

Studi Pengaruh Rasio Co-firing Bahan Bakar Batubara dan Biomassa Tertorefaksi terhadap Performa Boiler

Gerald Nicholaus Pardamean Tampubolon dan Bambang Arip Dwiyanoro
Departemen Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

e-mail: bambangad

Abstrak—Co-firing merupakan salah satu cara untuk mengurangi penggunaan bahan bakar fosil (batubara) diganti dengan biomassa. Akan tetapi co-firing dapat menyebabkan penurunan performa pada pembangkit. Salah satu cara untuk menanggulangi permasalahan ini adalah dengan menggunakan biomassa yang telah diolah terlebih dahulu lewat proses heat-treatment yaitu biomassa tertorefaksi. Pada penelitian ini analisa pengaruh biomassa tertorefaksi terhadap performa pembangkit dengan menggunakan Cycle Tempo. Variasi yang dilakukan adalah rasio batubara low rank coal dengan biomassa. Biomassa yang digunakan ada empat; dua merupakan biomassa non-torefaksi (sawdust dan coconut shell) dan biomassa tertorefaksi (torrefied sawdust dan coconut charcoal). Penelitian ini dilakukan dengan variasi biomassa berupa 1%, 3%, 5%, 7%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa, penggunaan biomassa tertorefaksi menghasilkan peningkatan performa pada pembangkit. Performa terbaik ditunjukkan pada biomassa tertorefaksi yaitu coconut charcoal pada rasio co-firing 7%. Dengan performa pembangkit sebagai berikut, peningkatan efisiensi boiler yang semula bernilai 85.03% menjadi 85.51% dan penurunan NPHR yang semula bernilai 2171,66 menjadi 2159,6. Peningkatan performa pembangkit yang diakibatkan oleh penggunaan biomassa tertorefaksi memungkinkan untuk implementasi co-firing pada rasio yang lebih tinggi.

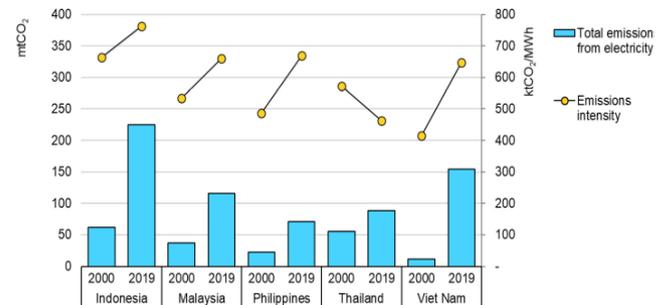
Kata Kunci—Biomassa, Co-firing, Torefaksi.

I. PENDAHULUAN

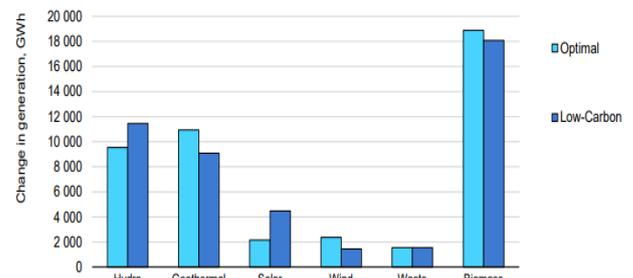
PADA beberapa tahun terakhir, kesadaran akan pencemaran lingkungan terus meningkat. Manusia mulai menyadari pencemaran lingkungan dari aktivitas sehari-hari pada akhirnya dapat membahayakan umat manusia itu sendiri. Terutama karena aktivitas manusia yang membutuhkan energi yang mayoritas berasal dari bahan bakar fosil. Gas buang dari pembakaran bahan bakar fosil adalah emisi gas rumah kaca yang bertindak seperti selimut yang melilit bumi, menjebak panas matahari dan menaikkan suhu. Setiap kenaikan nilai suhu yang di bumi semakin berbahaya bagi manusia.

Langkah yang dapat dilakukan untuk mencapai target Indonesia *Net Zero Emission* pada tahun 2060 adalah dengan meningkatkan efisiensi energi, menurunkan penggunaan energi berasal dari fosil, meningkatkan penggunaan energi terbarukan, dan meningkatkan adopsi penggunaan kendaraan listrik, serta penggunaan alat rumah tangga yang menggunakan energi listrik. Karena besarnya pembangkit listrik yang bersumber dari energi fosil, sektor energi Indonesia diketahui mewakili porsi sebesar 38% dari emisi CO₂ yaitu sebesar 224 MtCO₂ pada tahun 2019 [1].

Pada Gambar 1, grafik menunjukkan peningkatan emisi CO₂ sektor energi Indonesia tahun 2000 ke tahun 2019.



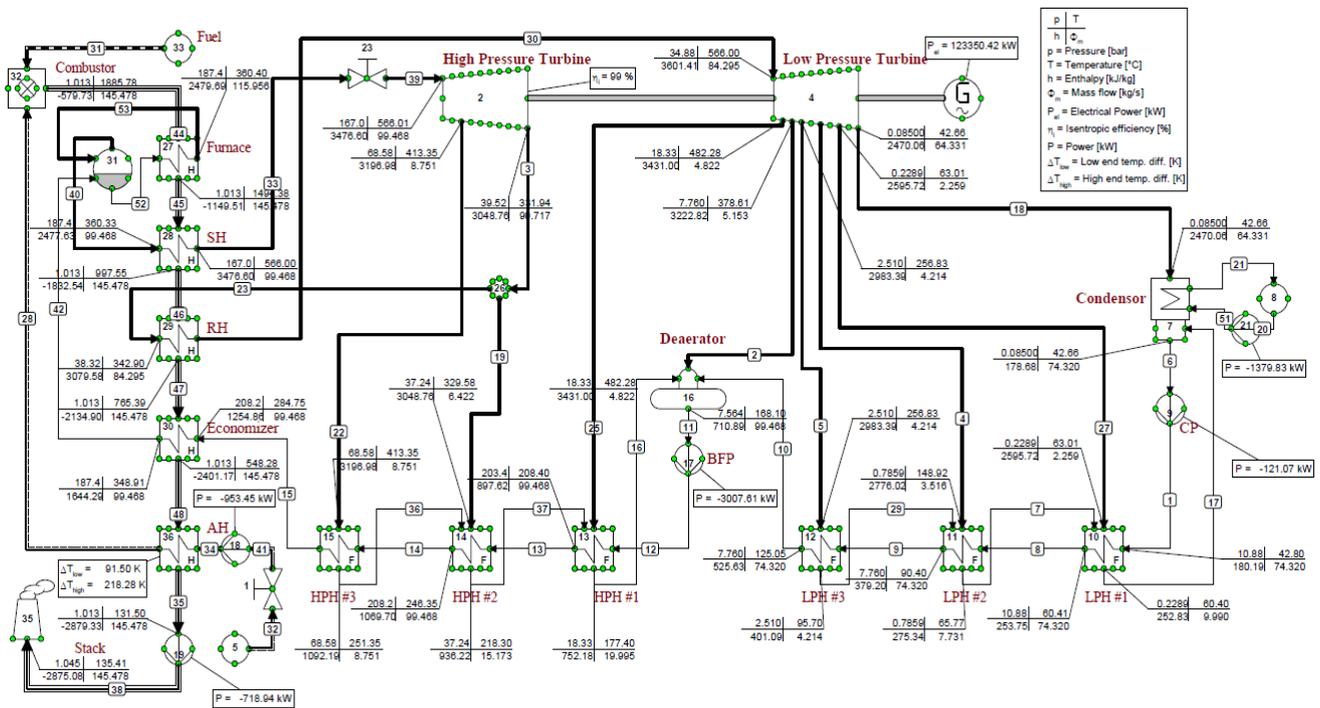
Gambar 1. Grafik emisi dari sektor energi di Asia.



Gambar 2. Perkembangan energi terbarukan di RUPTL.

Grafik diatas menunjukkan peningkatan signifikan intensitas emisi CO₂ lebih dari 200 MtCO₂ pada tahun 2019. Oleh karena itu, upaya untuk mengurangi emisi pada pembangkit listrik diseluruh Indonesia tentu berdampak besar pada penurunan emisi CO₂ setiap tahunnya. Pembangkit listrik yang bersumber dari batubara adalah aset negara yang bernilai besar, tentu akan disayangkan apabila pembangkit-pembangkit listrik dari batubara di Indonesia ditutup sepenuhnya. Penggunaan pembangkit listrik batubara dapat terus digunakan dengan melakukan implementasi teknologi *co-firing*. Co-firing atau co-combustion adalah proses pembakaran dua jenis bahan bakar berbeda dalam suatu sistem pembakaran yang sama dalam hal ini adalah batubara dengan biomassa [2]. Biomassa adalah material-material turunan yang berasal dari tumbuhan [3]. Co-firing biomassa mempunyai potensi untuk mengurangi emisi gas CO₂ dengan menggantikan 20% sampai 50% batubara [4]. Pada akhirnya penggunaan metode co-firing batubara dan biomassa akan menjadi solusi yang terbaik untuk mengurangi emisi pada pembangkit batubara yang sudah ada.

Pada Gambar 2, perkembangan energi menunjukkan dari tahun 2021 sampai 2025 pertumbuhan energi terbarukan akan berada di angka 41-46 TWh dengan biomassa sebagai pemegang persentase terbesar sebesar 40-42% untuk mencapai target yang dipatok oleh pemerintah termasuk 23% energi terbarukan pada 2025. Penggunaan biomassa yang menurunkan carbon yang dihasilkan oleh batubara menimbulkan masalah baru. Biomassa pada umumnya memiliki nilai kalor yang lebih rendah dibandingkan dengan



Gambar 3. Graphic user interface PLTU SulSel Barru Unit-2 pada cycle tempo.

batubara sehingga menghasilkan penurunan efisiensi pada pembangkit listrik yang mengimplementasikan *co-firing* batubara dan biomassa [5]. Penurunan efisiensi lebih lanjut dipengaruhi oleh *specific properties* dari batubara dan biomassa yang dipakai [6].

Oleh karena itu, proses torefaksi dapat dilakukan untuk meningkatkan kalori biomassa sehingga tidak menurunkan efisiensi pembangkit [7]. Proses torefaksi adalah proses pemanasan biomassa yang dengan moisture <10% pada suhu 200°C - 300°C [8]. Torefaksi dapat meningkatkan *fuel properties* biomassa dan memberikan pilihan teknis untuk memungkinkan *co-firing* batubara dan biomassa 100% dengan efisiensi maksimum, serta minimum emisi pada pembangkit listrik [9-10]. Penelitian ini dilakukan untuk mendukung implementasi *co-firing* pada pembangkit dan untuk mengetahui pengaruh biomassa torefaksi yaitu biomassa dengan kalori tinggi terhadap efisiensi boiler dengan menggunakan aplikasi cycle tempo.

II. METODE PENELITIAN

A. Studi Literatur

Pada tahap ini dilakukan literasi mengenai dasar teori yang berkaitan dengan prinsip kerja pembangkit, performa boiler, *Net Plant Heat Rate* (NPHR), *co-firing*, biomassa dan mempelajari software Asymptote yaitu Cycle-Tempo. Sumber dari literasi ini adalah dari buku termodinamika dan jurnal-jurnal internasional.

B. Pemodelan Cycle-Tempo

Pada penelitian menggunakan software cycle-tempo. Cycle tempo adalah program yang dikembangkan oleh perusahaan Advanced Simulation for Power and Total Energy (ASIMPTOTE) untuk penggunaan pemodelan termodinamika dan optimisasi dari sistem pada produksi listrik, panas, dan pendinginan. Sistem-sistem seperti itu pada umumnya terdiri dari berbagai siklus yang saling berhubungan, dan dengan penggunaan banyak peralatan.

Pada cycle-tempo terdapat juga pipa untuk menghubungkan peralatan-peralatan tersebut sehingga dapat membentuk jaringan massa dan energi yang kompleks. Begitu banyak konfigurasi yang dapat dibuat dengan cycle-tempo untuk menyelesaikan berbagai macam kasus yang ada.

Secara garis besar penggunaan cycle-tempo adalah menginput data seperti tekanan, temperature, dan mass flow rate pada apparatus yang ada. Kemudian menghubungkan apparatus satu dengan yang lainnya sehingga menjadi sebuah rangkaian sistem.

Tahap pemodelan *graphic user interface* (GUI) Cycle-Tempo dilakukan mengikuti *heat and mass balance* PLTU SulSel Barru Unit-2, diberikan pada Gambar 3. Dengan daya bersih yang dihasilkan sebesar 123 MW dari dua tingkatan turbin, yaitu turbin *high pressure* (HP), dan turbin *low pressure* (LP). Pembangkit menggunakan enam buah *closed feedwater heater* (3 HPH dan 3 LPH) dan satu buah daerator.

C. Variasi

Data bahan bakar pada Tabel 1 diambil dari data batubara untuk PLTU SulSel Barru Unit-2 dan untuk spesifikasi biomassa pada Tabel 2 diambil dari katalog produk milik produsen coconut charcoal, serta referensi [11].

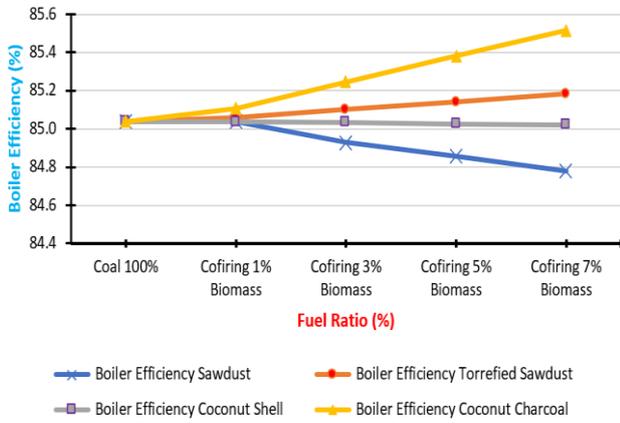
Dengan diketahuinya data-data bahan bakar batubara dan biomassa yang akan digunakan, berikut adalah contoh perhitungan campuran biomassa dan batubara.

Diketahui persentase Carbon (C) pada batubara adalah 44.47 %, dan persentase Carbon (C) pada coconut charcoal adalah 99.17 %. Sehingga pada *co-firing* batubara dengan coconut charcoal 1% persentase carbon sebesar

$$C \% = 0.99 \times 44.47 + 0.01 \times 90.92$$

$$C \% = 45.1622 \%$$

Dengan perhitungan yang sama akan digunakan untuk mendapatkan nilai campuran bahan bakar batubara dengan tiap-tiap biomassa pada rasio *co-firing* 1%, 3%, 5%, 7%.



Gambar 6. Boiler efficiency.

Parameter	UNIT	Coconut Charcoal	Coconut Shell	Torrefied Sawdust	Sawdust
Moisture	%	6	34.3	4.85	41.47
Ash	%	2.25	1.8	0.51	2.01
Volatile Matter	%	15	70.8	60.51	81.79
Fixed Carbon	%	76.5	21.8	35.46	12.11
GCV	kcal/kg	7502	4636	5430	2983
C	%	90.92	40.08	57.33	28.06
H	%	0.16	5.22	5.72	3.35
N	%	0.62	0.22	0.05	0.15
O	%	0	18.21	31.49	24.89
S	%	0.05	0.17	0.05	0.07

D. Perhitungan

1) Boiler Efficiency

Untuk menghitung efisiensi yang dihasilkan oleh boiler dapat dilakukan dengan dua metode, yaitu metode langsung (*direct method*) dan metode tidak langsung (*indirect method*) [12].

a. Direct Method

Metode ini disebut juga dengan metode input output, karena untuk menghitung metode ini hanya diperlukan input (yaitu bahan bakar) dan output (steam yang dihasilkan) untuk menghitung efisiensi dari boiler itu sendiri. Rumus efisiensi boiler direct method adalah sebagai berikut

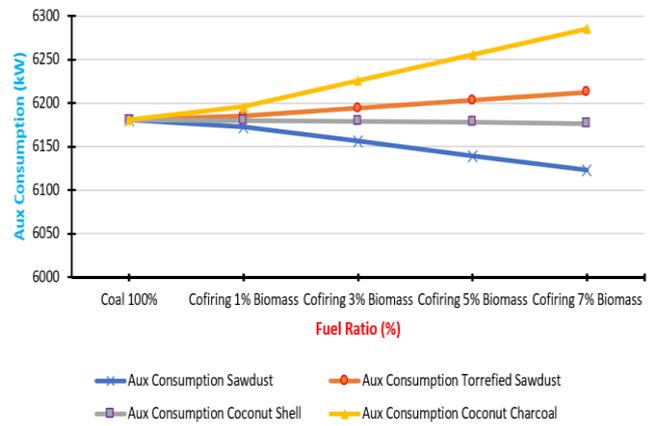
$$\eta_{boiler} = \frac{\text{energy output}}{\text{energy input}} \times 100\% \quad (1)$$

b. Indirect Method

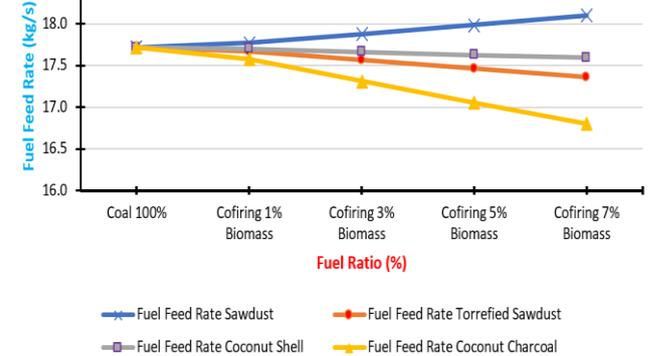
Metode perhitungan tidak langsung ini dilakukan dengan cara memperhitungkan semua loss yang terjadi pada boiler. Kekurangan pada metode direct dapat diselesaikan dengan metode ini.

$$\text{Boiler efficiency} = 100 - (L1 + L2 + \dots + L7 + L8) \quad (2)$$

Dengan keterangan L1 adalah *loss* yang diakibatkan oleh flue gas, L2 adalah *loss* yang diakibatkan oleh hidrogen pada bahan bakar, L3 adalah *loss* yang diakibatkan oleh kelembapan pada bahan bakar, L4 adalah *loss* yang diakibatkan oleh kelembapan pada udara, L5 adalah *loss* yang diakibatkan oleh karbon monoksida, L6 adalah *loss* yang diakibatkan oleh radiasi, dan konveksi, L7 adalah *loss* yang diakibatkan yang tidak terbakar pada *fly ash*, L8 adalah *loss* yang diakibatkan yang tidak terbakar pada *bottom as*.



Gambar 7. Auxiliary consumption.



Gambar 5. Fuel feed rate.

2) Net Plant Heat Rate

Net plant heat rate adalah parameter yang digunakan pada pembangkit pada umumnya untuk menunjukkan jumlah energi yang dibutuhkan generator untuk memproduksi listrik

$$NPHR = \frac{Q_{total} \times 0.24 \times 3600}{W_{net}} \quad (3)$$

3) Power Plant Efficiency

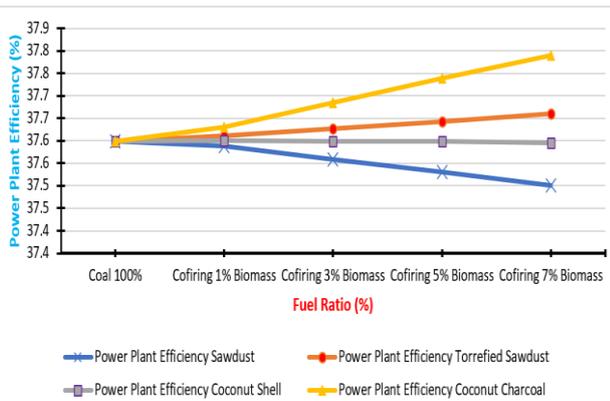
Efisiensi thermal digunakan untuk mengukur sejauh mana energi yang masuk dengan sistem dibandingkan dengan output energi yang dikeluarkan. Ditunjukkan dengan persamaan berikut [13]

$$\eta = \frac{W_{Turbin}}{Q_{boiler}} \times 100\% \quad (4)$$

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Air Feed Rate

Setiap biomassa yang dipakai memiliki komposisi *proximate analysis* dan *ultimate analysis* yang berbeda, sehingga kebutuhan udara seiring bertambahnya rasio cofiring menunjukkan perbedaan. Pada Gambar 4 mengenai kebutuhan udara, biomassa nontorefaksi menunjukkan penurunan kebutuhan udara seiring meningkatnya rasio cofiring sedangkan pada biomassa tertorefaksi menunjukkan peningkatan kebutuhan udara seiring meningkatnya rasio cofiring. Pada penggunaan sawdust pada co-firing 1% sampai 7% menunjukkan penurunan kebutuhan udara. Pada rasio cofiring sawdust 1%, 3%, 5%, dan 7% masing-masing menunjukkan kebutuhan udara sebesar 127,2057 kg/s, 126,1015 kg/s, 124,9973 kg/s, dan 123,8931 kg/s. Berbeda dengan sawdust yang belum diolah pada data penggunaan cofiring torrefied sawdust menunjukkan peningkatan kebutuhan



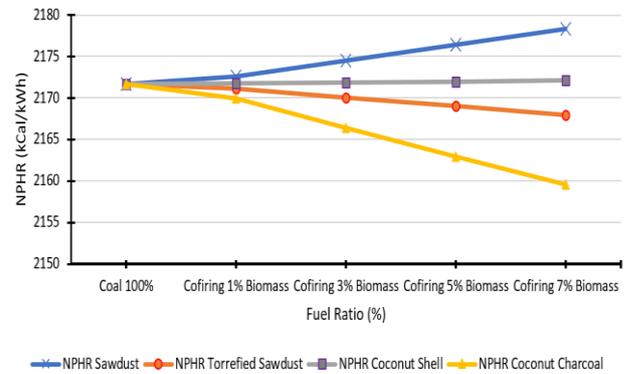
Gambar 8. Power plant efficiency.

udara. Pada rasio co-firing torrefied sawdust 1%, 3%, 5%, dan 7% masing-masing menunjukkan kebutuhan udara sebesar 128,0595 kg/s, 128,6629 kg/s, 129,2663 kg/s, dan 129,8696 kg/s. Pada rasio co-firing coconut shell 1%, 3%, 5%, dan 7% masing-masing menunjukkan kebutuhan udara sebesar 127,7138 kg/s, 127,6258 kg/s, 127,5278 kg/s, dan 127,4497 kg/s. Berbeda dengan coconut shell yang belum diolah pada data penggunaan co-firing coconut charcoal menunjukkan peningkatan kebutuhan udara. Pada rasio co-firing coconut charcoal 1%, 3%, 5%, dan 7% masing-masing menunjukkan kebutuhan udara sebesar 128,7829 kg/s, 130,8338 kg/s, 132,8331 kg/s, dan 134,9331 kg/s.

Kebutuhan udara dipengaruhi oleh komposisi yang dimiliki bahan bakar yang digunakan. Persentase carbon pada bahan bakar berpengaruh besar pada kebutuhan udara. Semakin besar persentase carbon pada bahan bakar maka semakin besar kebutuhan udara yang dibutuhkan untuk pembakaran dan semakin kecil persentase carbon pada bahan bakar maka semakin kecil kebutuhan udara yang dibutuhkan untuk pembakaran. Pada penggunaan bahan bakar sawdust yang memiliki nilai komposisi carbon yang rendah yaitu sebesar 28,06 % sedangkan pada bahan bakar torrefied sawdust memiliki nilai komposisi carbon yang tinggi yaitu sebesar 57,33%. Oleh karena itu kebutuhan udara pada saat penggunaan sawdust akan terus menurun sedangkan kebutuhan udara pada saat penggunaan torrefied sawdust akan terus semakin meningkat. Pada penggunaan bahan bakar coconut shell yang memiliki nilai komposisi carbon yaitu sebesar 40,08% sedangkan pada bahan bakar coconut charcoal memiliki nilai komposisi carbon yang tinggi yaitu sebesar 90,92%. Oleh karena itu kebutuhan udara pada saat penggunaan coconut shell akan terus menurun sedangkan kebutuhan udara pada saat penggunaan coconut charcoal akan terus semakin meningkat.

B. Fuel Feed Rate

Kebutuhan bahan bakar dipengaruhi oleh besaran nilai kalori yang dimiliki oleh bahan bakar. Pada hal ini sawdust yang mempunyai nilai kalor sebesar 2938 kCal/kg nilai lebih kecil dibandingkan nilai kalor batubara sebesar 4202 kCal/kg. Nilai kalori tinggi akan memberikan temperature pembakaran yang tinggi, sehingga saat co-firing dengan biomassa tertorefaksi yang memiliki nilai kalor yang lebih tinggi, jumlah bahan bakar yang dibutuhkan saat pembakaran tidak perlu sebanyak jumlah saat baseline. Pada HHV tinggi akan mengurangi kebutuhan bahan bakar sedangkan HHV rendah diperlukan untuk meningkatkan jumlah bahan bakar untuk



Gambar 9. Net plant heat rate.

mencapai nilai yang sama diserap pada saat kondisi baseline 100% batubara. Kebutuhan bahan bakar yang semakin sedikit menunjukkan peningkatan efisiensi pada boiler.

Pada Gambar 5 mengenai *fuel feed rate*, setiap biomassa menunjukkan perubahan kebutuhan bahan bakar seiring meningkatnya rasio co-firing. Pada co-firing sawdust pada rasio 1% sampai 7% menunjukkan peningkatan kebutuhan bahan bakar. Pada co-firing sawdust rasio 1%, 3%, 5%, dan 7% masing-masing sebesar 17,7735 kg/s, 17,8814 kg/s, 17,9907 kg/s, 18,1013 kg/s. Pada co-firing torrefied sawdust pada rasio 1% sampai 7% menunjukkan penurunan kebutuhan bahan bakar. Pada co-firing torrefied sawdust rasio 1%, 3%, 5%, dan 7% masing-masing sebesar 17,6684 kg/s, 17,5661 kg/s, 17,4650 kg/s, dan 17,3651 kg/s. Pada co-firing coconut shell rasio 1%, 3%, 5%, dan 7% masing-masing sebesar 17,7018 kg/s, 17,6654 kg/s, 17,6291 kg/s, 17,5931 kg/s. Pada co-firing coconut charcoal pada rasio 1% sampai 7% menunjukkan penurunan kebutuhan bahan bakar. Pada co-firing coconut charcoal rasio 1%, 3%, 5%, dan 7% masing-masing sebesar 17,5820 kg/s, 17,3123 kg/s, 17,0508 kg/s, dan 16,7970 kg/s.

C. Boiler Efficiency

Pada Gambar 6 mengenai grafik boiler efficiency menunjukkan bahwa penggunaan biomassa torrefaksi menghasilkan peningkatan efisiensi seperti pada nilai penggunaan biomassa torrefied sawdust dan coconut charcoal sedangkan pada penggunaan biomassa sawdust dan coconut shell menunjukkan penurunan efisiensi. Hal ini dikarenakan jumlah bahan bakar yang dibutuhkan untuk mengubah fase air menjadi uap lebih sedikit. Semakin sedikit energi yang dibutuhkan untuk mengubah fase air menjadi uap, semakin cepat mass flow rate dari steam.

Pada cofiring biomassa sawdust rasio 1%, 3%, 5%, dan 7% masing-masing efisiensi 85.038 %, 84.929%, 84.855%, 84.780%. Pada cofiring biomassa torrefied sawdust rasio 1%, 3%, 5%, dan 7% masing-masing efisiensi 85.059 %, 85.101%, 85.142%, 85.183%. Pada cofiring biomassa coconut shell rasio 1%, 3%, 5%, dan 7% masing-masing efisiensi 85.036 %, 85.031%, 85.026%, 85.022%. Pada cofiring biomassa coconut charcoal rasio 1%, 3%, 5%, dan 7% masing-masing efisiensi 85.108 %, 85.245%, 85.381%, 85.514%. Kedua biomassa torrefied sawdust dan coconut charcoal menunjukkan peningkatan efisiensi boiler yang sebelumnya sebesar 85.039%.

D. Auxiliary Consumption

Pada penggunaan biomassa yang berbeda menunjukkan nilai auxiliary consumption yang berbeda biomassa, dapat

dilihat pada Gambar 7. Hal ini terjadi karena adanya perubahan pasokan udara untuk disesuaikan dengan biomassa yang dipakai. Akibatnya *primary air fan, induced draft fan* akan membutuhkan daya lebih besar untuk mendorong angin.

Pada cofiring biomassa sawdust rasio 1%, 3%, 5%, dan 7% masing-masing *auxiliary consumption* adalah 6172.6 kW, 6156 kW, 6139.4 kW, 6122.8 kW. Pada cofiring biomassa torrefied sawdust rasio 1%, 3%, 5%, dan 7% masing-masing *auxiliary consumption* adalah 6185.3 kW, 6194.3 kW, 6203.1 kW, 6212 kW. Pada cofiring biomassa coconut shell rasio 1%, 3%, 5%, dan 7% masing-masing *auxiliary consumption* adalah 6180.3 kW, 6179 kW, 6177.7 kW, 6176.7 kW. Pada cofiring biomassa coconut charcoal rasio 1%, 3%, 5%, dan 7% masing-masing *auxiliary consumption* adalah 6195.8 kW, 6225.6 kW, 6255.4 kW, 6285.2 kW dimana pada cofiring coconut charcoal meningkatkan *auxiliary consumption* pembangkit yang semula sebesar 6180 kW.

E. Power Plant Efficiency

Penggunaan biomassa yang berbeda menghasilkan performa pembangkit yang berbeda. Pada Gambar 8, *power plant efficiency* menunjukkan kondisi efisiensi pembangkit dimana kedua cofiring dengan menggunakan biomassa seperti sawdust, coconut shell menunjukkan penurunan efisiensi sedangkan cofiring menggunakan coconut charcoal menunjukkan peningkatan efisiensi. Pada Gambar 8, *power plant efficiency* juga menunjukkan bahwa biomassa torrefaksi (seperti torrefied sawdust dan coconut charcoal) menunjukkan efisiensi yang lebih baik dibandingkan dengan biomassa yang belum diolah terlebih dahulu (seperti sawdust dan coconut shell). Seiring meningkatnya rasio co-firing setiap biomassa menunjukkan perubahan efisiensi.

Pada cofiring biomassa sawdust rasio 1%, 3%, 5%, dan 7% masing-masing efisiensi adalah 37.588%, 37.559%, 37.53%, 37.501%. Pada cofiring biomassa torrefied sawdust rasio 1%, 3%, 5%, dan 7% masing-masing efisiensi adalah 37.611%, 37.627%, 37.643%, 37.660%. Pada cofiring biomassa coconut shell rasio 1%, 3%, 5%, dan 7% masing-masing efisiensi adalah 37.601%, 37.599%, 37.598%, 37.596%. Pada cofiring biomassa coconut charcoal rasio 1%, 3%, 5%, dan 7% masing-masing efisiensi adalah 37.630%, 37.684%, 37.738%, 37.790% dimana pada cofiring coconut charcoal meningkatkan efisiensi pembangkit yang semula sebesar 37.598%. Hal ini disebabkan oleh efisiensi boiler yang meningkat menghasilkan mass flow rate steam generated yang lebih besar. Nilai mass flow rate steam yang lebih besar lebih cepat memutar turbin sehingga power yang dihasilkan generator akan lebih besar.

F. Net Plant Heat Rate

Nilai NPHR akan semakin baik apabila semakin kecil. Dari Gambar 9, grafik Net Plant Heat Rate, menunjukkan nilai NPHR pada simulasi co-firing menggunakan biomassa torrefaksi dan biomassa tanpa proses torrefaksi. Dua dari biomassa seperti sawdust dan coconut shell yang digunakan menunjukkan peningkatan nilai NPHR sedangkan simulasi co-firing menggunakan coconut charcoal dan torrefied sawdust menunjukkan penurunan NPHR yang lebih baik dibandingkan dengan menggunakan batubara 100%.

Besaran nilai NPHR ketika rasio cofiring menggunakan biomassa sawdust pada 1%, 3%, 5%, dan 7% adalah 2172.61, 2174.48, 2176.39, 2178.31. Besaran nilai NPHR ketika rasio

cofiring menggunakan biomassa torrefied sawdust pada 1%, 3%, 5%, dan 7% adalah 2171.15, 2170.09, 2169.04, 2167.98. Besaran nilai NPHR ketika rasio cofiring menggunakan biomassa coconut shell pada 1%, 3%, 5%, dan 7% adalah 2171.75, 2171.87, 2171.99, 2172.09. Besaran nilai NPHR ketika rasio cofiring menggunakan biomassa coconut charcoal pada 1%, 3%, 5%, dan 7% adalah 2169.91, 2166.41, 2162.99, 2159.60.

Biomassa torrefied sawdust dan coconut charcoal menunjukkan nilai yang lebih baik dibandingkan dengan NPHR batubara. Hal ini terjadi karena dengan adanya peningkatan efisiensi pada boiler menyebabkan pembangkit untuk lebih mudah menghasilkan energi. Pengaruh dari penggunaan biomassa tertorefaksi ini sesuai dengan teori yang dikemukakan oleh Jaap Kiel pada tahun 2008 tentang upaya meningkatkan persentase co-firing yang lebih tinggi dapat dilakukan apabila ada upaya peningkatan kualitas biomassa.

IV. KESIMPULAN/RINGKASAN

Berdasarkan hasil analisa maka diperoleh kesimpulan sebagai berikut: (1) *Air feed rate* berbanding terbalik dengan komposisi *volatile matter* yang terdapat pada biomassa. Semakin sedikit nilai VM sehingga dibutuhkan nilai *air feed rate* yang besar (*torrefied sawdust*, dan *coconut shell*) sedangkan nilai VM tinggi perlu diturunkan nilai *air feed rate*-nya. Nilai air feed rate disesuaikan juga dengan nilai carbon untuk menciptakan pembakaran sempurna. Nilai *air feed rate* yang semula bernilai 127.758 kg/s menunjukkan peningkatan pada saat penggunaan biomassa tertorefaksi (*torrefied sawdust* dan *coconut shell*). Peningkatan tertinggi ditunjukkan pada rasio cofiring 7% dengan nilai 129.87 kg/s untuk *torrefied sawdust*, 134.933 kg/s untuk *coconut charcoal*. (2) HHV tinggi yang dimiliki biomassa tertorefaksi menghasilkan temperature yang besar sehingga memungkinkan untuk menurunkan jumlah pasokan bahan bakar karena boiler lebih efisien. Penurunan terbesar *fuel feed rate* ditunjukkan pada rasio cofiring 7% dengan nilai 17.37 kg/s untuk *torrefied sawdust*, 16.8 kg/s untuk *coconut charcoal* yang semula *fuel feed rate* sebesar 17.72 kg/s. (3) Boiler yang effisiensinya lebih tinggi menyebabkan massflow rate steam lebih besar dan generated power yang lebih besar sehingga memungkinkan implementasi co-firing pada rasio yang lebih tinggi Peningkatan efisiensi tertinggi ditunjukkan pada rasio cofiring 7% dengan nilai 85.18% untuk *torrefied sawdust*, 85.51% untuk *coconut charcoal* yang sebelumnya bernilai 85.03%. Penurunan NPHR terbesar ditunjukkan pada rasio cofiring 7% dengan nilai 2167.98 untuk *torrefied sawdust*, 2159.6 untuk *coconut charcoal* yang sebelumnya bernilai 2171.66.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] International Energy Agency, "Enhancing Indonesia's Power System," IEA, Paris, 2022.
- [2] S. Suganal and G. K. Hudaya, "Bahan bakar co-firing dari batubara dan biomassa tertorefaksi dalam bentuk briket (skala laboratorium).," *J. Teknol. Miner. dan Batubara Ed. Januari 2019*, vol. 15, no. 1, pp. 31–48, 2019, doi: 10.30556/jtmb.Vol15.No1.2019.971.
- [3] U.S. Department of Energy, "Biomass Cofiring in Coal-Fired Boilers," Federal Energy Management Program, Washington DC, 2004.
- [4] P. Lempp, "Biomass Co-firing in Coal Power Plants," International Energy Agency-Energy Technology Systems Analysis Program (IEA-

- ETSAP) & International Renewable Energy Agency (IRENA), New York, 2013.
- [5] A. N. Sidiq, "Pengaruh co-firing biomassa terhadap efisiensi boiler PLTU Batubara," *KILAT*, vol. 11, no. 1, pp. 21–31, 2022, doi: 10.33322/kilat.v11i1.1553.
- [6] 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, doi: 10.3390/su4040462.
- [7] J. Kiel, "Increasing Cofiring Percentages in Existing Coal Fired Power Plants," Task 32 Biomass Combustion, Geertuidenberg, Netherlands, 2008.
- [8] J. S. Tumuluru, B. Ghiasi, N. R. Soelberg, and S. Sokhansanj, "Biomass torrefaction process, product properties, reactor types, and moving bed reactor design concepts," *Front. Energy Res.*, vol. 9, p. 728140, 2021, doi: 10.3389/fenrg.2021.728140.
- [9] O. S. Agu, L. G. Tabil, E. Mupondwa, and B. Emadi, "Torrefaction and pelleting of wheat and barley straw for biofuel and energy applications," *Front. Energy Res.*, vol. 9, p. 699657, 2021, doi: 10.3389/fenrg.2021.699657.
- [10] J. Li, X. Zhang, H. Pawlak-Kruczek, W. Yang, P. Kruczek, and W. Blasiak, "Process simulation of co-firing torrefied biomass in a 220 MWe coal-fired power plant," *Energy Convers. Manag.*, vol. 84, pp. 503–511, 2014, doi: 10.1016/j.enconman.2014.04.075.
- [11] P. Alizadeh, L. G. Tabil, P. K. Adapa, D. Cree, E. Mupondwa, and B. Emadi, "Torrefaction and densification of wood sawdust for bioenergy applications," *Fuels*, vol. 3, no. 1, pp. 152–175, 2022, doi: 10.3390/fuels3010010.
- [12] British Standards Institution, *BS 845-1: 1987 Methods for Assessing Thermal Performance of Boilers for Steam, Hot Water and High Temperature Heat Transfer Fluids. Part 1: Concise Procedure*. London: BSI, 1987. ISBN: 0 580 15856 X.
- [13] M. J. Moran and H. N. Shapiro, *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*. Sussex: John Wiley & Sons, 2018. ISBN: 978-1-119-39138-8.