



BIOMASSA SEBAGAI SOLUSI ENERGI TERBARUKAN UNTUK PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP: KAJIAN PENGGUNAAN DAN EFISIENSI

Gian Bachtiar^{a*}, Dani Rusirawan^a

^aProgram Studi Magister Teknik Mesin, Institut Teknologi Nasional Bandung, Jl. PH. H. Mustofa No. 23 – Bandung, 40124 Indonesia

*Corresponding authors at: bachgian3@gmail.com (G. Bachtiar) Telp: 082126547782

INFO ARTIKEL

Riwayat artikel:

Diajukan pada 11 Januari 2025

Direvisi pada 21 Juni 2025

Disetujui pada 30 Juli 2025

Tersedia daring pada 20 Agustus 2025

Kata kunci:

Co-firing, efisiensi, gas rumah kaca.

Keywords:

Co-firing, efficiency, greenhouse gas

ABSTRAK

Kebutuhan energi di dunia semakin meningkat, namun emisi gas rumah kaca juga meningkat akibat penggunaan bahan bakar fosil seperti batu bara yang masih mendominasi sebagai bahan bakar Pembangkit Listrik di dunia. Realisasi komitmen peralihan penggunaan bahan bakar fosil menuju energi baru terbarukan membutuhkan waktu yang lama maka perlu upaya untuk solusi jangka pendek terutama mengurangi emisi gas rumah kaca. Salah satu upaya adalah penggunaan biomassa sebagai bahan bakar pada *steam power plant*. Pada artikel ini diawali dengan penjelasan metode simulasi pemodelan menggunakan perangkat lunak Ebilson® professional, untuk mendapatkan analisa performa penggunaan biomassa pada *steam power plant*. Selanjutnya dijelaskan juga metode pengaplikasian biomassa sebagai campuran bahan bakar fosil atau dikenal dengan istilah *co-firing* pada Pembangkit Listrik, sistem ini banyak dilakukan untuk mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil dan solusi jangka pendek untuk mengurangi emisi gas rumah kaca. Terakhir disajikan hasil dari metode simulasi dan penggunaan sistem *co-firing* dapat mengurangi emisi gas rumah kaca yang signifikan dengan nilai 1.000.000 t/tahun, merujuk dari hasil penelitian yang sudah ada.

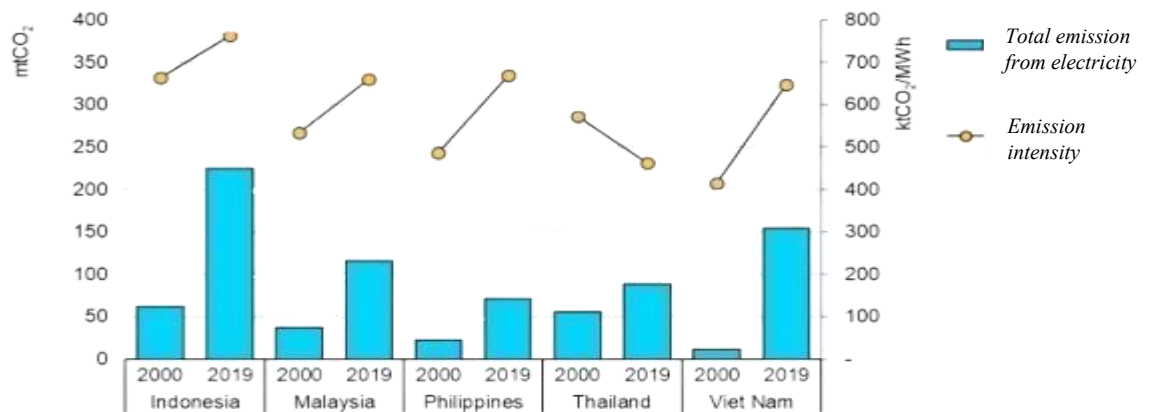
ABSTRACT

The global energy demands increase every year, which leads to an increase in greenhouse gas emissions due to the use of fossil fuels such as coal, which is still the dominant fuel for power plants worldwide. The commitment to switch the use of fossil fuels to renewable energy sources takes a long time, and therefore, efforts are needed for short-term solutions, especially to reduce greenhouse gas emissions. One effort is to use biomass as a fuel in steam power plants. This article begins with a description of the modeling simulation method using Ebilson® software to analyze the performance of biomass use in steam power plants. The method of burning biomass alongside fossil fuels (also known as co-firing) in power plants is also described. This system is often used to reduce dependence on fossil fuels and is a short-term solution to reduce greenhouse gas emissions. Finally, the results of the simulation method and the use of a co-firing system are presented, which can reduce greenhouse gas emissions significantly by 1,000,000 t/year, based on existing research results.

1. PENGANTAR

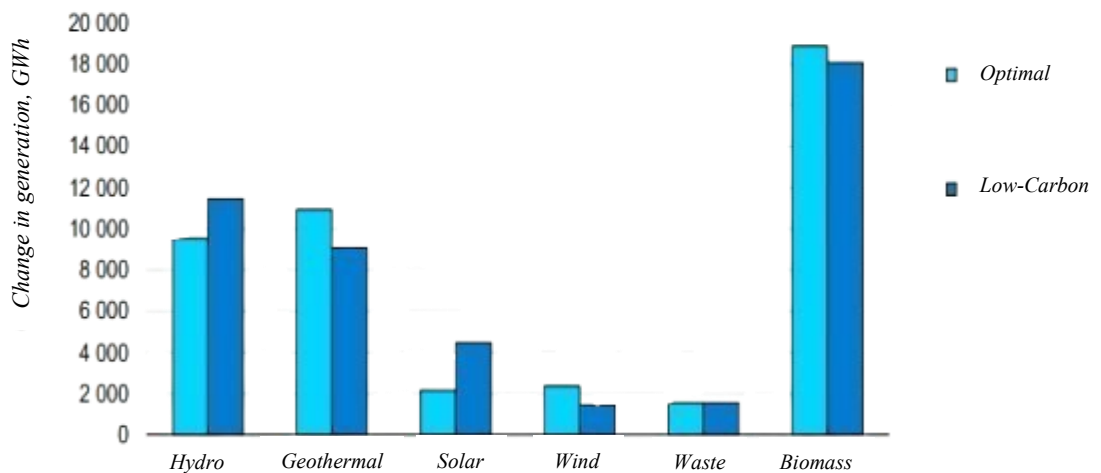
Energi menjadi salah satu topik pembicaraan pada tingkat nasional maupun internasional. Energi merupakan salah satu kebutuhan pokok, dan disadari bahwa konsumsi energi terus meningkat setiap tahunnya. Pada proses penyediaan tenaga listrik memiliki beberapa masalah yang muncul, seperti regulasi terhadap penyediaan listrik, lebih khusus lagi besaran emisi pada pembangkit listrik. Pembangkit listrik dengan bahan bakar batu bara di seluruh dunia mendapatkan rekor tertinggi dalam beberapa tahun terakhir, dengan menghasilkan lebih dari 36 % total listrik yang di produksi. Akibatnya gas emisi CO₂ dari pembangkit listrik yang menggunakan bahan bakar batu bara meroket dan menjadi salah satu penghasil emisi terbesar CO₂ di dunia (Agus dkk, 2024). Secara kumulatif emisi CO₂ yang dihasilkan oleh

pembakaran batu bara pada pembangkit listrik tenaga uap menyumbang sekitar 30% dari emisi CO₂ secara global (Chen & Liu 2023). Saat ini pembangkit listrik dengan menggunakan energi terbarukan sudah banyak di dimanfaatkan untuk mengurangi emisi CO₂ (Uchino, Yasui, & Fushimi 2021). Oleh karena itu perlu adanya inovasi energi baru dan terbarukan yang menjadi fokus sebagai transisi dari pembangkit listrik energi konvensional diantaranya pembangkit listrik tenaga air, pembangkit listrik tenaga angin, pembangkit listrik tenaga surya dan biomassa. Hal tersebut sejalan dengan mengurangi efek gas rumah kaca (GRK) pada atmosfer.



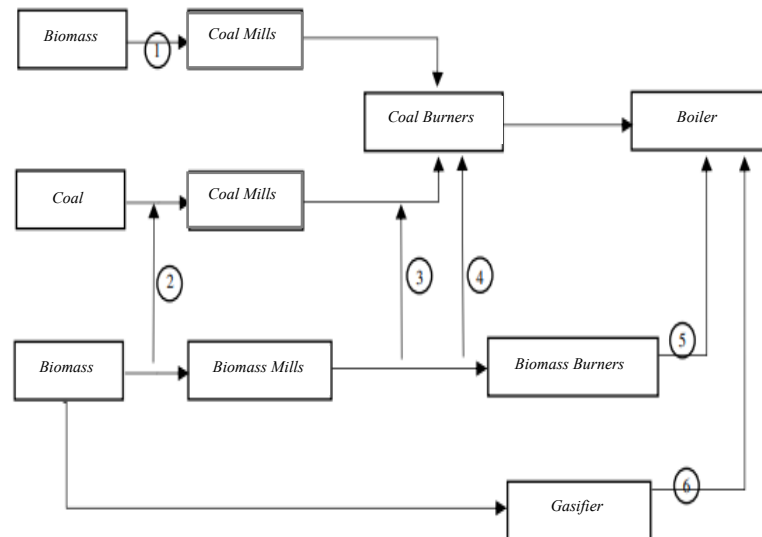
Gambar 1: Grafik Emisi Sektor Asia

Salah satu factor yang berpengaruh adalah dari penggunaan bahan bakar fosil pada pembangkit listrik tenaga uap, Dimana dari aktivitas pembangkit listrik tenaga uap pada pembakaran batu bara dihasilkan *carbon dioxide, sulphur dioxide, nitrogen oxides*. Untuk mengurangi efek gas rumah kaca seperti yang telah disebutkan maka perlu dilakukan optimasi pada pembangkit listrik tenaga uap agar konsumsi batu bara dapat dikurangi atau diganti dengan penggunaan biomassa dan berujung pada meningkatnya efisiensi *thermal* pada pembangkit listrik tenaga uap (Roy dkk, 2024). Biomassa menjadi salah satu alternatif untuk menggantikan bahan bakar fosil untuk pembangkit listrik tenaga uap dikarenakan sumber daya biomassa yang melimpah, selain itu pembakaran biomassa terkenal sebagai *zero CO₂* emisi dengan kata lain metode penggantian bahan bakar menggunakan biomassa tidak menyebabkan akumulasi molekul CO₂ di atmosfer, (Wang dkk, 2024). Penggunaan biomassa pada pembangkit listrik tenaga uap ditujukan untuk memaksimalkan efisiensi energi (Chantasiriwan 2023). Biomassa merupakan sebuah istilah yang digunakan untuk merujuk pada senyawa organik apapun yang berasal dari tanaman pertanian, alga dan limbah organik.



Gambar 2: Perkembangan Energi Terbarukan

Secara definisi *co-firing* merupakan pembakaran dua jenis bahan bakar yang berbeda dalam suatu system pembakaran yang sama. Sistem *co-firing* dianggap menjadi pilihan jangka pendek yang menarik untuk di aplikasikan dalam upaya penurunan emisi CO₂ pada pembangkit listrik tenaga uap, selain itu tujuan dari *co-firing* adalah untuk mengurangi pemakaian batubara dengan bahan bakar energi terbarukan dalam perbandingan tertentu dengan tetap mempertimbangkan kualitas bahan bakar sesuai keperluan (Huang & Feng 2024b). Menurut penelitian (Fawzy dkk, 2017) dengan adanya proses *co-firing* pada boiler tentunya akan memberikan dampak secara langsung terhadap boiler dan alat bantuannya, hal tersebut didukung dengan adanya peneliti-peneliti terdahulu. Substitusi bahan bakar alternatif dalam sistem ini berkisar 3% sampai 10%, semakin tinggi konsumsi bahan bakar alternatif maka semakin rendah gas rumah kaca yang dihasilkan. penggunaan system *co-firing* dapat memberikan keuntungan *heat supply* yang baik. Penggunaan sistem ini bertujuan untuk mengurangi pemakaian batu bara dengan bahan bakar energi terbarukan dalam perbandingan tertentu dengan tetap mempertimbangkan kualitas bahan bakar dengan metode pemanfaatan system *co-firing* seperti yang ditunjukkan Gambar 3.



Gambar 3: Proses *Co-firing*

Teknologi pemanfaatan biomassa pada *system co-firing* yang ditunjukkan Gambar 1 ialah biomassa di proses melalui *coal mill* (1), *pre mixing* biomassa dan batu bara dan proses *milling* melalui *mill pulvelzier* dan melalui *coal pipe eksisting* menuju *coal burner* (2), biomassa yang melalui proses *milling* yang terpisah akan diinjeksikan ke *coal pipe eksisting* menuju *coal burners* (3), lalu injeksi biomassa ke *furnace* dengan modifikasi pada *coal burners* melalui *dedicated* pipa biomassa (4), injeksi biomassa ke *furnace* dengan *burners* di khususkan untuk biomassa (5), gasifikasi dari biomassa dan pembakaran dengan gas pada *boiler* (6). Uap super panas digunakan sebagai fluida kerja, uap tersebut mengalir ke turbin, Dimana energi panas yang dihasilkan diubah menjadi energi mekanik pada turbin. Menurut hukum termodinamika untuk menjaga efisiensi *thermal* uap *super-heated* harus beroperasi pada nilai nominalnya (Cao dkk, 2024) selain itu hasilnya menunjukkan adanya perbaikan dari segi efisiensi dan stabilinya pada operasional (Gimelli & Luongo 2014). Pada jurnal ini akan me-*riview* topik mengenai penggunaan biomassa pada pembangkit tenaga uap.

2. METODE

Metode penelitian pada dasarnya adalah metode ilmiah yang digunakan agar memperoleh data yang disesuaikan dengan tujuan. Pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) identik dengan siklus rankine yang mana energi yang dihasilkan bersumber dari generator yang diputar oleh turbin uap yang memanfaatkan energi uap hasil dari penguapan air yang dipanaskan di dalam ruang *boiler* (Carneiro, Oliveira, & Rocha 2017). Efisiensi *boiler* merupakan parameter yang mempunyai peran penting untuk menilai dari suatu operasional pada pembangkit listrik tenaga uap (PLTU), namun tidak hanya efisiensi yang harus diutamakan, emisi CO₂ akibat operasional dari PLTU juga harus menjadi fokus dengan cara memanfaatkan energi baru terbarukan, merujuk pada latar belakang yang buat oleh penuls. Peneliti terdahulu membuat sebuah metode simulasi dimana hal ini mempunyai tujuan mencari dan memberikan simulasi melalui sebuah sistem komputerisasi membuat suatu pemodelan menggunakan *software* dan ekperimental untuk menguji pada suatu variabel terhadap munculnya variabel lain terkait pemanfaatan biomassa pada *steam power plant*.

2.1 Tahap – Tahap Penelitian

Studi literatur merupakan langkah awal yang dilakukan untuk mengumpulkan informasi dari berbagai sumber seperti jurnal, artikel ilmiah, dan publikasi terkait. Langkah ini bertujuan untuk memperoleh pemahaman dasar mengenai teori dan konsep yang relevan dengan topik pembahasan, serta sebagai dasar dalam menyusun kutipan yang mendukung argumen penelitian. Selanjutnya, proses identifikasi masalah dilakukan untuk merumuskan tujuan penulisan artikel ilmiah secara jelas dan terarah. Identifikasi ini disesuaikan dengan hasil studi literatur yang telah dikaji, sehingga permasalahan yang diangkat memiliki relevansi kuat dengan penelitian terdahulu dan memberikan kontribusi yang berarti dalam pengembangan ilmu pengetahuan.

2.2 Pemodelan *Steam Power Plant*

Pemodelan dilakukan menggunakan perangkat lunak Ebilson Profesional untuk dua bahan bakar yaitu batu bara dan biomassa dengan parameter seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1.

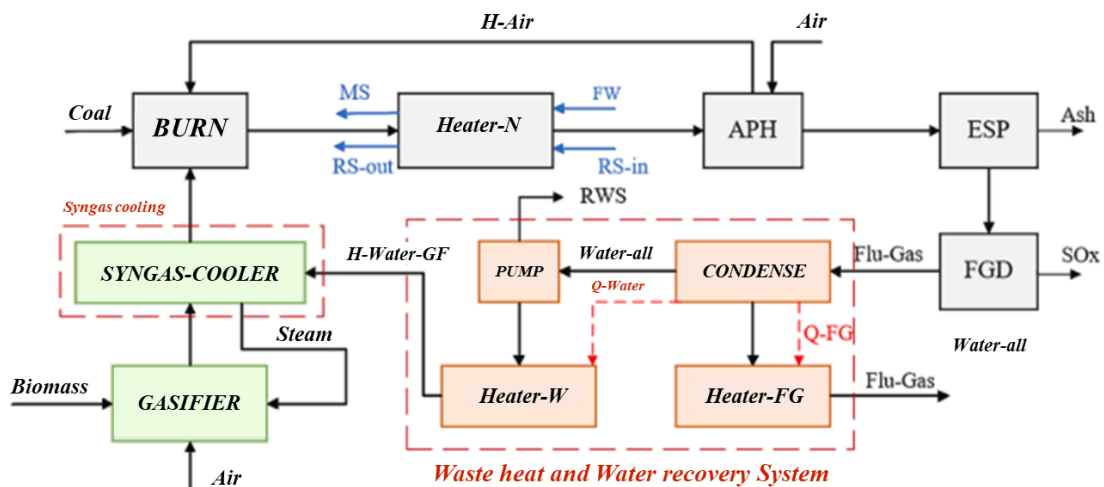
Tabel 1: Main process parameters

Spesifikasi	Nominal parameter
Gross electric production	30 MW
Steam turbine admission pressure	81 bar
Steam turbine admission temperature	525°C
Turbine exhaust pressure	0,10 bar
Water condenser outlet temperature	50°C
Deaerator pressure	2,3 bar
Fluegas economizer outlet temperature	150°C
Fluegas boiler outlet temperature	400°C
Ambient temperature	27°C

Sumber: data dari Coupan, Baccouche, & Szymanski 2023

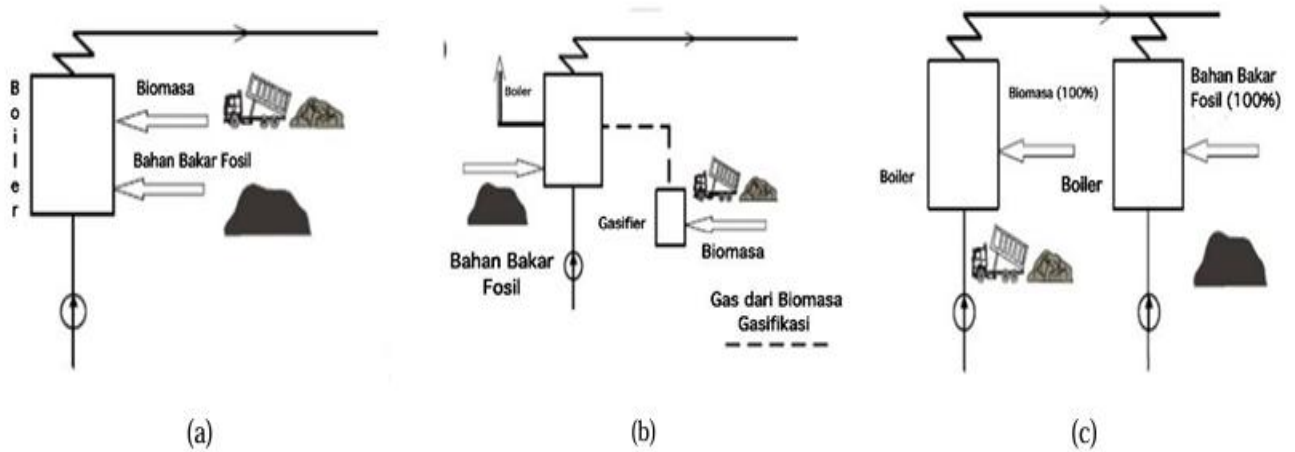
2.3 Sistem Co-Firing Pada Steam Power Plant

Dengan latar belakang yang sama, isu lingkungan yang terjadi akibat penggunaan bahan bakar fosil dan mengurangi pemakaian bahan bakar batu bara dengan bahan bakar energi terbarukan pada perbandingan tertentu dengan tetap mempertimbangkan kualitas bahan bakar sesuai keperluan, mengarah untuk mencari alternatif agar dapat mengurangi emisi gas rumah kaca, sistem *co-firing* merupakan solusi untuk hal tersebut, karena hal tersebut merupakan teknik yang memungkinkan pembakaran berbagai jenis secara bersamaan seperti batu bara dan biomassa. Dimana hal tersebut bertujuan untuk mendapatkan keuntungan dari sebuah system dan menjadikan biomassa sebagai bahan bakar untuk pembangkit listrik tenaga uap dan pengurangan emisi CO₂ ke atmosfer. Hal ini telah di simulasikan oleh (Nunes, Matias, & Catalão 2014) pada *Sines Thermal Power Plant* di Portugal. System *co-firing* biomassa yang ditunjukkan pada Gambar 4 gasifikasi biomassa mengambil acuan dasar dari pembangkit listrik tenaga batubara tradisional. Secara umum sistem *co-firing* adalah *fluidized bed reactor* terfluidisasi bersirkulasi (*gasifier*), biomassa digasifikasi menggunakan udara sebagai bahan gasifikasi. Produk gas terdiri dari N₂, arang, abu, H₂, CO, CO₂, CH₄ dan lainnya (seperti tar, amonia (NH₃) dan hidrogen sulfida (H₂S)). Kedua, arang, abu, dan tar dipisahkan menggunakan pemisah siklon. Kemudian, *syngas* dilewatkan melalui sistem pendingin (*Syngas-Cooler*) untuk mencapai suhu yang lebih rendah sekitar 400–450 °C sebelum diinjeksikan ke dalam *boiler* (*Burn*). Selanjutnya, pembakaran bersama batubara dan syngas terjadi di tungku, dan gas buang bertemperatur tinggi melewati serangkaian permukaan pertukaran panas (*Heater-N*) dan *air preheater* (APH). Terakhir, abu terbang dan SO_x dalam gas buang diolah dengan *electrostatic precipitator* (ESP) dan *flue gas desulfurization* (FGD) sebelum dibuang ke atmosfer (Chen dkk, 2024).



Gambar 4: Sistem Co-Firing dengan Biomassa

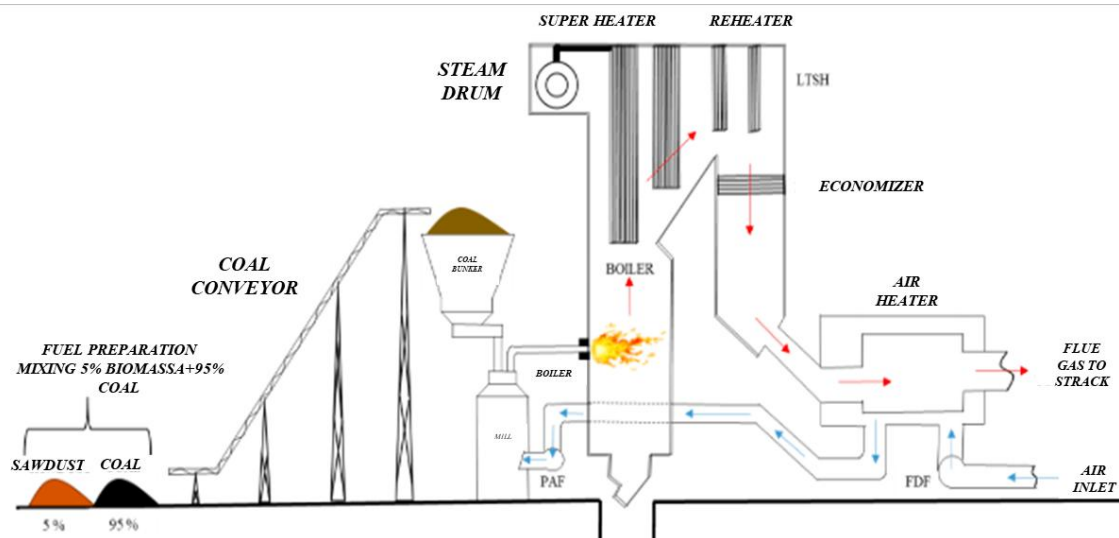
Sistem *co-firing* di beberapa negara sudah di terapkan secara optimal dan berguna menunjang sebagai perbaikan emisi gas buang, sebagai peningkatan efisiensi bahan bakar, penghematan biaya bahan bakar. Ada beberapa teknik *co-firing* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5 sebagai berikut.



Gambar 5: (a) Teknik *co-firing*, (b) *Direct co-firing*, (c) *Parallel co-firing*

- Direct co-firing* merupakan metode yang banyak digunakan, metode ini dapat dikatakan cukup mudah, namun teknik ini memiliki kekurangan yaitu mudah terjadi penggumpalan bahan bakar pada ruang bakar. Secara langsung konsep ini mengumpalkan biomassa ke dalam *boiler* Bersama dengan Batubara menggunakan mill yang sama (kurang dari 5% dalam hal konten energi).
- Indirect co-firing*, metode ini melibatkan proses gasifikasi dari biomassa pada *gasifier*, biomassa yang dikonversi menjadi bahan bakar gas kemudian dibakar dalam *boiler* Bersama Batubara, mengenai konsep metode ini yaitu proses gasifikasi biomassa yang diumpalkan ke ruang bakar. Maka abu dari biomassa tersebut akan terpisah dari abu Batubara, sehingga menghasilkan rasio yang tinggi.
- Parallel co-firing*, metode ini penanganan, pengumpanan dan pembakaran dilakukan secara terpisah. Biomassa dan batu bara diumpalkan pada *boiler* yang berbeda dan *steam* dari hasil pembakaran biomassa yang akan dicampur dengan *steam* yang menggunakan pembakaran batu bara. Metode ini biasa digunakan dalam pembakaran biomassa dengan persentase yang tinggi.

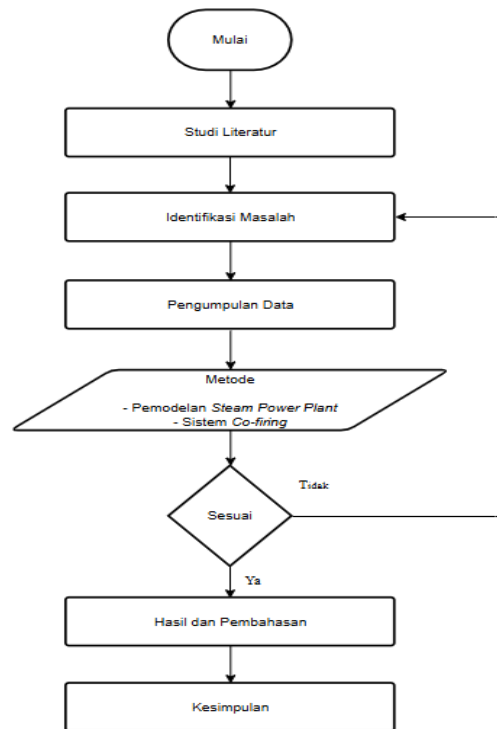
Pada Gambar 6 merupakan peralatan yang digunakan untuk pengujian yang dilakukan oleh peneliti terdahulu dengan tipe pembakaran *direct*.



Gambar 6: *Layout PLTU Boiler*

2.4 Diagram Alir Penelitian

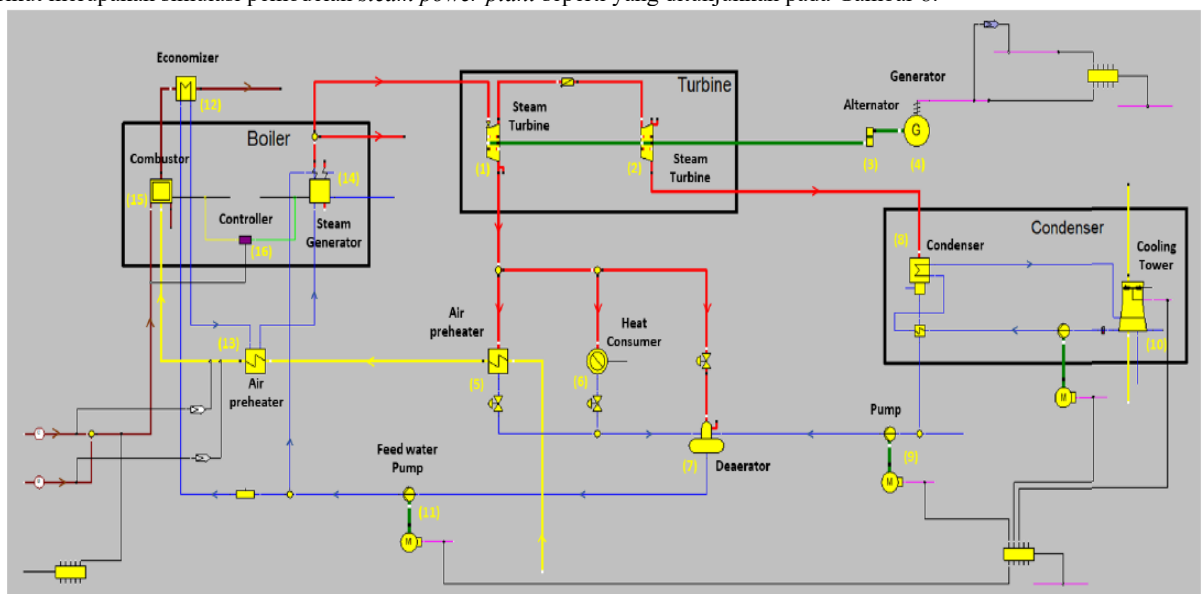
Diagram alir yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada gambar 7. Diagram alir penelitian ini menggambarkan alur sistematis yang dilakukan dalam pelaksanaan penelitian untuk mencapai tujuan penelitian yang diinginkan.



Gambar 7: Diagram Alir Penelitian

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

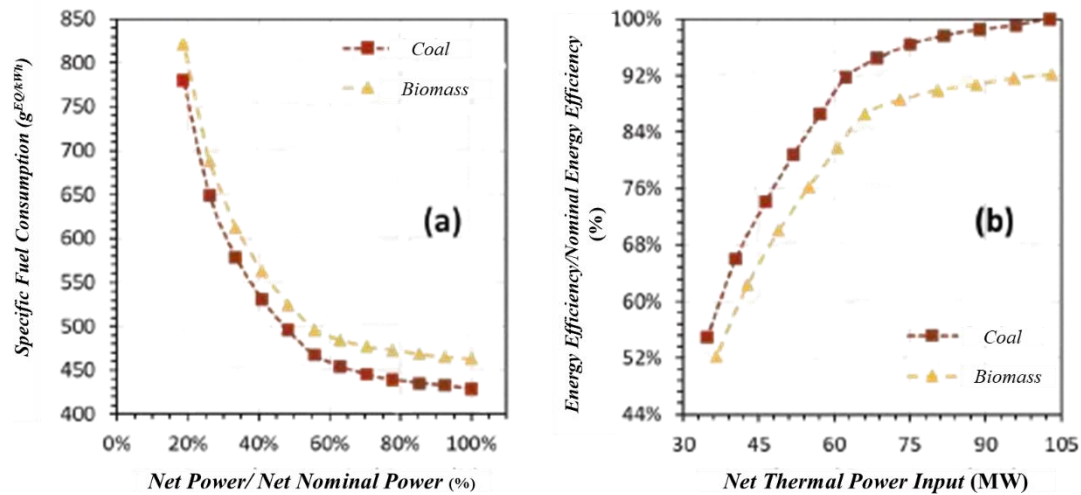
Metode simulasi pemodelan perangkat lunak dan eksperimental dengan parameter yang telah disebutkan pada Tabel 1 dan sistem yang digunakan pada Gambar 2, selanjutnya dibahas mengenai hasil dari pengujian tersebut. Peneliti terdahulu melakukan simulasi *steam power plant* menggunakan pemodelan termodinamika komputasi perangkat lunak Eblison® profesional dengan parameter pada Tabel 1, simulasi memungkinkan diperolehnya efisiensi *boiler*. Pada pemodelan simulasi ini fluida yang digunakan ialah air, uap, gas buang dan udara. Berikut merupakan simulasi pemodelan *steam power plant* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8: Pemodelan simulasi Eblison® profesional

Pemodelan simulasi di atas memiliki keterangan sebagai berikut: garis alir berwarna kuning menunjukkan peralatan dan aliran proses, garis merah menunjukkan aliran uap, garis coklat menunjukkan aliran bahan bakar batu bara atau biomassa, garis hijau menunjukkan proses kerja, garis merah muda menunjukkan arus listrik yang dihasilkan, dan garis hitam menunjukkan koneksi. Dalam simulasi proses kerja, uap yang dihasilkan diarahkan ke dua blok turbin uap (1 dan 2), di mana kedua turbin ini terhubung ke alternator (3), lalu disalurkan ke generator (4) untuk menghasilkan listrik. Aliran listrik dihasilkan dari dua blok pembangkit, di mana untuk tekanan menengah (medium pressure) diperoleh dari turbin uap (1) yang dialirkan melalui tiga blok berbeda, yaitu pemanas awal (5), konsumen panas (6), dan *deaerator* termal (7). Blok konsumen panas (6) merupakan bagian dari mode kogenerasi yang memungkinkan pembangkitan listrik dan panas secara bersamaan. Uap yang keluar dari turbin uap (2) dialirkan ke kondensator (8), di mana uap tersebut dikondensasi sepenuhnya menjadi air, lalu dialirkan ke *deaerator* (7) menggunakan pompa (9). Proses kondensasi ini didukung oleh sirkulasi air pendingin dari menara pendingin (10) yang diberi suplai udara. Pada *deaerator*, terdapat beberapa aliran air kondensat, yaitu dari kondensator uap turbin, ekstraksi uap tekanan menengah dari turbin, kondensat dari pemanas awal, dan kondensat yang kembali dari konsumen panas.

Air yang keluar dari deaerator kemudian dikompresi menggunakan pompa (11) dan diarahkan ke penukar panas *economizer* (12), yang berfungsi memulihkan panas dari gas buang (13). Bahan bakar kemudian bereaksi sebelum diuapkan dan dipanaskan kembali dalam blok steam generator (14). Secara opsional, sebagian air dari pompa juga dapat diarahkan ke unit *de-superheating*, di mana bahan bakar bereaksi dengan udara panas untuk menghasilkan panas berkualitas tinggi (15). Akhirnya, laju alir bahan bakar dihitung pada titik (16). Hasil dari simulasi diatas dimana pengujian yang dilakukan dengan parameter yang sama terdapat perbandingan antara dua bahan bakar yang digunakan yaitu biomassa dan batu bara, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9a dan 9b.



Gambar 9: Simulasi (a) Grafik konsumsi bahan bakar spesifik terhadap produksi listrik, (b) Grafik efisiensi energi pada *steam power plant*.

Pada Gambar 5 diatas bahwa efisiensi energi merupakan rasio antara produksi tenaga listrik dengan *thermal power input*. Pada grafik di perlihatkan bahwa penggunaan bahan bakar batu bara lebih rendah dibandingkan dengan bahan bakar biomassa untuk produksi listrik. Terdapat perbedaan sekitar 3-6% dari produksi listrik yang rendah hingga produksi listrik yang tinggi, tren yang sama juga terlihat pada grafik efisiensi energi. Untuk pengoperasian *steam power plant* menggunakan bahan bakar biomassa lebih hemat energi dibandingkan menggunakan bahan bakar batu bara. Dari hasil simulasi terdapat range 10-30 M, efisiensi *boiler* dihitung sekitar 92% dan 88% untuk pengoperasian batu bara dan biomassa. Dimana saat efisiensi *boiler* menurun, lebih banyak bahan bakar yang harus digunakan guna mencapai spesifikasi uap untuk menghasilkan listrik, namun penggunaan bahan bakar biomassa dapat mengurangi emisi gas rumah kaca secara signifikan yaitu 130-420 g- CO₂ dibandingkan dengan penggunaan bahan bakar batu bara setara 740-910 g- CO₂, (Coupn dkk, 2023). Spesifikasi parameter dan system *co-firing* yang ditunjukkan pada Gambar 2 diperoleh hasil yang sistematis dan komparatif untuk efisiensi, Dimana dari hasil eksperimental didapat penghematan Batubara 2,26—9,11 t/jam, dan volume emisi pada atmosfer seperti *carbon dioxide* (CO₂), *sulfur oxide* (SO_x) dan *nitrogen oxides* (NO_x) berkurang sebesar 0,95% dan 11,38-36,47% pada rasio *co-firing* sekitar 10 %-40 %, X (Chen dkk, 2024).

Co-firing yang biasa diketahui sebagai *co-combustion* yang bermakna proses pembakaran dua jenis bahan bakar yang berbeda dalam satu perangkat *boiler*, dalam menyediakan pasokan bahan bakar *co-firing* yang stabil pada PLTU sebesar 10 juta ton per tahun, namun selain itu pada peneliti lain dengan penggunaan system *co-firing* dapat pengurangan emisi CO₂ sebesar 1.000.000 ton/tahun (Nunes dkk, 2014).

4. KESIMPULAN

Simulasi pemodelan menggunakan perangkat lunak terbukti efektif dalam memudahkan analisis performa pembangkit listrik tenaga uap (PLTU). Penggunaan bahan bakar biomassa sebagai alternatif batu bara menunjukkan potensi signifikan dalam mengurangi emisi gas rumah kaca ke atmosfer. Pengurangan emisi dapat mencapai 130–420 g CO₂ per kWh dibandingkan dengan batu bara yang menghasilkan emisi sebesar 740–910 g CO₂ per kWh. Selain itu, penerapan sistem *co-firing* yaitu penggunaan bahan bakar utama (batu bara) dan bahan bakar alternatif (biomassa) secara bersamaan dengan rasio yang sesuai telah terbukti mampu menurunkan emisi hingga 1.000.000 ton per tahun dan menghemat konsumsi batu bara sebesar 2,26–9,11 ton per jam. Efisiensi *boiler* pada penggunaan biomassa masih lebih rendah, yakni sekitar 88%, dibandingkan dengan penggunaan batu bara yang mencapai efisiensi hingga 92%.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan rasa terimakasih dan apresiasi kepada Prodi Magister Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Nasional, serta rekan rekan angkatan 2024 yang telah mendukung sampai akhir penulisan artikel ilmiah ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Agus, I. Nyoman, Adi Saputra, Teddy Dahlan, Aditya Eka, Giri Nugroho, Tri Vicca, dan Hariana Hariana. (2024). Case Studies in Thermal Engineering Numerical simulation of co-firing LRC and ammonia in Pangkalan Susu 3 & 4 coal-fired steam power plant (CFSP) capacity 210 megawatts. *Case Studies in Thermal Engineering* 63:105230.
- Cao, Yue, Qingling Huang, Yuan Fang, dan Fengqi Si. (2024). Novel performance assessment method for superheated steam control of a coal-fired power plant under renewable energy accommodation condition. *Applied Thermal Engineering* 243(2):122661.
- Carneiro, Alan, Diego De Oliveira, dan Matheus Rocha. (2017). Performance quantification of a cyclonic boiler using biomass sawdust temperature function demand forecast. *Energy Procedia* 120:403–9.
- Chantasiriwan, Somchart. (2023). Assessing economic feasibility of retrofitting steam dryer and steam-air preheater to existing biomass power plant. *Energy Reports* 9:1128–35.

- Chen, Aixia, dan Yankui Liu. (2023). Computers & Industrial Engineering Optimizing sustainable biomass – coal co-firing power plant location problem under ambiguous supply. *Computers & Industrial Engineering* 182(March):109401.
- Chen, Xi, Chuxuan Zhang, Xuanlong Chen, Zhengkang Peng, Huanting Gao, dan Xun Gong. (2024). Performance analysis of a novel biomass gasification system coupled to a coal-fired power plant based on heat and water recovery. *Energy Conversion and Management* 299(October 2023):117822.
- Coupan, Romuald, Ahmed Baccouche, dan Pierre Szymanski. (2023). Thermodynamic Modelling and Performance Analysis of Power Plant for Switching from Coal to Biomass. *Elsevier Masson SAS*. Vol. 52.
- Fawzy, Marwan M., Valters Kazulis, Ivars Veidenbergs, dan Dagnija Blumberga. (2017). ScienceDirect ScienceDirect Levelized cost of energy analysis of co-firing solid , liquid and gaseous fuel. *Energy Procedia* 128:202–7.
- Gimelli, A., dan A. Luongo. (2014). Thermodynamic and experimental analysis of a biomass steam power plant: Critical issues and their possible solutions with CCGT systems. *Energy Procedia* 45:227–36.
- Huang, Qian, dan Qing Feng. (2024a). A bi-level model for coal power decarbonization via biomass co-firing considering CO2 emission trading system. *Energy* 305:132385.
- Huang, Qian, dan Qing Feng. (2024b). Bi-level multi-objective optimization for a hybrid carbon pricing initiative towards biomass co-firing with coal. *Renewable Energy* 237:121829.
- Nunes, L. J. R., J. C. O. Matias, dan J. P. S. Catalão. (2014). Biomass waste co-firing with coal applied to the Sines Thermal Power Plant in Portugal. *Fuel* 132:153–57.
- Putri Lubis, Diah, dan Khaira Umma Tambunan. (2025). Variasi Rasio Co-Firing Batubara Dan Sawdust (Serbuk Gergaji) Terhadap Pembangkit Listrik Tenaga Uap Info Artikel. *SINERGI Polmed : Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, 6, 28-36.
- Roy, Rajarshi, Barron Hewetson, Brian Schooff, Spencer Bandi, Parker LaTour, Brian D. Iverson, dan Andrew Fry. (2024). Steam explosion treated biomass as a renewable fuel source: A review from collection to combustion. *Fuel* 378:132883.
- Tanbar, Fefria, Sahrijal Purba, Agus Salim Samsudin, Eko Supriyanto, Indra A. Aditya. (2021). Analisa Karakteristik Pengujian Co-Firing Biomassa Sawdust Pada PLTU Type Pulverized Coal Boiler Sebagai Upaya Bauran Renewable Energy. *Jurnal Offshore*. 5, 50-56.
- Uchino, Takayuki, Takahito Yasui, dan Chihiro Fushimi. (2021). Design of biomass power plant integrated with thermochemical heat storage using Ca(OH)₂/CaO and evaluation of the flexibility of power generation : Dynamic simulation and energy analysis Organic Rankine cycle. *Energy Conversion and Management* 243:114366.
- Wang, Yuan, Lin Zhu, Yangdong He, Xingyan Zeng, Qiang Hao, Yue Huang, dan Xuhui Han. (2024). Life cycle assessment of an efficient biomass power plant supported by semi-closed supercritical CO₂ cycle and chemical looping air separation. *Science of the Total Environment* 919:170832.