

STUDI NUMERIK BURNER BATUBARA *PULVERIZED* DENGAN *PLASMA FUEL SYSTEM* DAN VARIASI *CO-FIRING* BIOMASSA

*Muhammad Rizqi Azmi Attaqi¹, M.S.K. Tony Suryo Utomo², Muchammad²

¹Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

²Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Sudharto, SH., Tembalang-Semarang 50275, Telp. +62247460059

*E-mail: ra.attaqi@gmail.com

Abstrak

Ketersediaan energi terbarukan menjadi tantangan besar di Indonesia maupun dunia. PLTU berbahan bakar batubara masih dominan karena ekonomis, namun memiliki dampak lingkungan yang serius. Penelitian ini menyajikan studi numerik pembakaran batubara *pulverized* dengan *Plasma Fuel System* (PFS) serta variasi *co-firing* biomassa serbuk gergaji (*sawdust*). Tujuan utama adalah mengevaluasi plasma sebagai pengganti *fuel oil* pada saat *start-up*, menganalisis pengaruh *co-firing* terhadap temperatur outlet, serta menilai dampaknya pada emisi gas buang. Simulasi dilakukan menggunakan CFD dengan model *species transport*, *Discrete Phase Model* (DPM) untuk partikel, serta reaksi volumetrik berbasis Eddy Dissipation Model (EDM). Hasil menunjukkan plasma mampu menghasilkan zona temperatur awal sangat tinggi (3500 K), sehingga mempercepat inisiasi pembakaran batubara tanpa kebutuhan *fuel oil*. *Co-firing* biomassa hingga 30% meningkatkan temperatur outlet dan distribusi panas, namun pada kadar lebih tinggi temperatur menurun karena rendahnya nilai kalor dan kandungan air biomassa. Selain itu, peningkatan biomassa menurunkan emisi CO, CO₂, dan SO₂, tetapi cenderung meningkatkan O₂ akibat berkurangnya intensitas pembakaran. Emisi NO_x justru naik, karena berkurangnya CO sebagai reduktor membuat *thermal* NO_x dari plasma tidak tereduksi optimal.

Kata kunci: *co-firing* biomassa; pembakaran batubara *pulverized*; *plasma fuel system*; simulasi cfd

Abstract

The availability of renewable energy remains a major challenge in Indonesia and worldwide. Coal-fired power plants (CFPPs) are still dominant due to their economic advantages, but they pose serious environmental impacts. This study presents a numerical investigation of pulverized coal combustion using a Plasma Fuel System (PFS) with varying co-firing ratios of sawdust biomass. The main objectives are to evaluate plasma as a replacement for fuel oil during start-up, analyze the influence of co-firing on burner outlet temperature, and assess its effects on flue gas emissions. The simulations were carried out using CFD with a species transport model, a Discrete Phase Model (DPM) for particle tracking, and volumetric reactions based on the Eddy Dissipation Model (EDM). The results show that plasma can generate a very high initial temperature zone (3500 K), which accelerates coal ignition and eliminates the need for fuel oil. Biomass co-firing up to 30% improves outlet temperature and heat distribution, while higher ratios reduce peak temperature due to the lower calorific value and higher moisture content of biomass. Furthermore, increasing biomass fraction reduces CO, CO₂, and SO₂ emissions but tends to increase O₂ levels, indicating lower combustion intensity. In contrast, NO_x emissions rise because the reduction effect of CO diminishes, allowing thermal NO_x generated by plasma to remain unmitigated.

Keywords: cfd simulation; co-firing biomass; plasma fuel system; pulverized coal combustion

1. Pendahuluan

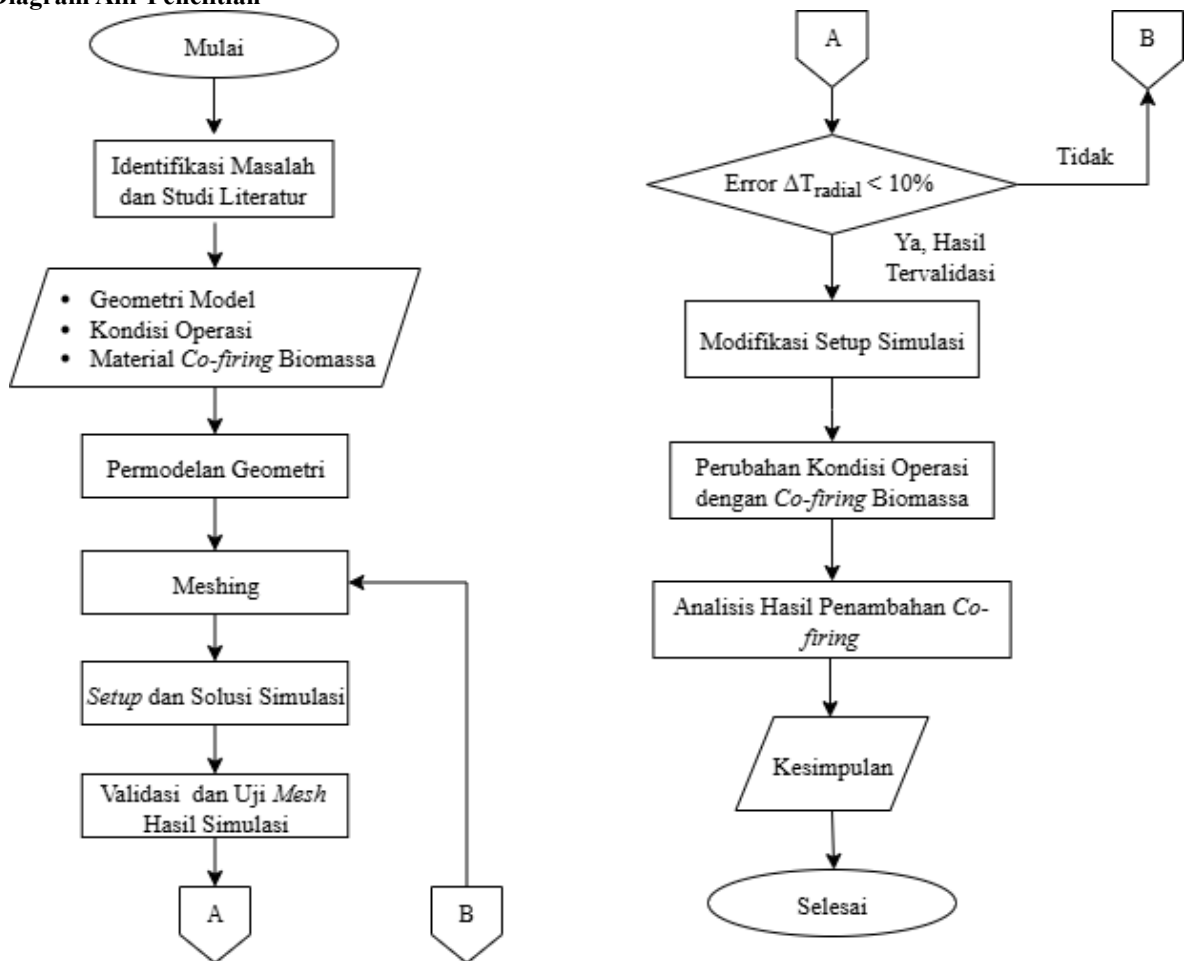
Ketersediaan energi baru terbarukan, dalam hal ini energi listrik, menjadi permasalahan energi di Indonesia bahkan dunia. Kendalanya yaitu energi murah cenderung tidak ramah lingkungan, contohnya batubara. Indonesia menargetkan mencapai net-zero emission di tahun 2060 dengan perubahan produksi dan konsumsi energi [1]. Sedangkan secara internasional, Pawlak-Kruczek et al. [2] menuliskan “coal is still the main fuel source accounting for 36% of the world’s electricity generation”. Hal ini disebabkan karena sifat batubara yang murah dan instan membuat penyedia energi di dunia sulit untuk beralih dari batubara. *Plasma coal burner* dikenalkan sebagai solusi untuk pembakaran terkontrol batubara, dengan bantuan panas plasma. Teknologi ini memungkinkan proses *start-up* boiler dan stabilisasi nyala api batubara halus (*pulverized*), serta menghilangkan kebutuhan bahan bakar reaktif tambahan [3]. *Plasma coal burner* atau disebut juga *plasma fuel system*, juga digunakan dalam kondisi beban rendah pembangkit, yang artinya membakar lebih sedikit batubara dibanding kondisi beban normalnya.

Selain teknologi plasma, strategi lain yang mulai dikembangkan adalah *co-firing* biomassa. Biomassa dipandang sebagai sumber energi terbarukan dengan kandungan karbon netral, yang dapat menurunkan emisi bersih CO₂. Penggunaan biomassa dalam sistem pembangkit listrik akan mengurai jejak karbon dari energi fosil yang seharusnya terpendam di bawah tanah, sehingga tidak menambah jumlah emisi karbon di udara. Selain itu, teknologi ini menawarkan

keunggulan dari sisi lingkungan, antara lain berupa penurunan emisi karbon dioksida (CO₂), sulfur dioksida (SO₂), serta oksida nitrogen (NO_x) [4]. Banyak penelitian yang mengatakan bahwa penambahan biomassa sebagai material *co-firing* berdampak baik pada emisi gas hasil pembakaran. J. Li et al. [5] juga mengatakan bahwa total emisi NO_x menurun seiring dengan meningkatnya substitusi biomassa. Dalam penelitian ini, dilakukan variasi persentase biomassa sehingga dapat terlihat pengaruh *co-firing* terhadap performa burner dan kecenderungan pembentukan emisi gasnya. Kombinasi antara PFS dan *co-firing* biomassa menarik untuk diteliti karena dapat memberikan solusi simultan, menjaga kestabilan nyala dan mengurangi dampak lingkungan dari pembakaran. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan guna mengetahui penggunaan plasma coal burner dan bagaimana pengaruhnya jika ditambahkan dengan *co-firing* biomassa tertentu.

2. Bahan dan Metode Penelitian

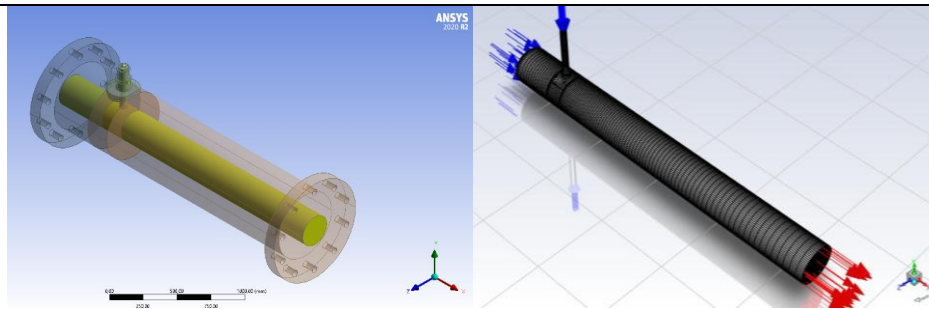
2.1 Diagram Alir Penelitian



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

2.2 Geometri dan Meshing

Geometri 3D yang dibuat pada Solidworks 2021 diekspor ke Ansys dalam format **.step** untuk kemudian diproses menjadi domain fluida. Pembuatan domain fluida dilakukan menggunakan Ansys Design Modeller dengan langkah awal menutup lubang pada geometri pipa dan plasmatron, lalu menerapkan *fill by caps* hingga terbentuk volume fluida baru. Pada tahap ini, geometri padat pipa tidak lagi digunakan dan hanya disisakan volume fluida hasil ekstraksi. Proses selanjutnya adalah pembuatan mesh dengan metode *hybrid* (tetrahedral–hexahedral) atau *multizone*, yang dilengkapi *inflation layer* pada seluruh dinding model untuk meningkatkan akurasi simulasi. Hasil permodelan dan mesh ditunjukkan pada Gambar 2.



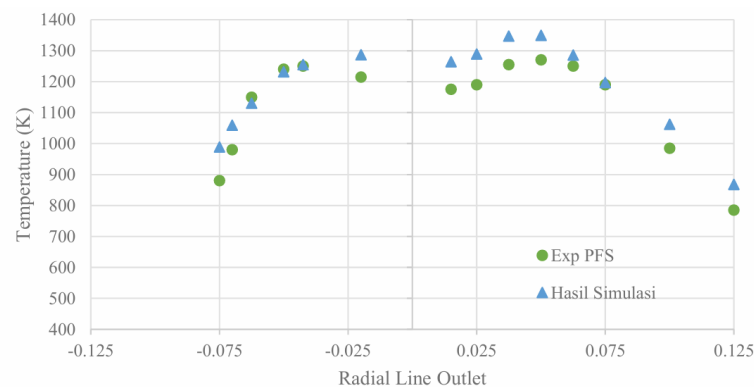
Gambar 2. Geometri Model untuk Ansys Fluent

2.3 Asumsi dan Pemodelan

Simulasi numerik dalam penelitian ini dilakukan menggunakan perangkat lunak ANSYS Fluent 2020 R2. Geometri yang digunakan adalah plasma coal burner tiga dimensi (3D) dengan konfigurasi inlet yang mencakup udara primer pembawa batubara dan suplai udara untuk zona plasma. Model-model fisik yang digunakan dalam simulasi mencakup model aliran turbulen k- ϵ , model energi, serta model pembakaran berbasis species transport dengan reaksi *volumetric* [3]. Simulasi ini menggunakan k- ϵ modifikasi yaitu model k- ϵ RNG yang memberikan hasil yang lebih baik untuk aliran dengan swirl dan gradien aliran yang tajam di dalam wilayah perhitungan dibandingkan model k- ϵ standar dan banyak digunakan dalam simulasi pembakaran burner batubara dengan kondisi swirl tinggi [6].

Injeksi partikel dimodelkan dengan DPM melalui inlet utama dengan campuran udara dan batubara, sedangkan inlet lainnya hanya membawa udara. Konfigurasi aliran mencakup massa alir udara 0,972 kg/s dan batubara 0,486 kg/s untuk inlet *air-coal mixture*, dengan suhu keduanya 350 K. Pada bagian plasmatron, suplai udara plasma diberi sebesar 0,015 kg/s pada suhu 298 K. Sedangkan, *discrete phase model* (DPM) merupakan perhitungan *eulerian-lagrangian* yang mengasumsikan fase gas sebagai fase kontinu, dan partikel diperlakukan sebagai fase terdispersi [7]. Selain itu, *discrete ordinate radiation model* digunakan untuk menangkap efek radiasi antar partikel batubara ber suhu tinggi. Selain itu, dinding domain dibatasi bersuhu 800 K, sesuai dengan kondisi insulasi pipa [8].

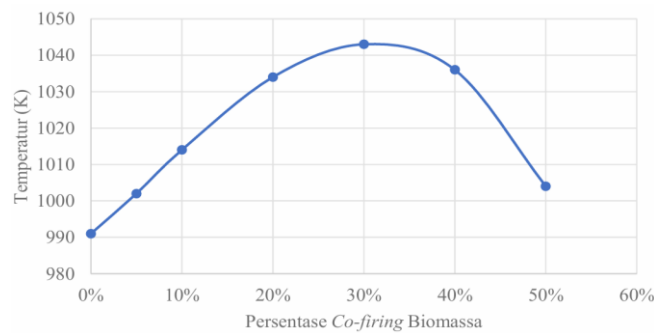
2.4 Uji Validasi



Gambar 3. Grafik Validasi Simulasi dengan Data Eksperimen

Validasi dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi distribusi temperatur radial pada sisi outlet burner dengan data eksperimen milik Messerle & Ustimenko [8] serta Gorokhovski et al. [9] yang terdiri dari 14 titik pengukuran. Penentuan posisi *probe* pada simulasi dibuat sesuai dengan konfigurasi pengukuran pada eksperimen, sehingga hasil perbandingan dapat mewakili kondisi aktual. Dari perbandingan tersebut terlihat bahwa tren distribusi temperatur simulasi mengikuti pola eksperimen dengan baik, meskipun terdapat perbedaan nilai pada beberapa titik radial. Rata-rata selisih antara data simulasi dan eksperimen tercatat sebesar 5,75%, yang masih berada di bawah batas toleransi 10%. Hal ini mengindikasikan bahwa model numerik yang digunakan mampu merepresentasikan kondisi nyata secara cukup akurat, sehingga hasil simulasi dapat dipercaya dan dijadikan dasar untuk analisis lebih lanjut dalam penelitian ini.

3. Hasil dan Pembahasan



Gambar 4. Grafik Persentase *Co-firing* Biomassa (*Sawdust*) terhadap Temperatur Outlet

Gambar 4 menunjukkan grafik temperatur pada outlet burner yang dihitung dengan *mass weight average*. Terjadi peningkatan temperatur outlet seiring penambahan persentase *co-firing* dari 0% hingga mencapai puncaknya pada persentase *co-firing* 30% dengan nilai 1043 K. Setelah titik ini, temperatur mulai menurun meskipun persentase *co-firing* bertambah, dengan penurunan signifikan pada persentase 50% yang hanya mencapai sekitar 1004 K. Pola ini menunjukkan adanya persentase *co-firing* optimum untuk mempertahankan temperatur pembakaran tinggi, yaitu di kisaran 30–35%. Biomassa lebih mudah terbakar akibat fraksi volatilnya lebih besar sehingga cepat terbakar, namun persentase biomassa tinggi justru menurunkan temperatur pada ujung outlet burner akibat kadar H₂O tinggi [10].

4. Kesimpulan

Penggunaan *plasma fuel system* terbukti mampu menciptakan temperatur awal yang sangat tinggi sehingga mempercepat proses penyalaan batubara sekaligus menghilangkan kebutuhan bahan bakar minyak. *Co-firing* biomassa menunjukkan kinerja optimal hingga 30% dengan peningkatan temperatur dan distribusi panas pada outlet burner, namun pada persentase lebih tinggi performa menurun akibat rendahnya nilai kalor serta tingginya kadar air biomassa. Selain itu, penambahan biomassa menekan emisi CO, CO₂, dan SO₂, meskipun disertai peningkatan O₂ sisa dan NO_x karena menurunnya intensitas pembakaran serta berkurangnya mekanisme reduksi NO_x.

5. Daftar Pustaka

- [1] Ahmad, A. H., Darmanto, P. S., Hariana, H., Darmawan, A., Aziz, M., & Juangsa, F. B. (2025). Numerical investigation of coal-sawdust co-firing in a Carolina-type boiler: Power derating and emission analysis. *Applied Thermal Engineering*, 125681. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.125681>
- [2] Pawlak-Kruczek, H., Mularski, J., Ostrycharczyk, M., Czerep, M., Baranowski, M., Mączka, T., Sadowski, K., & Hulisz, P. (2023). Application of plasma burners for char combustion in a pulverized coal-fired (PC) boiler – Experimental and numerical analysis. *Energy*, 279, 128115. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128115>
- [3] Messerle, V., Karpenko, E., & Ustimenko, A. (2014). Plasma assisted power coal combustion in the furnace of utility boiler: Numerical modeling and full-scale test. *Fuel*, 126, 294–300. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.02.047>
- [4] Tabet, F., & Gökalp, I. (2015). Review on CFD based models for co-firing coal and biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 1101–1114. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.045>
- [5] Li, J., Brzdekiewicz, A., Yang, W., & Blasiak, W. (2012). Co-firing based on biomass torrefaction in a pulverized coal boiler with aim of 100% fuel switching. *Applied Energy*, 99, 344–354. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.05.046>
- [6] Tian, Z. F., Witt, P. J., Schwarz, M. P., & Yang, W. (2017). Numerical modelling of pulverised coal combustion. In *Springer eBooks* (pp. 1–35). https://doi.org/10.1007/978-981-4585-86-6_9-2
- [7] Li, Q., He, F., Mei, S., Xie, J., Zhang, C., & Deng, Y. (2024). Effect of oxy-fuel combustion with different O₂/CO₂ fractions on the pulverized coal combustion mechanism and heat transfer characteristics in rotary kilns: A numerical simulation study. *Chemical Engineering Journal*, 494, 153181. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.153181>
- [8] Messerle, V., & Ustimenko, A. (2021). Modelling of the pulverized coal plasma preparation for combustion. *Physical Sciences and Technology*, 8(1–2). <https://doi.org/10.26577/phst.2021.v8.i1.02>
- [9] Gorokhovski, M. A., Jankoski, Z., Lockwood, F. C., Karpenko, E. I., Messerle, V. E., & Ustimenko, A. B. (2007). ENHANCEMENT OF PULVERIZED COAL COMBUSTION BY PLASMA TECHNOLOGY. *Combustion Science and Technology*, 179(10), 2065–2090. <https://doi.org/10.1080/00102200701386115>
- [10] Lv, Q., Wang, C., Liu, X., Du, Y., Li, D., & Che, D. (2018). Combustion and heat transfer characteristics of co-firing biomass and coal under oxy-fuel condition. *International Journal of Energy Research*, 42(13), 4170–4183. <https://doi.org/10.1002/er.4163>