penetapan Tujuan

Pada tahap ini menetapkan tema yang diangkat adalah dampak penambahan limbah biomassa cangkang kelapa sawit sebagai bahan bakar boiler terhadap *heat rate* dengan metode *co-firing*.

Pengamatan Lapangan

Pada tahap ini dilakukan pengamatan di lapangan secara langsung dari narasumber, untuk mendapatkan informasi terkait kajian yang dilaksanakan, berupa analisis proksimat, ultimate dan nilai kalor dari bahan

bakar limbah biomassa cangkang kelapa sawit dan batu bara.

Studi Literatur

Pada tahap ini akan dilakukan pengumpulan teori-teori yang berhubungan dengan kajian yang terkait dengan pencampuran dua bahan bakar yang berbeda (*co-firing*) yang nantinya akan digunakan sebagai acuan dalam kajian ini.

Wawancara

Mencari informasi langsung dari operator dan karyawan di PT PJB UBJOM PLTU Tenayan terkait berupa sistem bahan bakar, pengoperasian yang berkaitan dengan kajian ini.

Argumentasi dan Eksperimen

Metode ini merupakan salah satu metode di mana diterapkan argumen yang dimiliki dengan melakukan analisis secara teoritis maupun lapangan (pengujian) dalam dampak penambahan limbah biomassa cangkang kelapa sawit sebagai bahan bakar boiler terhadap *heat rate* dengan metode *co-firing* menjadi lebih efisien.

Tahap Pengumpulan Data

Pada tahap pengumpulan data, merupakan jumlah bahan bakar yang digunakan selama pengujian, data spesifikasi bahan bakar batu bara dan limbah biomassa cangkang kelapa sawit dan jumlah kWh yang dibangkitkan generator dan yang dibutuhkan untuk pemakaian sendiri.

Tahap Pengolahan Data

Tahap pengolahan data merupakan tindak lanjut dari pengumpulan data yang telah dilakukan, data-data tersebut ditata sesuai variabel yang akan dibutuhkan.

Tahap Analisis dan Kesimpulan

Tahap ini merupakan tahap akhir dari kajian yang dilakukan berupa analisis dan kesimpulan. Pada tahap ini dilakukan analisis terhadap data-data yang telah diolah dan dibandingkan. Tahap kesimpulan adalah hasil dari analisis pengelolaan data meliputi perbandingan dari *heat rate* dengan metode *co-firing* dan *heat rate* tanpa metode *co-firing*.

Perhitungan Analisis Ultimate, Heating Value (Nilai Kalor) Dan Heat Rate (Tara Kalor)

Untuk dapat mengetahui massa karbon (C), hidrogen (H₂), oksigen (O₂), sulfur (S), nitrogen (N₂) di dalam bahan bakar sekaligus dengan nilai pembakaran tinggi (HHV) ataupun nilai pembakaran rendah (LHV) suatu sampel bahan bakar dengan menggunakan teori di bawah ini (*Bureau of Energy Efficiency*) [8].

Persentase Karbon (C)

Persentase karbon (C) didapatkan dengan Persamaan 1 berikut.

$$C = 0,97.FC+0,7(VM+0,1A)-M(0,6-0,01M) \quad (1)$$

Persentase Hidrogen (H₂)

Persentase hidrogen (H₂) didapatkan dengan Persamaan 2 berikut.

$$H_2 = 0,036FC+0,086(VM-0,1A)-0,0035M^2 (1-0,02M) \quad (2)$$

Persentase Nitrogen (N₂)

Persentase nitrogen (N₂) didapatkan dengan Persamaan 3 berikut.

$$N_2 = 2,10-0,02VM \quad (3)$$

Persentase Oksigen (O₂)

Persentase oksigen (O₂) didapatkan dengan Persamaan 4 berikut.

$$O_2 = 100-(C+H_2+N_2+S+IM+A) \quad (4)$$

High Heating Value (HHV) Bahan Bakar

High Heating Value (HHV) bahan bakar dapat didapatkan dengan Persamaan 5 berikut.

$$HHV = 33950 C + 144200 [H_2 - O_2 / 8] + 9400 S \quad (5)$$

Low Heating Value (LHV) Bahan Bakar

Low Heating Value (LHV) bahan bakar didapatkan dengan Persamaan 6 berikut.

$$LHV = HHV-2400 (M + 9H_2) \quad (6)$$

Di mana FC merupakan persentase Fixed Carbon dalam bahan bakar, VM merupakan persentase Volatile Matter dalam bahan bakar, IM merupakan persentase Inherent Moisture dalam bahan bakar, A merupakan persentase Ash Content dalam bahan bakar, M merupakan persentase Total Moisture dalam bahan bakar, dan S merupakan persentase Total Sulfur dalam bahan bakar.

Heat Rate Brutto (HR_B)

Heat Rate Brutto (HR_B) didapatkan dengan Persamaan 7 berikut.

$$HR_B = \frac{W_f \times LHV}{kWh_B} \quad (7)$$

Heat Rate Netto (HR_N)

Heat Rate Netto (HR_N) didapatkan dengan Persamaan 8 berikut.

$$HR_N = \frac{W_f \times LHV}{kW_B - kW_{PS}} \quad (8)$$

Di mana W_f merupakan Jumlah bahan bakar yang dibutuhkan (kg/jam), LHV adalah Nilai kalor bawah bahan bakar yang digunakan (kJ/kg atau kkal/kg), kWh_B merupakan Jumlah kWh yang dibangkitkan generator (kWh), dan kWh_{PS} merupakan Jumlah kWh yang dibutuhkan untuk pemakaian sendiri (kWh).

Di mana tara kalor unit brutto (HR_B) adalah jumlah kalor bahan bakar dihitung berdasarkan nilai kalor bawah (LHV) untuk menghasilkan setiap kWh brutto. Tara kalor unit netto (HR_N) adalah jumlah kalor bahan bakar yang dihitung berdasarkan nilai kalor bawah (LHV) untuk menghasilkan setiap kWh netto.

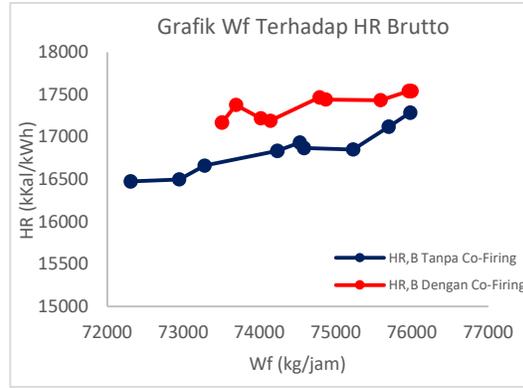
3. Hasil dan Pembahasan

Jenis bahan bakar yang digunakan pada kajian ini di unit 2 boiler PT PJB UBJOM PLTU Tenayan diterapkan dalam dua kondisi, yang pertama menggunakan bahan bakar padat batu bara jenis *bituminous* dan yang kedua menggunakan bahan bakar padat batu bara jenis *bituminous* dan campuran limbah biomassa cangkang kelapa sawit dengan metode *direct co-firing* dengan perbandingan 95:5. Tabel 2 menunjukkan *heat rate brutto* dan *netto* terhadap jumlah bahan bakar pada metode *co-firing*. Gambar 3 menunjukkan perbandingan *hear rate brutto* dengan metode *co-firing* dan tanpa metode *co-firing*.

Tabel 2. Heat rate brutto dan netto terhadap jumlah bahan bakar dengan metode *co-firing*.

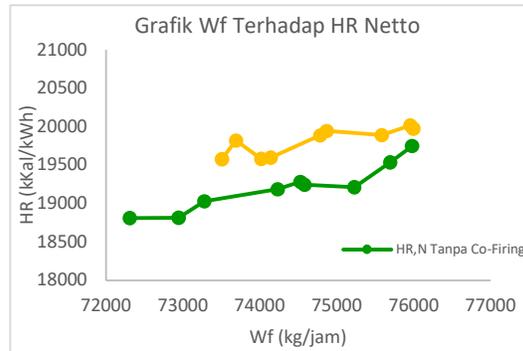
Wf (kg/jam)	HR _B (kKal/kWh)	HR _N (kKal/kWh)
75225	16851.75	19213.09
74231	16832.98	19186.31
75975	17285.78	19748.14
72943	16499.74	18815.80
74525	16935.25	19282.06
72307	16475.02	18811.44
74580	16869.84	19243.48
75693	17121.79	19534.66
73277	16661.59	19028.71

Wf (kg/jam)	HR _B (kKal/kWh)	HR _N (kKal/kWh)
73505	17168.57	19580.31
73690	17377.29	19818.25
74867	17442.41	19943.64
74141	17192.29	19596.40
74017	17221.20	19583.39
74783	17467.07	19886.51
75953	17541.77	20017.31
75585	17436.28	19890.81
75992	17539.87	19977.07



Gambar 3. Heat rate brutto dengan metode *co-firing* dan tanpa metode *co-firing*.

Tingkat maksimum HR, *brutto* sebesar 17541,77 kkal/kWh dengan konsumsi bahan bakar 75,953 ton/jam atau 75953 kg/jam, yang dapat disimpulkan semakin besar bahan yang digunakan, maka semakin besar pula HR, *brutto* yang dihasilkan akan tetapi ini berpengaruh kembali pada beban yang dihasilkan. Gambar 4 menunjukkan perbandingan *heat rate netto* dengan metode *co-firing* dan tanpa metode *co-firing*.



Gambar 4. Heat rate netto dengan metode *co-firing* dan tanpa metode *co-firing*.

Sedangkan pada tingkat maksimum HR, *netto* sebesar 20017,31 kkal/kWh dengan konsumsi bahan bakar 75,953 ton/jam atau 75953 kg/jam yang dapat disimpulkan semakin besar bahan yang digunakan maka semakin besar pula HR, *netto* yang dihasilkan akan tetapi ini berpengaruh kembali pada beban yang dihasilkan.

Karakter biomassa lebih mirip ke batu bara *bituminous*, kepadatan tinggi, kekerasan lebih tinggi, *volatile* tinggi dan lebih ramah lingkungan dengan kandungan sulfur yang rendah [16]. Apabila komposisi pembakarannya tepat, akan mengurangi bahkan tidak menghasilkan asap hitam/*black smoke*. Meskipun bahan bakar biomassa boiler jauh lebih sedikit dari pada boiler batu bara, bahkan ada biomassa sebenarnya cenderung tidak memancarkan asap [16]. Namun, ketika bahan bakar dalam boiler terbakar dalam suhu tinggi 800-1000°C atau lebih tinggi. Dan terdapat komponen dalam bahan bakar biomassa tidak terbakar sempurna, atau kontrol

pembakaran tidak baik, yang berakibat akan terlihat asap hitam.

Ketika bahan bakar biomassa dibakar, akan mengalami reaksi fisik dan kimia seperti karbonisasi. Ketika pembakaran sempurna akan menghasilkan campuran uap air, karbon dioksida, hidrokarbon dan nitrogen oksida. Jika pembakaran tidak tepat, tidak ada proses penangkapan debu, kita akan melihat *black smoke*. Hal ini juga berdampak pada membuang bahan bakar, mengurangi efisiensi termal, dan menghasilkan polutan.

4. Kesimpulan

Besar kecilnya *heat rate* (tara kalor) dipengaruhi beberapa faktor diantaranya, semakin kecil bahan yang digunakan, maka semakin besar *heat rate* (tara kalor). Nilai kalor dari limbah biomassa cangkang kelapa sawit berpengaruh juga terhadap *total moisture* (kadar air) yang dikandungnya, *total moisture* bahan bakar campuran sebanyak 33,61%, hal ini memang sudah sampai di bawah 40%, akan tetapi untuk penghematan biaya transportasi, diperlukan kadar air sampai sekitar 10%, di mana dengan merubah menjadi *pellet* adalah salah satu caranya.

Perbandingan *heat rate* (tara kalor) tanpa menggunakan metode *co-firing* dengan menggunakan metode *co-firing* didapatkan persentase rata-rata *netto* sebesar 19207.08 kkal/kWh dan 19810.41 kkal/kWh, yang nilai selisihnya 603.33 kkal/kWh. Jika dilihat dari spesifikasi kandungan bahan bakar yang berbahan bakar campuran metode *co-firing* lebih baik, jika dilihat pada kandungan karbonnya meningkat dari 57,62% menjadi 57,88%, total sulfur yang menurun dari 0,20% menjadi 0,19% dan nilai kalor yang dari 4134 kkal/kg meningkat menjadi 4140,5 kkal/kg. Hal ini dapat disimpulkan bahwa bahan bakar campuran dengan menggunakan metode *co-firing* mampu menggantikan sebagian besar bahan bakar fosil terutama batu bara.

Penggunaan limbah biomassa sebagai bahan bakar masih belum digunakan secara konvensional hal ini disebabkan salah satunya besarnya *total moisture* yang dihasilkan dari limbah biomassa, oleh karena itu perlunya dilakukan *pre-treatment* [10] untuk mengurangi kadar air yang justru nilai kalor dari limbah biomassa berpengaruh juga terhadap *total moisture* (kadar air) yang dikandungnya yang juga berdampak pada *heat rate* (tara kalor) yang dihasilkan.

Bagi kajian selanjutnya, untuk memperluas kajian, sehingga diperoleh informasi yang lebih bervariasi seperti variasi terhadap metode-metode *co-firing* (*direct*, *indirect* dan *parallel*), pada komposisi perbandingan bahan bakar campuran ataupun pada jenis limbah biomassa yang berbeda.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada PT PJB UBJOM PLTU Tenayan yang telah memberi dukungan dalam kajian ini, baik berupa sarana maupun dana terhadap kajian yang telah dilakukan.

Daftar Pustaka

- [1] PLN, 2017, Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) PLN.S.Mochizuki, H. Osaka. 1998, Drag reduction with submerged ribs and its mechanism in a turbulent boundary layer over d-type roughness. Proc Int Symp on Seawater Drag Reduction, Newport, Rhode Island, 22-23 July, 121-126.
- [2] Suprpta Winaya, I, & Ida Darma Susila. 2010, *Co-Firing* Sistem Fluidized Bed Berbahan Bakar Batubara dan Ampas Tebu. Jurnal Energi dan Manufaktur. Vol 4, 180-188.
- [3] M Nur Syukri. 2014, Karakteristik Kelapa Sawit Sebagai Bahan Baku Bioenergi. PT. Insan Fajar Mandiri Nusantara.
- [4] Murad, M. 2018, Analisis Perbandingan Campuran Batubara dengan Serbuk Kayu dalam Memanfaatkan Batubara Kalori Rendah di PT. Atoz Nusantara Mining Nagari Tambang IV Jurai Pasisir Selatan. Jurnal Bina Tambang, Vol 3, 1236-1243.
- [5] Lilis, W., & Galuh, S. B. 2013, Calibration of Carbon Analyzer LECO type IR-212. Pusat Teknologi Bahan Nuklir-BATAN. Buku II, 249-252.,
- [6] Al-alang, Alwa Mhd Tanza & Fadhillah. 2020, Analisis Pengaruh Pemberian Cangkang Kelapa Sawit Terhadap Nilai Parameter Batubara. Jurnal Bina Tambang. Vol 5, 190-199..
- [7] Yendri, Efri, dkk. 2013, Pengoperasian PLTU Pembidangan Prajabatan S1-Enjiner Pembangkitan Thermal. PLN Corporate University.
- [8] Surindra, M Denny. 2014, Analisis Variasi Nilai Kalor Batubara Di PLTU Tanjung Jati B Terhadap Energi Input System. Jurnal Ilmiah Bidang Teknik Mesin POLINES. Vol 9, 93-100.
- [9] Erivianto, Dino, dkk. 2016, Penggunaan Limbah Padat Kelapa Sawit Untuk Menghasilkan Tenaga Listrik Pada Existing Boiler. Sainstech. Vol 26, 85-93.
- [10] Febijanto, Irhan. 2020, Co-Firing PLTU Batubara dan Permasalahan yang Dihadapi. Pusat Pengkajian Industri Proses dan Energi.
- [11] Papilo, Petir, dkk. 2015, Penilaian Potensi Biomassa Sebagai Alternatif Energi Kelistrikan. Jurnal Penelitian dan Aplikasi Sistem dan Teknik Indutsri. Vol 9, 164-176.
- [12] Roni, Mohammad S. 2017, Biomass co-firing technology with policies, challenges, and opportunities: A global review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol 78, 1089-1101.
- [13] Suganal & Gandhi K. Hudaya. 2019. Bahan Bakar Co-Firing Dari Batubara Dan Biomassa

- Tertorefaksi Dalam Bentuk Briket (Skala Laboratorium). *Jurnal Teknologi Mineral dan Batubara*. Vol 15, 31 – 48.
- [14] Noraishah Shafiqah Yacob, Hassan Mohamed, & Abd Halim Shamsuddin. 2021. Investigation of Palm Oil Wastes Characteristics for Co-Firing with Coal. *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology*, Vol 23, 34–42.
- [15] Verma, Munna, dkk. 2017. Drying of biomass for utilising in co-firing with coal and its impact on environment – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol 71, 732-741.
- [16] Tanbar, Fefria. 2021. Analisa Karakteristik Pengujian Co-Firing Biomassa Sawdust Pada Pltu Type Pulverized Coal Boiler Sebagai Upaya Bauran Renewable Energy. *Jurnal Offshore: Oil, Production Facilities and Renewable Energy*. Vol 5, 50-56.
- [17] Maskur, Zainal & Ardi Nugroho. 2021, Analisa Karakteristik Biomasa untuk Cofiring pada Pembangkit Batubara di Indonesia. Seminar Nasional Teknologi Industri Berkelanjutan I (SENASTITAN I). Vol 01, 394-402
- [18] Praevia, Muhammad Farizan & Widayat. 2022, Analisis Pemanfaatan Limbah Tandan Kosong Kelapa Sawit Sebagai Cofiring pada PLTU Batubara. *Jurnal Energi Baru & Terbarukan*. Vol 3, 28 – 37.