

ANALISIS KARAKTERISTIK TERMAL PADA *PLASMATRON* SEBAGAI BAGIAN DARI *PLASMA FUEL SYSTEM* (PFS) UNTUK MENINGKATKAN EFISIENSI *PULVERIZED-COAL BOILER* MENGGUNAKAN SIMULASI CFD

*Irfan Ghazy Narawangsa¹, 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: irfanghazyn@gmail.com

Abstrak

Isu ketahanan energi global semakin menuntut perhatian karena konsumsi energi terus meningkat, sementara ketersediaan sumber daya fosil semakin terbatas. Batubara masih menjadi salah satu sumber energi utama, tetapi penggunaannya menghadapi sejumlah kendala seperti efisiensi pembakaran yang rendah, emisi gas buang yang tinggi, serta terbentuknya residu padat yang dapat mengganggu kinerja boiler. Untuk mengatasi hal ini, diperlukan inovasi teknologi yang mampu meningkatkan efisiensi sekaligus menekan dampak lingkungan. Salah satu teknologi yang banyak dikembangkan adalah *Plasma-Fuel System* (PFS) dengan *plasmatron*, yang dapat menghasilkan temperatur sangat tinggi sehingga mempercepat penyalan bahan bakar dan mengurangi kebutuhan energi pada tahap awal operasi. Metana (CH_4) selama ini menjadi bahan bakar utama *plasmatron* karena sifatnya yang stabil, namun pemanfaatan energi terbarukan lebih diutamakan dalam mendukung keberlanjutan. Biogas menjadi alternatif yang menjanjikan karena berasal dari proses dekomposisi limbah organik, dengan kandungan metana 50–70% dan karbon dioksida sebagai komponen dominan. Penelitian ini bertujuan mengkaji pengaruh variasi fraksi biogas (0–100%) terhadap suhu pembakaran dan karakteristik emisi pada *plasmatron* menggunakan simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD) melalui *ANSYS Fluent*. Hasil simulasi menunjukkan bahwa semakin tinggi fraksi biogas, suhu pembakaran cenderung menurun, dengan temperatur *outlet* berkisar antara 1763,77 K hingga 3411,93 K. Selain itu, emisi gas buang mengalami perbaikan melalui penurunan fraksi massa CO_2 , peningkatan O_2 , serta berkurangnya CO .

Kata kunci: biogas; cfd; energi terbarukan; *plasmatron*; *plasma-fuel system*

Abstract

Energy sustainability has become an increasingly urgent global issue as consumption continues to rise while fossil fuel reserves remain limited. Coal is still one of the main energy sources, yet its utilization faces several drawbacks, including low combustion efficiency, high pollutant emissions, and the formation of solid residues that may impair boiler performance. To address these challenges, technological innovations are needed to enhance efficiency while reducing environmental impacts. One such technology is the Plasma-Fuel System (PFS) with a plasmatron, which can generate extremely high temperatures, thereby accelerating fuel ignition and reducing energy demand during boiler start-up. Methane (CH_4) has commonly been used as plasmatron fuel due to its stability, but in the context of sustainable energy, renewable alternatives are preferable. Biogas emerges as a promising option since it is produced from the anaerobic decomposition of organic waste, containing 50–70% methane and carbon dioxide as the main component. This study aims to investigate the effect of varying biogas fractions (0–100%) on combustion temperature and exhaust gas characteristics in a plasmatron using Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations through ANSYS Fluent. The results indicate that higher biogas fractions tend to lower the combustion temperature, with outlet temperatures ranging from 1763.77 K to 3411.93 K. Furthermore, exhaust quality improved, as shown by reduced CO_2 mass fraction, increased O_2 , and decreased CO .

Keywords: biogas; cfd; *plasmatron*; *plasma-fuel system*; renewable energy

1. Pendahuluan

Ketahanan serta keberlanjutan energi menjadi isu strategis global seiring meningkatnya konsumsi sumber daya fosil seperti minyak bumi, gas alam, dan batubara yang tergolong tak terbarukan. Ketimpangan antara ketersediaan dan pemakaian energi tersebut mempercepat menipisnya cadangan fosil, disertai dampak lingkungan berupa emisi karbon dioksida (CO_2) yang berperan besar dalam pemanasan global [1].

Batubara merupakan sumber energi terpenting yang banyak dimanfaatkan untuk pembangkitan listrik bahkan hampir setengah konsumsi batubara domestik dimanfaatkan sebagai bahan bakar pembangkit listrik, selain dimanfaatkan

juga sebagai sumber energi utama dalam mendukung operasional kegiatan industri [2]. Namun, tantangan utama dalam penggunaan batu bara sebagai bahan bakar adalah efisiensi pembakaran yang rendah, emisi polutan yang tinggi, serta permasalahan residu pembakaran seperti *slagging* dan *fouling*. Dalam beberapa tahun terakhir, peminatan terhadap optimalisasi kinerja boiler utilitas besar menjadi sangat relevan, yang bertujuan untuk memperpanjang masa pakainya, meningkatkan efisiensi termal, dan mengurangi emisi polutan, khususnya emisi NOx serta partikel lainnya menjadi tantangan signifikan yang perlu diatasi. Oleh karena itu, diperlukan inovasi dalam teknologi pembakaran untuk meningkatkan efisiensi dan mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan [3].

Salah satu inovasi tersebut adalah penggunaan *Plasma-Fuel System* (PFS) sebagai sistem pembakaran untuk meningkatkan efisiensi dan stabilitas nyala pada boiler berbahan bakar batubara halus (*pulverized-coal boiler*). *Plasmatron* merupakan salah satu bagian dari *plasma-fuel system* yang memanfaatkan konduktivitas gas yang terbatas pada suhu yang sangat tinggi. Pada suhu ini, gas terionisasi sebagian. *Plasmatron* menyediakan pemanas listrik yang sangat terkendali untuk gas terionisasi. Suhu tinggi dapat digunakan untuk mengubah berbagai bahan bakar hidrokarbon menjadi gas kaya hidrogen tanpa menggunakan katalis [4].

Dalam inovasi ini, sebagian campuran batu bara udara dimasukkan ke dalam pembakar, di mana api plasma, yang memiliki konsentrasi energi tinggi secara lokal, menginduksi gasifikasi batu bara dan oksidasi parsial karbon arang. Campuran batu bara/udara yang dihasilkan kekurangan oksigen, karbon terutama teroksidasi menjadi karbon monoksida. Akibatnya, campuran gas yang mudah terbakar (pada suhu sekitar 1300 K) dan partikel arang yang teroksidasi sebagian yang sangat reaktif diperoleh di pintu keluar pembakar [5]. *Plasmatron* menggunakan energi yang telah dihasilkan oleh plasma untuk menghasilkan panas yang sangat tinggi. Plasma dapat didefinisikan sebagai fasa ke empat yang mengandung elektron yang bersifat radikal dan bebas, partikel bermuatan, serta ion-ion [6].

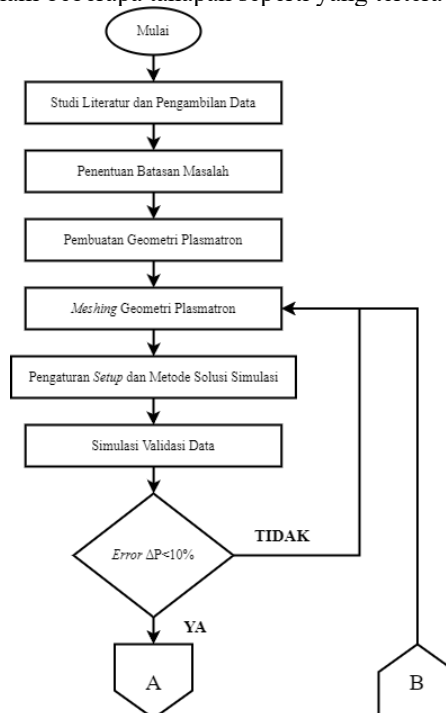
Selama ini metana (CH₄) banyak digunakan sebagai bahan bakar *plasmatron* karena sifatnya yang mudah terbakar dan stabil. Namun, untuk mendukung transisi energi berkelanjutan, biogas dipandang sebagai alternatif potensial. Biogas dihasilkan dari dekomposisi anaerobik limbah organik dengan kandungan metana 50–70%, sehingga mampu mendekati performa gas alam bila dikontrol dengan tepat [7]. Dengan kadar metana yang berkisar antara 50 hingga 70 persen, biogas berpotensi digunakan dalam sistem pembakaran plasma secara efisien, mendekati performa gas alam apabila pengaturannya dilakukan secara optimal [8]. Di samping efisiensi termal, pemanfaatan biogas juga mendukung pengurangan emisi gas rumah kaca serta memberikan nilai tambah dalam pengelolaan limbah organik secara berkelanjutan. Oleh karena itu, penggunaan biogas sebagai bahan bakar dalam sistem *plasmatron* tidak hanya meningkatkan efisiensi pembakaran, tetapi juga mendukung pengembangan teknologi energi bersih dalam jangka panjang

Meskipun potensinya besar, kajian mengenai penerapan *plasmatron* dalam pembakaran masih terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan melalui simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD) untuk mengevaluasi peran *plasmatron* dalam meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan sistem pembakaran.

2. Bahan dan Metode Penelitian

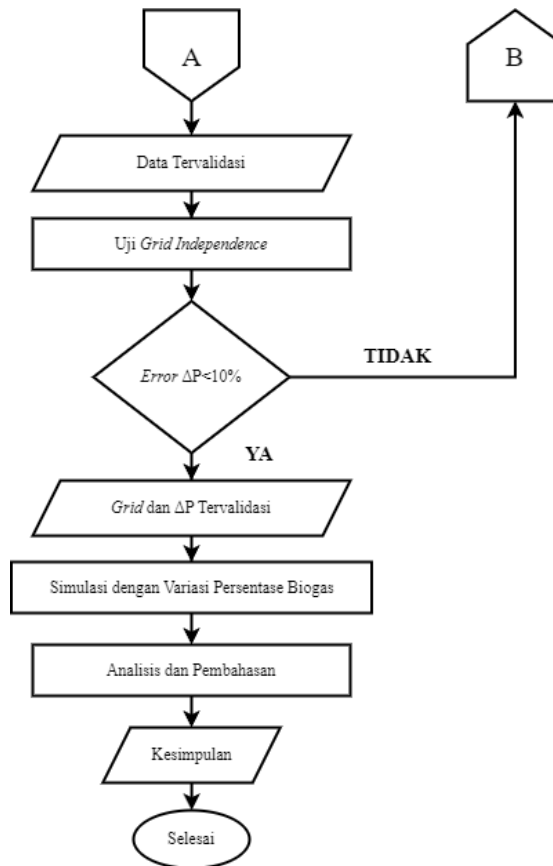
2.1 Diagram Alir Penelitian

Penelitian kali ini dilakukan dalam beberapa tahapan seperti yang tertera pada Gambar 1 berikut.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Setelah *error* validasi dari seluruh parameter sudah di bawah 10%, maka bisa dilanjutkan ke tahapan yang tertera pada Gambar 2 berikut.



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

2.2 Geometri dan Meshing

Geometri yang digunakan pada simulasi ini mengacu pada geometri *plasmatron*. Geometri *plasmatron* tersebut terdiri dari 3 *inlet* (*inlet-air*, *inlet-fuel*, dan *inlet swirl gas*) dan 1 *outlet*. Gambar 3 menunjukkan geometri tersebut.



Gambar 3. Geometri *plasmatron* pada simulasi

Meshing merupakan metode untuk membagi domain komputasi yang akan disimulasikan menjadi elemen-elemen kecil. Dalam setiap elemen tersebut, persamaan pembangun untuk setiap kasus akan dipecahkan. Salah satu hal yang penting dalam *mesh* adalah ukuran elemen *mesh* yang diterapkan pada model. Semakin kecil ukuran *mesh* pada model, maka hasil yang didapatkan semakin presisi, tetapi membutuhkan daya komputasi dan waktu yang lebih lama dibandingkan dengan *mesh* yang memiliki ukuran lebih besar. Maka dari itu, diperlukan menentukan ukuran elemen *mesh* yang tepat sehingga komputasi dan waktu yang dibutuhkan untuk menjalankan simulasi tidak terlalu lama dan presisi. Untuk hasil *meshing* geometri pemodelan *plasmatron* dapat dilihat pada Tabel 1 berikut.

Tabel 1. *Meshing Quality* pada *Plasmatron*

Meshing				
Ukuran Sel (mm)	Jumlah Sel	Max. Skewness	Min. Skewness	Avg. Skewness
0,5	183852	0,71377	1,31E-10	1,11E-02

2.3 Asumsi dan Pemodelan

Pemodelan fenomena pembakaran pada *plasmatron* dalam penelitian ini dilakukan dengan menetapkan sejumlah asumsi serta pendekatan pemodelan tertentu agar simulasi dapat merepresentasikan kondisi nyata secara lebih mendekati. Proses simulasi dilaksanakan dengan metode *Computational Fluid Dynamics (CFD)*, yang memungkinkan analisis numerik terhadap interaksi kompleks antara aliran fluida, perpindahan panas, serta reaksi kimia yang berlangsung di dalam sistem. Metode CFD dipilih karena mampu memberikan gambaran detail mengenai distribusi kecepatan, tekanan, konsentrasi spesies, maupun temperatur yang menjadi parameter penting dalam memahami karakteristik pembakaran.

Dalam penelitian ini, *ANSYS Fluent* dipilih sebagai perangkat lunak utama, salah satu software CFD yang banyak diaplikasikan dalam bidang teknik dan energi. *ANSYS Fluent* memiliki keunggulan dalam menyediakan berbagai model fisika dan kimia yang relevan untuk memodelkan fenomena pembakaran, termasuk model turbulensi, reaksi kimia, dan transfer energi. Melalui perangkat ini, alur simulasi dapat dilakukan secara sistematis mulai dari pembuatan geometri dan meshing, penentuan kondisi batas, pemilihan model fisik yang sesuai, hingga analisis hasil berupa distribusi temperatur, pola aliran gas, dan karakteristik termal di dalam *plasmatron*. Dengan pendekatan tersebut, penelitian ini diharapkan dapat memberikan pemahaman lebih mendalam mengenai perilaku pembakaran pada *plasmatron* sekaligus mendukung upaya pengembangan teknologi *plasma-fuel system* yang lebih efisien dan berkelanjutan.

Aliran fluida pada simulasi dapat diasumsikan inkompresibel dan dalam kondisi tunak (*steady-state*). Aliran gas pada simulasi ini menggunakan pendekatan Eulerian. Metode pendekatan Eulerian merupakan pendekatan dalam analisis fluida yang berfokus pada pengamatan perubahan sifat-sifat fluida di titik-titik tetap dalam ruang. Dalam metode ini, perhatian pengamatan diberikan pada parameter fluida (seperti kecepatan, tekanan, temperatur, dan massa jenis) di suatu lokasi tertentu yang dapat berubah terhadap waktu. Dalam pendekatan Eulerian, aliran fluida dimodelkan sebagai fase kontinu dengan menggunakan kerangka kerja berbasis metode volume hingga (*finite volume*) [9].

Fenomena perpindahan panas pada sistem diperhitungkan dengan mengaktifkan *energy model* untuk menangkap mekanisme transfer energi yang terjadi di dalam *plasmatron*. Selanjutnya, karakteristik turbulensi aliran fluida dimodelkan menggunakan $k-\epsilon$ RNG *turbulence model*, yang dipilih karena memiliki tingkat akurasi lebih baik dalam merepresentasikan aliran berputar serta variasi skala turbulensi dibandingkan model standar. Selain itu, proses pembakaran pada *plasmatron* yang melibatkan interaksi berbagai spesies kimia juga dianalisis melalui *Species Transport model*. Pemodelan ini memungkinkan perhitungan distribusi fraksi massa tiap spesies hasil pembakaran, sehingga karakteristik nyala api dan emisi yang dihasilkan dapat teridentifikasi secara lebih detail. Dengan kombinasi model tersebut, simulasi diharapkan mampu memberikan representasi yang komprehensif terhadap mekanisme perpindahan panas, dinamika aliran turbulen, serta proses reaksi kimia di dalam *plasmatron*.

2.4 Uji Validasi

Uji validasi dilakukan untuk memastikan bahwa konfigurasi kondisi batas dan parameter simulasi yang digunakan dalam penelitian ini telah ditetapkan dengan benar serta menghasilkan keluaran yang dapat dipertanggungjawabkan. Proses ini melibatkan perbandingan antara data temperatur hasil pembakaran yang diperoleh melalui simulasi *plasmatron* dengan data temperatur hasil pembakaran yang dilaporkan dalam jurnal pendukung sebagai acuan. Dengan adanya perbandingan tersebut, dapat diketahui sejauh mana tingkat kesesuaian model numerik yang digunakan terhadap fenomena nyata yang terjadi di dalam sistem.

Adapun kriteria penilaian yang diterapkan dalam penelitian ini adalah bahwa hasil simulasi dianggap valid apabila selisih antara data temperatur simulasi dengan data acuan dari literatur tidak melebihi 10%. Batas toleransi ini dipilih karena secara umum nilai deviasi di bawah 10% masih dapat diterima dalam kajian berbasis simulasi numerik. Melalui uji validasi ini, model yang diterapkan mampu memberikan representasi yang akurat sehingga hasil analisis termal dan karakteristik pembakaran pada *plasmatron* dapat dijadikan dasar untuk pembahasan lebih lanjut serta pengembangan teknologi sejenis di masa depan.

Sumber validasi penelitian kali ini berasal dari penelitian yang telah dilakukan oleh Messerle dkk. [10]. Untuk hasil uji validasi temperature pada *plasmatron* dapat dilihat pada Tabel 2 berikut. Dari tabel ini dapat dilihat bahwa parameter temperatur memiliki *error* di bawah 10% sehingga *setting* simulasi bisa dikatakan memenuhi uji validasi.

Tabel 2. Uji Validasi Temperatur *Plasmatron*

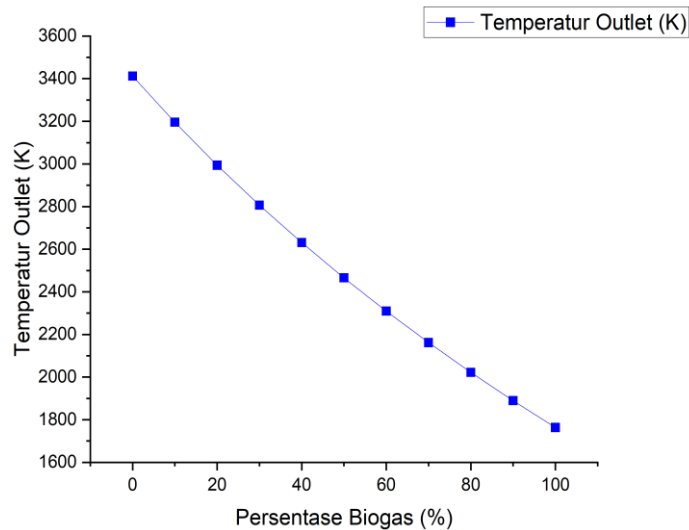
Parameter Validasi	Hasil Jurnal	Hasil Simulasi	%Error
Temperatur sisi <i>outlet</i>	3500 K	3319,01 K	5,17 %

3. Hasil dan Pembahasan

Suhu pembakaran merupakan salah satu parameter utama yang dapat menggambarkan kinerja termal sebuah *plasmatron*, karena berkaitan langsung dengan efisiensi proses serta stabilitas nyala api. Proses pembakaran di dalam *plasmatron* terjadi akibat interaksi antara bahan bakar dengan udara primer maupun udara sekunder yang disuplai ke dalam ruang bakar, sehingga kualitas pencampuran dan distribusi aliran udara sangat menentukan karakteristik nyala serta

penyebaran panas. Perbedaan komposisi bahan bakar yang digunakan, khususnya antara metana murni dan biogas, memberikan pengaruh signifikan terhadap temperatur hasil pembakaran. Hal ini disebabkan karena biogas selain mengandung metana juga memiliki komponen lain seperti CO₂, H₂O, dan N₂ yang memengaruhi karakteristik reaksi pembakaran. Untuk mengetahui distribusi temperatur pembakaran pada setiap variasi persentase biogas, dapat dilakukan analisis dengan berbagai pendekatan, salah satunya adalah melalui metode numerik menggunakan perangkat lunak berbasis *Computational Fluid Dynamics* (CFD).

Grafik temperatur *outlet* pada *plasmatron* yang didapat ditunjukkan pada Gambar 4 berikut.



Gambar 4. Grafik Temperatur Outlet Terhadap Persentase Biogas

Dari grafik di atas dapat disimpulkan bahwa peningkatan persentase penambahan biogas menyebabkan penurunan suhu pada outlet dari *plasmatron*. Penurunan suhu pembakaran disebabkan karena biogas tidak hanya mengandung metana (CH₄) sebagai komponen utama, tetapi juga gas-gas *inert* seperti karbon dioksida (CO₂) dan uap air (H₂O) dalam jumlah yang signifikan. Kehadiran CO₂ dan H₂O berfungsi sebagai pengencer (*diluent*) yang memiliki kapasitas panas spesifik tinggi dan tidak berpartisipasi langsung dalam reaksi pembakaran. Akibatnya, sebagian energi panas hasil oksidasi metana diserap oleh komponen inert ini, sehingga menurunkan nilai kalor efektif campuran bahan bakar dan menurunkan temperatur adiabatik pembakaran. Selain itu, adanya CO₂ dalam campuran bahan bakar memperlambat laju reaksi serta kecepatan nyala (*flame speed*), sehingga intensitas pembakaran dalam *plasmatron* berkurang. Dalam konteks sistem plasma seperti *plasmatron*, kondisi ini menyebabkan energi plasma terbagi antara proses ionisasi dan penyerapan panas oleh CO₂, sehingga temperatur plasma tidak dapat mencapai nilai setinggi pembakaran metana murni [11].

4. Kesimpulan

Berdasarkan simulasi CFD yang telah dilakukan pada penelitian ini didapatkan bahwa seiring bertambahnya persentase biogas pada *plasmatron* menyebabkan penurunan temperatur rata-rata di *outlet*. Hal ini terjadi karena pada biogas memiliki kandungan metana yang lebih rendah dibandingkan bahan bakar dengan menggunakan metana murni, sehingga nilai kalor yang dihasilkan juga lebih kecil dan menyebabkan temperatur pembakaran menurun

5. Daftar Pustaka

- [1] IEA. “*World Energy Outlook 2021*,” www.iea.org/weo, diakses 3 Maret 2025
- [2] Pahlevi R, Thamrin S, Ahmad I, Nugroho FB. Masa Depan Pemanfaatan Batubara sebagai Sumber Energi di Indonesia. *Jurnal Energi Baru dan Terbarukan*. 2024 Jul 31;5(2):50–60.
- [3] Da Silva C V, Beskow AB. CFD Analysis of the Pulverized Coal Combustion Processes in a 160 MWe Tangentially-Fired-Boiler of a Thermal Power Plant. Vol. XXXII.
- [4] Bromberg L, Hadidi K. Plasmatron Reformation of Renewable Fuels [Internet]. 2015. Available from: <https://www.researchgate.net/publication/242371229>
- [5] Gorokhovski MA, Jankoski Z, Lockwood FC, Karpenko EI, Messerle VE, Ustimenko AB. Enhancement of pulverized coal combustion by plasma technology. *Combustion Science and Technology*. 2007 Oct;179(10):2065–90.
- [6] Pawlak-Kruczek H, Mularski J, Ostrycharczyk M, Czerep M, Baranowski M, Mączka T, et al. Application of plasma burners for char combustion in a pulverized coal-fired (PC) boiler – Experimental and numerical analysis. *Energy*. 2023 Sep 15;279.

-
- [7] Ju Y, Sun W. Plasma assisted combustion: Dynamics and chemistry. Vol. 48, *Progress in Energy and Combustion Science*. Elsevier Ltd; 2015. p. 21–83.
- [8] Gupta P, Kurien C, Mittal M. Biogas (a promising bioenergy source): A critical review on the potential of biogas as a sustainable energy source for gaseous fuelled spark ignition engines. *Int J Hydrogen Energy* [Internet]. 2023 Mar 8 [cited 2025 Jul 7];48(21):7747–69. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319922055112>
- [9] Azarpira M, Zarrati AR, Farrokhzad P. Comparison between the Lagrangian and Eulerian approach in simulation of free surface air-core vortices. *Water (Switzerland)*. 2021 Mar 1;13(5).
- [10] Messerle V, Ustimenko A. Modelling of the pulverized coal plasma preparation for combustion. *Physical Sciences and Technology*. 2021 Jun 30;8(1–2):14–25.
- [11] Molino A, Larocca V, Chianese S, Musmarra D. Biofuels production by biomass gasification: A review. Vol. 11, *Energies*. MDPI AG; 2018.