

Pengaruh Co-Firing Biomassa Terhadap Efisiensi Boiler PLTU Batubara

Agus Noor Sidiq

PLN Pusdiklat UPDL Suralaya Indonesia

agus.ns@pln.co.id

ABSTRACT

The use of fossil fuels such as coal still dominates as fuel for power plants in the world. The use of fossil fuels in most power plants can increase Greenhouse Gas (GHG) emissions that affect climate change. Biomass is one of the renewable energy sources that is expected to reduce Greenhouse Gas emissions. The use of biomass energy sources as a mixture of fossil fuels known as co-firing in power plants has been widely done to reduce dependence on fossil fuels. In this research will be reviewed the influence of biomass mixture on the efficiency of coal power plant boilers. The composition of the mixture as well as the type of biomass used will greatly affect the efficiency of the Boiler. The percentage of biomass composition as well as the right combustion settings will be able to produce optimal boiler efficiency. From the study in this research, it is expected that it will be able to provide an overview of the performance of a power plant that performs co-firing so that in addition to getting the benefits of reducing greenhouse gas emissions, good boiler efficiency is also obtained.

Keywords: Biomass, Greenhouse Gas, Co-Firing , Boiler Efficiency

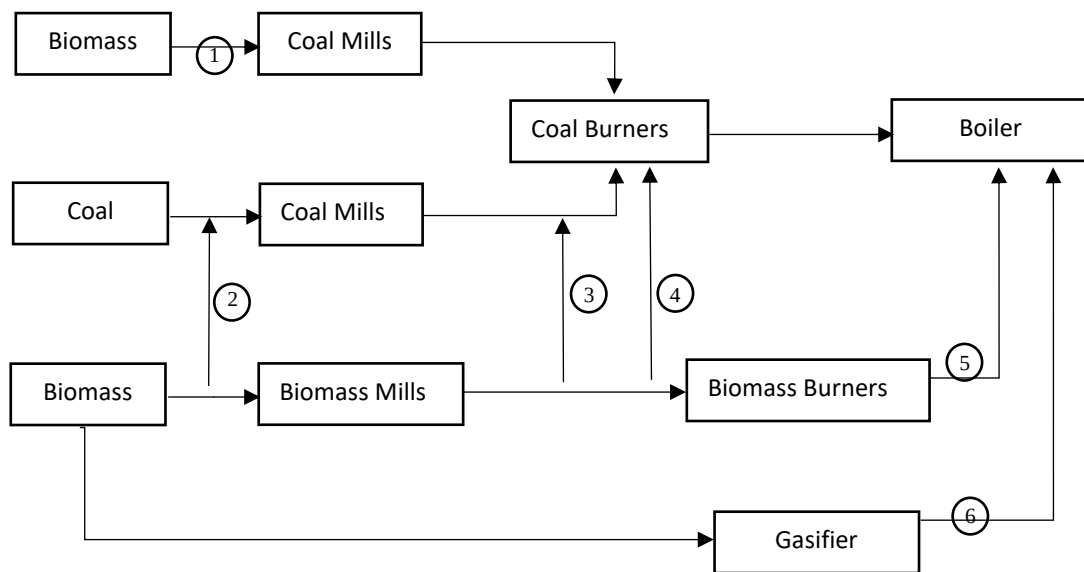
ABSTRAK

Penggunaan bahan bakar fosil seperti batu bara masih mendominasi sebagai bahan bakar Pembangkit Listrik di dunia. Penggunaan bahan bakar fosil pada kebanyakan Pembangkit Listrik dapat meningkatkan emisi Gas Rumah Kaca (GRK) yang mempengaruhi perubahan iklim. Biomassa merupakan salah satu dari sumber energi terbarukan yang diharapkan dapat mengurangi emisi Gas Rumah Kaca tersebut. Penggunaan sumber energi biomassa sebagai campuran bahan bakar fosil yang dikenal dengan istilah co-firing pada Pembangkit Listrik telah banyak dilakukan untuk mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil. Pada penelitian ini akan dikaji pengaruh campuran biomassa terhadap efisiensi Boiler PLTU batubara. Komposisi campuran serta jenis biomassa yang digunakan akan sangat berpengaruh pada efisiensi Boiler. Persentase komposisi biomassa serta setting pembakaran yang tepat akan dapat menghasilkan efisiensi Boiler yang optimal. Dari kajian dalam penelitian ini diharapkan akan dapat memberikan gambaran unjuk kerja suatu Pembangkit Listrik yang melakukan co-firing sehingga selain mendapatkan keuntungan pengurangan emisi gas rumah kaca juga didapatkan efisiensi Boiler yang baik.

Kata kunci: Biomassa, Gas Rumah Kaca, Co-Firing, Efisiensi

1. PENDAHULUAN

Upaya pengurangan penggunaan bahan bakar fosil pada pembangkit listrik dan pencegahan peningkatan emisi gas rumah kaca mendorong upaya peningkatan penggunaan teknologi energi yang berkelanjutan dan ramah lingkungan, Upaya yang dilakukan tersebut antara lain dengan cara pemanfaatan sumber energi biomassa. Secara prinsip kandungan energi pada biomassa umumnya relatif rendah maka campuran bahan bakar biomassa dan batubara menjadi salah satu alternatif solusi untuk mempertahankan kandungan energi yang diperlukan pada pembakaran. Campuran bahan bakar tersebut dapat melalui suatu metode yang disebut dengan *co-firing*. Istilah *co-firing* yang juga dikenal sebagai *co-combustion* adalah proses pembakaran dua jenis bahan bakar berbeda dalam suatu sistem pembakaran yang sama [1]. Berbagai metode pemanfaatan biomassa dan proses *co-firing* yang bisa dilakukan pada pembangkit listrik dijelaskan pada gambar 1 di bawah ini.



Gambar 1. Biomass Firing And Co-Firing Technology

Teknologi yang bisa digunakan dalam proses *biomass firing and co-firing technology* yang sesuai gambar 1 di atas dijelaskan sebagai berikut :

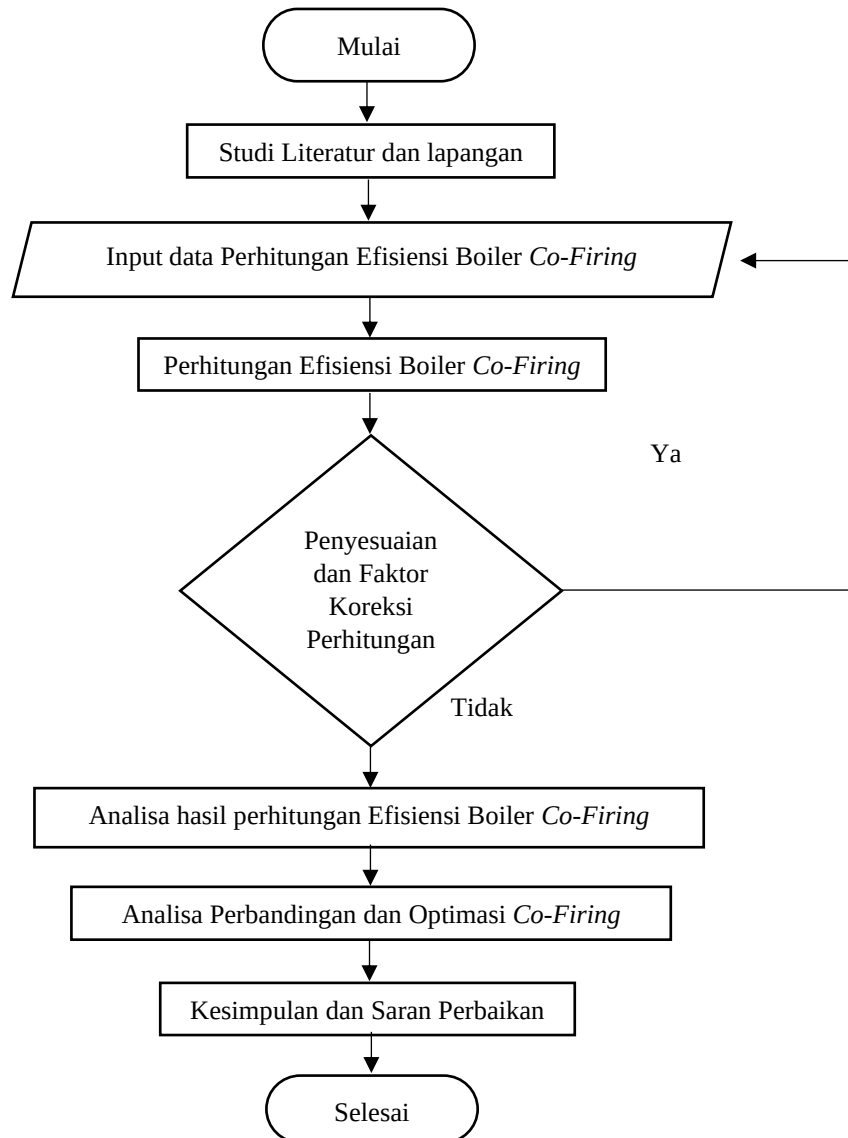
1. Biomassa diproses melalui *coal mill* yang sudah dimodifikasi.
2. *Pre-mixing* biomassa dan batubara, dan proses *milling* melalui *mill pulverizer* dan *coal pipe* eksisting menuju *coal burners*.
3. Biomassa melalui proses *milling* yang terpisah dan diinjeksi ke *coal pipe* eksisting menuju *coal burners*.
4. Injeksi biomassa ke furnace dengan modifikasi pada *coal burners* melalui *dedicated pipe biomass*.
5. Injeksi biomassa ke furnace dengan burner yang didedikasikan untuk biomassa.
6. Gasifikasi dari biomassa, dan pembakaran dengan gas pada boiler.

Pembakaran biomassa terkenal sebagai *zero CO₂* emisi, dengan kata lain metode ini tidak menyebabkan akumulasi molekul CO₂ di atmosfer, dan kandungan pada biomassa lebih sedikit sulfur jika dibandingkan dengan batubara. Oleh karena itu, teknologi *co-firing* batubara dan biomassa diharapkan dapat dengan efektif menurunkan emisi CO₂ dan SO_x jika dibandingkan dengan bahan bakar fosil [2].

Beberapa kelebihan sumber energi biomassa dibanding sumber energi yang lain adalah merupakan sumber energi yang dapat diperbaharui sehingga dapat menyediakan sumber energi secara berkesinambungan[3]. Kelebihan lainnya adalah pencampuran biomassa dan batubara yang baik dan homogen menghasilkan kandungan volatil yang lebih tinggi, yang merupakan prasyarat untuk pembakaran yang mudah dan lebih baik[4].

2. METODE PENELITIAN

Pusat Listrik Tenaga Uap (PLTU) merupakan pusat listrik dengan basis siklus rankine dimana energi listrik yang dihasilkan bersumber dari generator yang diputar oleh turbin uap yang memanfaatkan energi uap hasil penguapan air yang dipanaskan di dalam ruang boiler. Efisiensi Boiler merupakan parameter yang sangat penting untuk menilai keberhasilan suatu operasi PLTU batu bara. Dalam hal ini penulis ingin menitikberatkan pada efisiensi Boiler yang dapat dicapai pada saat dilakukan *co-firing*. *Co-firing* sendiri pada prakteknya di lapangan dilakukan dengan mencampurkan bahan bakar biomassa dengan batu bara dengan cara tertentu sesuai yang dijelaskan pada gambar 1 di atas, pencampuran biomassa dengan persentase tertentu terhadap total kebutuhan bahan bakar pada saat *co-firing* akan menghasilkan kualitas pembakaran yang berbeda. Dalam penelitian ini dibahas persentase campuran biomassa tertentu yang telah digunakan secara operasional pada sebuah PLTU. Untuk mendukung hal ini penelitian dilakukan dengan mengambil studi kasus pada pelaksanaan *co-firing* di PLTU Suralaya Unit 2 yang telah menerapkan *co-firing* dengan menggunakan biomassa jenis *saw dust* atau serbuk gergaji dengan metode *pre-mixing* sesuai gambar 1 di atas. Adapun metodologi penelitian yang digunakan dalam penelitian ini dijelaskan pada gambar 2 di bawah ini.



Gambar 2. Flowchart Metode Penelitian

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Sesuai dengan gambar 2 di atas yang menjelaskan tentang metode penelitian yang digunakan, maka di dalam penelitian ini dilakukan pengambilan data operasi dari PLTU Suralaya Unit 2 pada bulan Agustus 2021 sebagai data lapangan dan untuk input data perhitungan efisiensi Boiler co-firing.

Ada dua metode yang kita kenal untuk perhitungan efisiensi pada boiler, yaitu metode langsung dan metode tak langsung. Metode langsung/*direct methode*, atau dikenal juga sebagai metode *input-output*, dilakukan dengan cara membandingkan secara langsung energi panas yang terkandung pada *main steam* yang merupakan energi output, dengan energi panas yang digunakan dalam proses pembakaran bahan bakar di dalam ruang bakar boiler yang merupakan energi input[5]. Perhitungan yang digunakan untuk menghitung efisiensi boiler dalam penelitian ini adalah metode perhitungan langsung atau input-output yang digambarkan pada persamaan di bawah ini.

$$\eta = \frac{Q_{out}}{Q_{in}} \times 100\% \quad (1)$$

dimana :

η = Efisiensi Boiler

Q_{out} = Kalor output Boiler

Q_{in} = Kalor input Boiler

Untuk lebih detail perhitungan tentang metode input-output untuk perhitungan efisiensi boiler bisa dijelaskan pada tabel berikut.

Tabel 1. Perhitungan Energi Input

No	Parameter	Simbol	Satuan	Formula
1	Fuel Flow	m_{fuel}	Kg/s	Hasil pengukuran
2	Higher Heating Value	HHV	kJ/kg, kCal/kg	Hasil pengukuran
3	Energi Input	Q_{in}	kJ/s	$Q_{in} = m_{fuel} \times HHV$

Tabel 2. Perhitungan Energi Output

No	Parameter	Simbol	Satuan	Formula
1	Energi ke Main Steam	Q_{ms}	kJ/s	$(m_{ms} - m_{psw}) \times (h_{ms} - h_{fw})$
2	Energi ke SH Spray Water	Q_{psw}	kJ/s	$m_{psw} \times (h_{ms} - h_{psw})$
3	Energi ke Reheat Steam	Q_{rs}	kJ/s	$m_{rs} \times (h_{rso} - h_{rsi})$
4	Energi ke Reheat Spray	Q_{rsw}	kJ/s	$m_{rsw} \times (h_{rsi} - h_{rsw})$
5	Total Energi Output	Q_{out}	kJ/s	$Q_{ms} + Q_{psw} + Q_{rs} + Q_{rsw}$

Tabel 3. Perhitungan Efisiensi Boiler

No	Parameter	Simbol	Satuan	Formula
1	Efisiensi Boiler	η	%	$\frac{Q_{ms} + Q_{psw} + Q_{rs} + Q_{rsw}}{m_{fuel} \times HHV}$

Perhitungan efisiensi boiler secara metode langsung atau input-output tersebut mengambil data dari data operasional PLTU Suralaya Unit 2 saat dilakukan *co-firing* mulai tanggal 1 Agustus 2021 hingga tanggal 26 Agustus 2021, karena tercatat setelah tanggal 26 Agustus 2021 hingga akhir bulan tidak ada penerimaan biomassa sehingga kemungkinan tidak dilakukan *co-firing*.

Dari hasil pengolahan data lapangan yang diperoleh dari data operasional PLTU Suralaya Unit 2 didapatkan data keluaran rata-rata efisiensi dan beban yang dirangkum pada tabel di bawah.

Tabel 4. Data Hasil Perhitungan Efisiensi Boiler

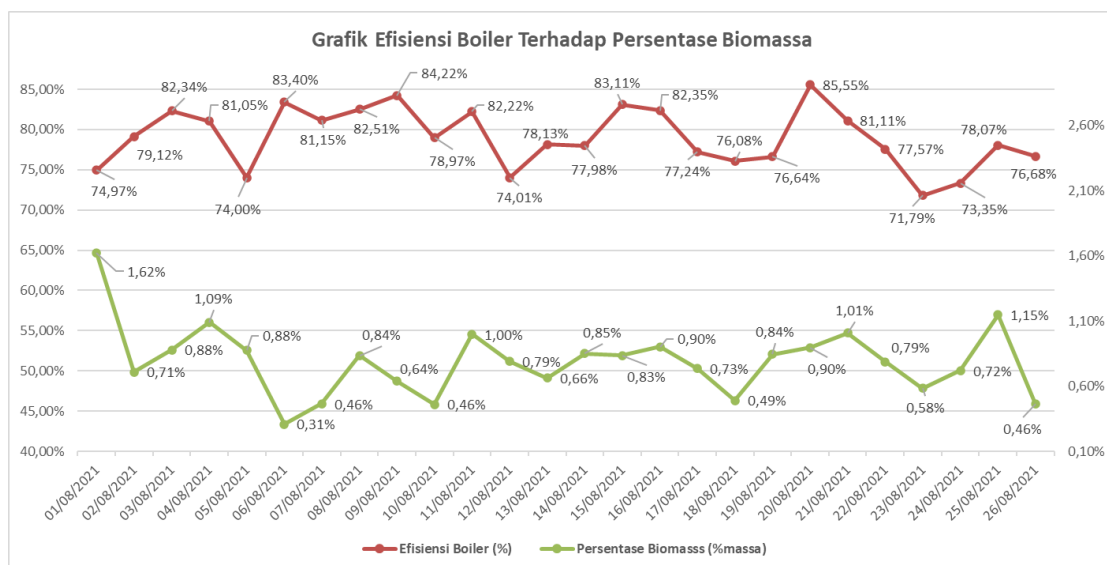
Tanggal	Beban Rata-Rata (MW)	Efisiensi Boiler Rata-Rata (%)	Persentase Biomassa (%massa)	Nilai Kalori Campuran Biomassa dan Batu Bara (kJ/kg)	Nilai Kalori Biomassa (kJ/kg)	Nilai Kalori Batu Bara (kJ/kg)
---------	----------------------	--------------------------------	------------------------------	--	-------------------------------	--------------------------------

01/08/2021	336,00	74,97	1,62	4834	1416	4890,3
02/08/2021	394,10	79,12	0,71	4887	1913	4908,2
03/08/2021	391,33	82,34	0,88	4499	1913	4521,9
04/08/2021	390,79	81,05	1,09	4641	1913	4671,0
05/08/2021	391,92	74,00	0,88	4382	1913	4403,8
06/08/2021	392,30	83,40	0,31	4846	1913	4855,0
07/08/2021	391,26	81,15	0,46	4529	1913	4541,2
08/08/2021	390,79	82,51	0,84	4547	1913	4569,2
09/08/2021	391,28	84,22	0,64	4552	1921	4568,9
10/08/2021	394,56	78,97	0,46	4538	1921	4550,1
11/08/2021	377,10	82,22	1,00	4627	1921	4654,3
12/08/2021	393,11	74,01	0,79	4607	1921	4628,4
13/08/2021	393,35	78,13	0,66	4809	1921	4828,3
14/08/2021	393,09	77,98	0,85	4754	1921	4778,3
15/08/2021	393,29	83,11	0,83	4602	1921	4624,6
16/08/2021	393,75	82,35	0,90	4367	2922	4380,1
17/08/2021	393,64	77,24	0,73	4859	2922	4873,3
18/08/2021	397,79	76,08	0,49	4854	2922	4863,5
19/08/2021	399,72	76,64	0,84	4815	2922	4831,1
20/08/2021	399,56	85,55	0,90	4484	2922	4498,1
21/08/2021	368,11	81,11	1,01	4208	2922	4221,1
22/08/2021	368,68	77,57	0,79	4606	2922	4619,4
23/08/2021	392,57	71,79	0,58	4839	2936	4850,2
24/08/2021	393,48	73,35	0,72	4690	2936	4702,7
25/08/2021	393,48	78,07	1,15	4706	2936	4726,5
26/08/2021	399,49	76,68	0,46	4499	2936	4506,3

Penelitian ini hanya berfokus pada analisa efisiensi boiler pada saat dilakukan *co-firing* saja meskipun ada beberapa penelitian yang dilakukan terhadap *co-firing biomass* yang mengkaji dampak dari pembakaran bersama biomassa pada kinerja pembangkit listrik kemudian dievaluasi dalam hal efisiensi energi, konsumsi daya tambahan, biaya modal, biaya operasional & pemeliharaan (O&M), emisi CO₂ spesifik, biaya listrik dan biaya penghindaran CO₂[6].

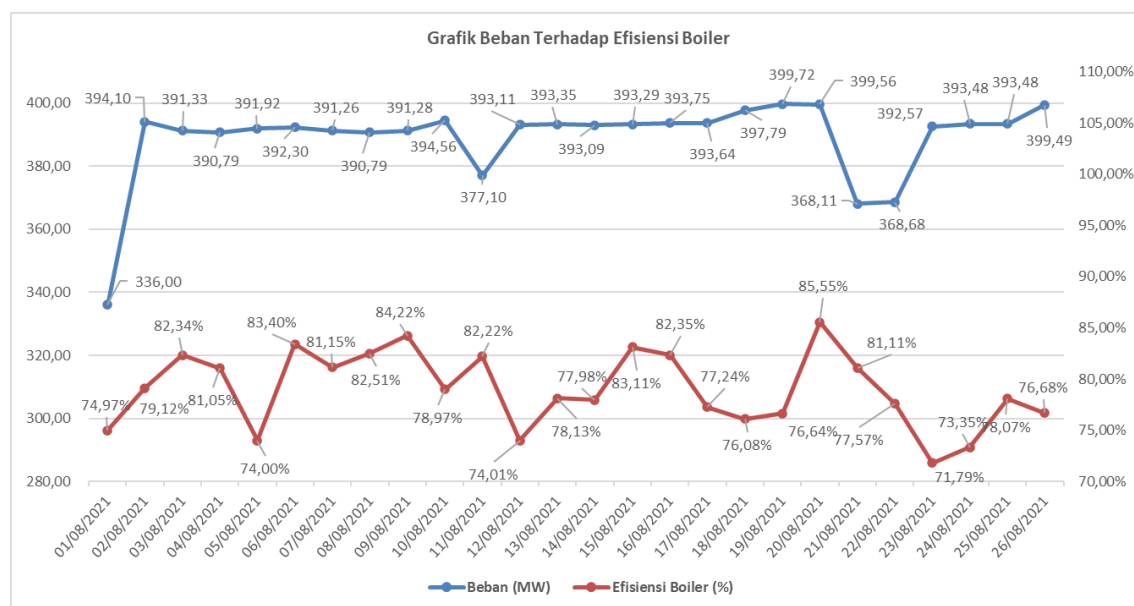
Pada penelitian ini penulis mengolah data lapangan sesuai dengan perhitungan yang dijelaskan pada tabel 1, 2, dan 3 tentang perhitungan efisiensi boiler secara input-output. Adapun perhitungan ini adalah perhitungan ketika dilakukan proses *co-firing* pada PLTU Suralaya Unit 2.

Berikut adalah grafik yang menggambarkan hubungan antara efisiensi boiler dengan persentase biomassa yang digunakan selama *co-firing*.



Gambar 3. Grafik Efisiensi Boiler terhadap Persentase Biomassa

Berikut adalah grafik yang menggambarkan hubungan antara beban dengan efisiensi boiler dalam pelaksanaan *co-firing*.



Gambar 4. Grafik Efisiensi Boiler terhadap Persentase Biomassa

Dari gambar 3 dan 4 bisa dijelaskan bahwa maksimal persentase biomassa yang digunakan adalah hanya sekitar 1,62% saja dan itu terjadi pada tanggal 1 Agustus 2021, tetapi karena beban pada tanggal tersebut rata-rata rendah hanya sekitar 336 MW maka didapatkan efisiensi boiler hanya 74,97%. Efisiensi tertinggi didapat sekitar 85,55% dengan campuran biomassa 0,9% dengan beban rata-rata 399,56 MW pada tanggal 20 Agustus 2021. Efisiensi terendah didapat sekitar 71,79% dengan campuran biomassa 0,58% padahal beban saat itu rata-rata cukup tinggi yaitu sekitar 392,57 MW, hal ini kemungkinan terjadi anomali yang terjadi pada proses pengoperasian yang menyebabkan efisiensinya saat itu menjadi rendah.

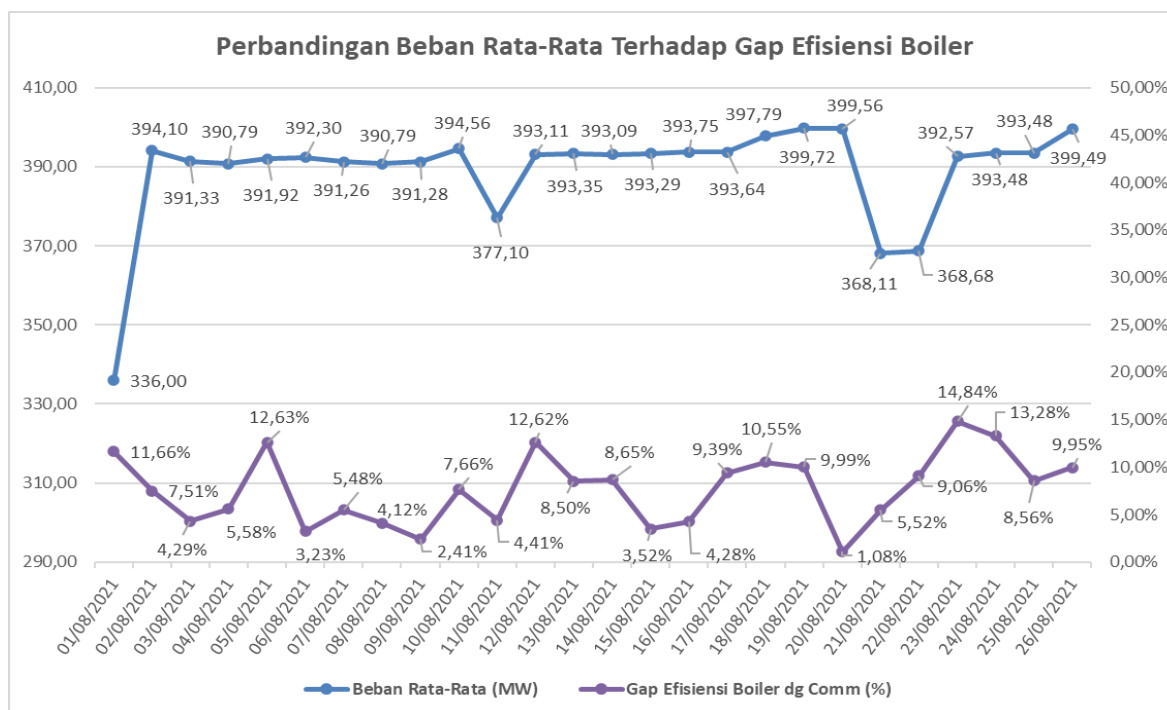
Campuran biomassa yang digunakan maksimal hanya 1,62% saja sehingga dalam hal ini tidak terlalu berpengaruh terhadap efisiensi boiler secara keseluruhan. Dari data yang didapat tersebut efisiensi boiler lebih banyak dipengaruhi oleh pola pengoperasian yang dilakukan oleh operator. Kondisi *pre-mixing* antara biomassa dan batu bara menjadi faktor yang sangat penting dalam keberhasilan *co-firing*. Campuran antara biomassa dan batu bara harus betul-betul homogen sehingga didapatkan pembakaran campuran biomassa dan batubara yang optimal.

Berdasarkan data hasil komisioning pada saat beban penuh 100% MCR efisiensi boiler adalah 86,63%. Perbandingan efisiensi boiler aktual terhadap data komisioning ditampilkan pada tabel berikut.

Tabel 5. Efisiensi Boiler Aktual Terhadap Komisioning

TGL	Beban Rata-Rata (MW)	Efisiensi Boiler Rata-Rata (%)	Efisiensi Boiler Komisioning 100% MCR	Gap Efisiensi (%)
01/08/2021	336,00	74,97	86,63%	11,66
02/08/2021	394,10	79,12	86,63%	7,51
03/08/2021	391,33	82,34	86,63%	4,29
04/08/2021	390,79	81,05	86,63%	5,58
05/08/2021	391,92	74,00	86,63%	12,63
06/08/2021	392,30	83,40	86,63%	3,23
07/08/2021	391,26	81,15	86,63%	5,48
08/08/2021	390,79	82,51	86,63%	4,12
09/08/2021	391,28	84,22	86,63%	2,41
10/08/2021	394,56	78,97	86,63%	7,66
11/08/2021	377,10	82,22	86,63%	4,41
12/08/2021	393,11	74,01	86,63%	12,62
13/08/2021	393,35	78,13	86,63%	8,50
14/08/2021	393,09	77,98	86,63%	8,65
15/08/2021	393,29	83,11	86,63%	3,52
16/08/2021	393,75	82,35	86,63%	4,28
17/08/2021	393,64	77,24	86,63%	9,39
18/08/2021	397,79	76,08	86,63%	10,55
19/08/2021	399,72	76,64	86,63%	9,99
20/08/2021	399,56	85,55	86,63%	1,08
21/08/2021	368,11	81,11	86,63%	5,52
22/08/2021	368,68	77,57	86,63%	9,06
23/08/2021	392,57	71,79	86,63%	14,84
24/08/2021	393,48	73,35	86,63%	13,28
25/08/2021	393,48	78,07	86,63%	8,56
26/08/2021	399,49	76,68	86,63%	9,95

Berikut adalah grafik yang menunjukkan perbandingan beban rata-rata *co-firing* terhadap gap efisiensi terhadap data komisioning.



Gambar 5. Grafik Perbandingan Beban Rata-Rata Terhadap Gap Efisiensi Boiler

Berdasarkan grafik di atas gap efisiensi boiler terhadap komissioning yang paling kecil adalah 1,08% pada tanggal 20 Agustus 2021 pada beban rata-rata 399,56 MW. Berdasarkan data ini bisa diambil kesimpulan bahwa kondisi *pre-mixing* biomassa dan batu bara serta pola operasi pada tanggal 20 Agustus 2021 menunjukkan kondisi yang optimal sehingga data-data operasi pada tanggal tersebut bisa dijadikan acuan atau *baseline* untuk menjalankan pengoperasian *co-firing* selanjutnya. Adapun gap efisiensi tertinggi sebesar 14,84% terjadi pada tanggal 23 Agustus 2021 dengan beban rata-rata 392,57 MW, hal ini menunjukkan adanya anomali yang harus ditelusuri lebih lanjut terhadap pola pengoperasian dan juga kondisi operasional serta kondisi peralatan lainnya.

Pembangkit listrik berbahan bakar batu bara adalah sumber emisi karbon dioksida (CO₂) terbesar ke atmosfer, dan emisi ini dapat dikurangi secara efektif dengan meningkatkan efisiensi pembangkit[7].

Pelaksanaan *co-firing* batubara dan biomassa di pembangkit listrik eksisting dapat menimbulkan pengaruh besar dalam penggunaan sumber daya energi terbarukan dan pengurangan emisi karbon[8].

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Dari hasil penelitian yang dilakukan bisa didapatkan suatu kesimpulan bahwa pelaksanaan *co-firing* akan sangat penting dilakukan dalam rangka untuk meningkatkan rasio energi baru terbarukan serta penurunan emisi gas rumah kaca ke atmosfer. Pada kasus pelaksanaan *co-firing* di PLTU Suralaya Unit 2 dengan campuran rata-rata hanya sebesar 1% tidak terlalu berpengaruh besar terhadap efisiensi boiler, pengaruh terbesar justru pada pola pengoperasian serta kondisi peralatan serta kemampuan *pre-mixing* antara biomassa dan batu bara. Dari hasil pembahasan diketahui bahwa pelaksanaan *co-firing* ini masih bisa menghasilkan efisiensi boiler yang baik terbukti gap efisiensi terhadap komissioning ada yang bisa hanya mencapai 1%, sehingga pada hakikatnya pelaksanaan *co-firing* ini masih bisa dilakukan asalkan pola pengoperasian dan kondisi *pre-mixing* campuran betul-betul diperhatikan dengan seksama.

Dari hasil pembahasan juga bisa diambil kesimpulan bahwa ada data tanggal 20 Agustus 2021 yang bisa dijadikan acuan atau *baseline* untuk melakukan pengoperasian *co-firing* karena data operasi menunjukkan kondisi yang baik dan optimal walaupun campuran yang diberikan hanya sekitar 0,9%.

Saran yang bisa diberikan adalah perlu dilakukan perbaikan pada *pre-mixing* atau pencampuran biomassa dengan batu bara sehingga didapatkan campuran yang homogen dan menghasilkan pembakaran yang baik pada boiler serta mengurangi dampak gangguan yang terjadi pada peralatan yang beroperasi. Kemudian untuk selanjutnya pelaksanaan *co-firing* ini bisa ditingkatkan rasio campuran biomassa dengan batu bara sehingga bisa didapatkan lagi data pada kondisi campuran yang lebih tinggi dan bisa dianalisa lebih lanjut, karena pada kondisi campuran rata-rata hanya sekitar 1% kita belum bisa melihat efek yang sesungguhnya terjadi terhadap efisiensi pada kondisi pelaksanaan *co-firing* tersebut.

Pemanfaat teknologi *co-firing* ini diharapkan tidak terhenti sampai di sini tetapi harus semakin berkembang lagi untuk semua jenis PLTU batu bara yang ada di Indonesia. Hal ini secara umum berkaitan juga dengan isu secara global, isu-isu seperti perubahan iklim dan menipisnya bahan bakar fosil telah memicu pengembangan dan pemanfaatan energi terbarukan biomassa untuk mengurangi ketergantungan pembangkit listrik dengan bahan bakar fosil[9].

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan rasa terima kasih dan apresiasi yang setinggi-tingginya kepada rekan-rekan dari PT Indonesia Power khususnya bagian operasi PLTU Suralaya Unit 2 yang telah memberi bantuan berupa data parameter pengoperasian yang membantu pelaksanaan penelitian ini dan juga kepada banyak pihak yang telah mendukung hingga tahap akhir penulisan artikel ilmiah ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] 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*, vol. 15, no. 1, pp. 31–48, 2019, doi: 10.30556/jtmb.vol15.no1.2019.971.
- [2] I. Suprpta Winaya and I. Darma Susila, "Co-Firing Sistem Fluidized Bed Berbahan Bakar Batubara dan Ampas Tebu," *J. Energi Dan Manufaktur*, vol. 4, no. 2, 2010.
- [3] A. Arhamsyah, "PEMANFAATAN BIOMASSA KAYU SEBAGAI SUMBER ENERGI TERBARUKAN," *J. Ris. Ind. Has. Hutan*, vol. 2, no. 1, 2010, doi: 10.24111/jrihh.v2i1.914.
- [4] P. K. W. Likun, H. Zhang, and R. Xiao, "Co-firing behaviors and kinetics of different coals and biomass," *J. Biobased Mater. Bioenergy*, vol. 11, no. 2, 2017, doi: 10.1166/jbmb.2017.1655.
- [5] A. Sugiharto, "Perhitungan Efisiensi Boiler Dengan Metode Secara Langsung pada Boiler Pipa Api," *Maj. Ilm. Swara Patra*, vol. 10, no. 2, pp. 51–57, 2020, doi: 10.37525/sp/2020-2/260.
- [6] S. Fogarasi and C. C. Cormos, "Technico-economic assessment of coal and sawdust co-firing power generation with CO₂ capture," *J. Clean. Prod.*, vol. 103, 2015, doi: 10.1016/j.jclepro.2014.07.044.
- [7] D. Cebrucean, V. Cebrucean, and I. Ionel, "Modeling and performance analysis of subcritical and supercritical coal-fired power plants with biomass co-firing and CO₂ capture," *Clean Technol. Environ. Policy*, vol. 22, no. 1, 2020, doi: 10.1007/s10098-019-01774-1.

- [8] X. Wang *et al.*, “Experimental study and design of biomass co-firing in a full-scale coal-fired furnace with storage pulverizing system,” *Agronomy*, vol. 11, no. 4, 2021, doi: 10.3390/AGRONOMY11040810.
- [9] Y. Jiang, K. H. Park, and C. H. Jeon, “Feasibility study of co-firing of torrefied empty fruit bunch and coal through boiler simulation,” *Energies*, vol. 13, no. 12, 2020, doi: 10.3390/en13123051.