

EVALUASI KINERJA *ELECTROSTATIC PRECIPITATOR* PASCA *MAINTAINANCE OUTAGE* PADA SISTEM GAS BUANG PLTU

Annisa Salzabilah, Anis Roihatin, Supriyo, Mulyono

Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Semarang
Jl. Prof Sudarto SH, Tembalang, Semarang, Indonesia
*E-mail: anis.roihatin@polines.ac.id

Abstract

Electrostatic Precipitator (ESP) is a particulate pollution control technology utilized in the flue gas systems of coal-fired power plants. This study aims to evaluate ESP performance following a maintenance outage and analyze the primary factors influencing its collection efficiency. The evaluation methodology involves a comparative analysis of field operational data and flue gas emission levels recorded before and after the maintenance outage. The evaluation results indicate that the total particulate collection efficiency improved after the maintenance outage compared to pre-maintenance levels. However, it still falls short of the design efficiency target of 99,5%. Prior to the maintenance outage, particulate collection efficiency tended to fluctuate despite increases in electric field strength, ranging from 81.67% to 89.10%. This suboptimal performance was attributed to the back corona phenomenon, high fly ash resistivity, and non-uniform flue gas velocity distribution within the ESP fields. In contrast, post-maintenance efficiency demonstrated a steady upward trend correlating with increased electric field strength, achieving 90.34% to 95.61%. Flue gas emission data also revealed a reduction in both particulate matter and SO_x concentrations following the outage. Although ESP performance does not directly affect SO_x emission reduction, the use of low-sulfur coal characteristics was proven to increase particulate resistivity, significantly impeding the dust collection rate. This study concludes that while ESP performance significantly improved post-maintenance outage—thereby reducing emissions to maintain regulatory compliance and operational sustainability—further optimization strategies are required. Implementing adjustments to rapping frequencies and modifying the gas distribution screen are necessary to fully restore ESP efficiency to its original design target of 99.5%.

Keywords : efficiency, ESP, flue gas, coal-fired power plants.

Abstrak

Electrostatic Precipitator (ESP) merupakan teknologi pengendalian polusi partikulat dalam sistem gas buang Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja ESP pasca maintenance outage dan menganalisis faktor-faktor utama yang memengaruhi efisiensinya. Metodologi evaluasi dilakukan melalui analisis data operasional lapangan baik sebelum maupun setelah maintenance outage serta kandungan emisi gas buangnya. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa efisiensi penyisihan total partikulat pasca maintenance outage meningkat dibandingkan sebelum maintenance outage. Namun belum dapat mencapai efisiensi pada kondisi desain yaitu 99,5%. Efisiensi penyisihan partikulat sebelum maintenance outage cenderung fluktuatif dengan kenaikan kuat medan listrik antara 81,67% hingga 89,10%. Hal tersebut diakibatkan adanya fenomena back corona, resistivitas abu terbang yang tinggi dan distribusi kecepatan gas buang yang tidak seragam di dalam field ESP. Sedangkan efisiensi pasca maintenance outage meningkat seiring dengan kenaikan kuat medan listrik hingga 90,34% hingga 95,61%. Emisi gas buang juga menunjukkan bahwa kandungan partikulat dan SO_x mengalami penurunan pasca maintenance outage. Walaupun kinerja ESP tidak berpengaruh langsung terhadap penurunan emisi gas SO_x, karakteristik batubara dengan kandungan sulfur rendah terbukti meningkatkan resistivitas partikulat, yang secara signifikan menghambat laju pengumpulan debu. Studi ini menyimpulkan bahwa kinerja ESP meningkat pasca maintenance outage dan mampu menurunkan emisi gas buang untuk menjaga kepatuhan ambang batas emisi lingkungan serta keberlanjutan operasional PLTU. Strategi optimalisasi kinerja ESP seperti penyesuaian frekuensi rapping dan modifikasi gas distribution screen perlu dilakukan untuk memulihkan efisiensi ESP kembali ke target desain sebesar 99,5%.

Kata kunci : efisiensi, ESP, gas buang, PLTU

PENDAHULUAN

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) berbahan bakar batubara masih menjadi salah satu sumber utama penyedia energi listrik di Indonesia. Di sisi lain, proses pembakaran batubara menghasilkan emisi partikulat (fly ash) yang berpotensi menurunkan kualitas udara, mengganggu kesehatan manusia, dan memberikan dampak terhadap lingkungan. Oleh karena itu, pengendalian emisi partikulat menjadi salah satu aspek penting dalam pengoperasian PLTU agar memenuhi baku mutu emisi yang telah ditetapkan oleh pemerintah dan mendukung pengelolaan lingkungan yang berkelanjutan.

Salah satu teknologi yang paling banyak digunakan untuk mengendalikan emisi partikulat pada PLTU adalah **Electrostatic Precipitator (ESP)**. ESP bekerja dengan memanfaatkan medan listrik bertegangan tinggi untuk memberikan muatan listrik pada partikel debu sehingga partikel tersebut bergerak menuju collecting plate dan terpisah dari aliran gas buang. Teknologi ini banyak diterapkan karena memiliki efisiensi penangkapan partikulat yang tinggi, kehilangan tekanan (*pressure drop*) yang rendah, serta mampu beroperasi pada debit gas buang yang besar (Badran & Mansour, 2022).

Menurut Badran dan Mansour (2022), efisiensi penangkapan partikulat pada ESP dipengaruhi oleh berbagai parameter operasi, seperti kuat medan listrik, tegangan dan arus pada transformator-rectifier (TR Set), kecepatan aliran gas, luas bidang pengumpul (*specific collecting area*), karakteristik abu terbang, serta kecepatan migrasi partikel (*particle migration velocity*). Evaluasi terhadap parameter-parameter tersebut menjadi penting untuk memastikan ESP tetap bekerja secara optimal selama masa operasi pembangkit.

Selain faktor desain, performa ESP juga dipengaruhi oleh kondisi operasi pembangkit. Penelitian Salleh dkk. (2019) menunjukkan bahwa perubahan laju aliran gas (*gas flow rate*), kecepatan gas, jumlah collecting plate, serta fenomena *re-entrainment* dan *gas sneakage* dapat memengaruhi efisiensi pengumpulan partikulat. Penelitian tersebut juga menjelaskan bahwa peningkatan jumlah collecting plate tidak selalu menghasilkan peningkatan efisiensi yang signifikan setelah mencapai kondisi optimum, sehingga evaluasi kinerja perlu dilakukan berdasarkan kondisi operasi aktual.

Seiring bertambahnya umur operasi PLTU, kinerja ESP dapat mengalami penurunan akibat korosi, fouling, penumpukan abu pada collecting plate, penurunan kualitas elektroda pelepas (*discharge electrode*), maupun perubahan karakteristik batubara yang digunakan. Penurunan kinerja tersebut dapat meningkatkan konsentrasi partikulat pada gas buang sehingga menyebabkan ketidaksesuaian terhadap baku mutu emisi. Salah satu langkah untuk mengatasi penurunan kinerja ESP dilaksanakan Manitenance Outage. Maintenance outage merupakan pemeliharaan yang dilakukan untuk perbaikan atau penggantian komponen yang tidak dapat ditunda hingga jadwal maintenance berkala berikutnya. Biasanya melibatkan pekerjaan mendesak yang diperlukan untuk mencegah kerusakan lebih lanjut. Oleh karena itu evaluasi kinerja ESP menjadi langkah penting untuk mengetahui tingkat efisiensi penangkapan partikulat sekaligus mengidentifikasi penyebab penurunan performa agar tindakan perbaikan dapat dilakukan secara tepat (Liu dkk., 2017).

Penelitian terbaru oleh Mahendra dkk. (2025) menunjukkan bahwa pengaturan tegangan referensi dan arus operasi memiliki pengaruh yang signifikan terhadap efisiensi ESP. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa kondisi operasi yang tidak optimal menyebabkan efisiensi penangkapan partikulat menurun, sedangkan pengaturan tegangan, arus, serta temperatur operasi yang sesuai mampu meningkatkan efisiensi hingga mendekati 99,5%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa pemantauan parameter operasi secara kontinu merupakan bagian penting dalam evaluasi kinerja ESP di industri.

Berdasarkan uraian tersebut, evaluasi kinerja Electrostatic Precipitator pada PLTU perlu dilakukan untuk mengetahui tingkat efektivitas sistem pengendalian emisi partikulat berdasarkan parameter operasi aktual dan efisiensi penangkapan fly ash. Hasil evaluasi diharapkan dapat menjadi dasar dalam menentukan strategi optimasi operasi, meningkatkan keandalan peralatan, mengurangi konsumsi energi, serta memastikan bahwa emisi partikulat yang dihasilkan tetap memenuhi persyaratan lingkungan yang berlaku.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode **kuantitatif** dengan pendekatan **deskriptif-analitis** untuk mengevaluasi kinerja **Electrostatic Precipitator (ESP)** pada sistem gas

buang PLTU. Evaluasi dilakukan berdasarkan data operasi aktual (operating data) yang diperoleh dari unit pembangkit selama periode pengamatan. Parameter operasi dianalisis untuk mengetahui tingkat efisiensi ESP dalam menangkap partikulat hasil pembakaran batubara serta mengidentifikasi faktor-faktor yang memengaruhi kinerjanya. Objek penelitian adalah unit Electrostatic Precipitator (ESP) yang terpasang pada sistem gas buang PLTU di PT PLN Indonesia Power UBP Jateng 2 Adipala dengan spesifikasi sesuai pada Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi Electrostatic Presipitator (ESP) pada PLTU PT PLN Indonesia Power UBP Jateng 2 Adipala

No.	Parameter	Keterangan
1.	ESP Model	2FAA4x45.0M-2x147.6-150
2.	Supporting Unit Capacity	660 MW
3.	Quantity of Precipitator Rooms	2
4.	Quantity of Electric Fields	4
5.	Anode Plate Type	Big C Type
6.	Height of Anode Plate	15.0 m
7.	Quantity of Anode Plate	2664
8.	Quantity of Large Cathode Frame	8
9.	Inlet Smoke Temperature	135°C
10.	Flow Area	418.2 m ²
11.	Discharge Electrode Model	RDE dan Spiral
12.	Ash Removal Mode	Dry Ash Removal System
13.	Design Ash Removal Efficiency	≥99.5%
14.	Manufacturer	Zhejiang Feida Mechanical & Electrical Co. , Ltd

Pengambilan data dilakukan selama periode operasi normal pembangkit sebelum dan sesudah maintenance outage. Kinerja ESP dinilai berdasarkan Efisiensi penangkapan partikulat (%), Konsentrasi partikulat outlet serta hubungan parameter operasi terhadap perubahan efisiensi. Adapun persamaan yang digunakan pada evaluasi kinerja ESP meliputi:

1. Perhitungan Luas Satu Plat Pengumpul

$$A = P \times L \times 2 \quad (1)$$

Keterangan:

A : Luas efektif *collecting plate* (m²)

P : Panjang plat (m)

L : Lebar plat (m)

Perhitungan banyak plat pengumpul abu yaitu:

$$N = \text{Baris} \times \text{Kolom} \times \text{Field} \times \text{Jumlah ESP} \quad (2)$$

Perhitungan luas seluruh plat pengumpul yaitu:

$$A_e = \text{Luas permukaan plat} \times \text{Jumlah plat} \quad (3)$$

2. Kuat Medan Listrik

$$E = \frac{V}{d} \quad (4)$$

Keterangan:

E : Kuat medan listrik (V/m)

V : Tegangan output transformator (V)

d : Jarak antara 2 plat pengumpul (m)

3. Kecepatan Migrasi Partikel

$$\omega = \frac{2.K_0.P.E_c.E_p}{3\mu} \quad (5)$$

Keterangan:

ω : Kecepatan migrasi partikel (m/s)

K_0 : *Permittivity* ($8,85 \times 10^{-12}$ F/m)

P : Tekanan (1 atm)

μ : Viskositas gas buang ($1,8 \times 10^{-5}$)

E_c : Kuat medan listrik (V/m)

E_p : Kuat medan *precipitator* (V/m)

Nilai $E_p = E_c$

4. Efisiensi Kinerja ESP

Perhitungan efisiensi pengumpulan partikel menggunakan persamaan **Deutsch-Anderson** yaitu sebagai berikut.

$$\eta = 1 - e^{-\left(\frac{\omega.A}{Q}\right)} \quad (7)$$

Keterangan:

η : Efisiensi *Electrostatic Precipitator*

ω : Kecepatan migrasi partikel (m/s)

A : Luas media penangkapan (m^2)

Q : Laju aliran gas (m^3/s)

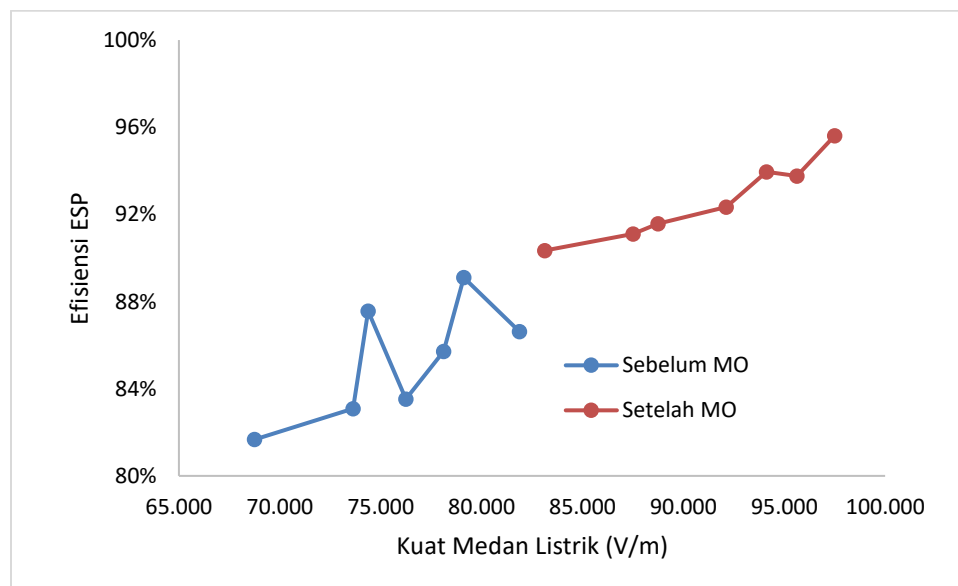
e : Bilangan natural (2,718)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan pengolahan data operasional ESP dan evaluasi kinerja ESP didapatkan efisiensi penangkapan partikulat (%) mengalami kenaikan pasca maintenance outage, sedangkan emisi gas buang outlet menurun seiring dengan kenaikan efisiensi penangkapan partikulat. Hubungan parameter operasi terhadap perubahan efisiensi dan emisi gas buang dijelaskan lebih rinci sebagai berikut

Hubungan kuat medan listrik terhadap efisiensi ESP

Berdasarkan Persamaan Deutsch-Anderson, efisiensi ESP sangat ditentukan oleh kecepatan migrasi partikel, yaitu kecepatan debu bergerak menuju pelat pengumpul. Kuat medan listrik mengontrol kecepatan ini secara langsung melalui rumus gaya elektrostatik (persamaan (5)). Kuat medan listrik yang tinggi memberikan gaya dorong yang lebih besar pada partikel debu sehingga debu berpindah secara cepat menuju pelat pengumpul sebelum sempat lolos terbawa aliran gas buang ke cerobong.



Gambar 1. Grafik hubungan kuat medan listrik terhadap efisiensi ESP sebelum dan sesudah MO

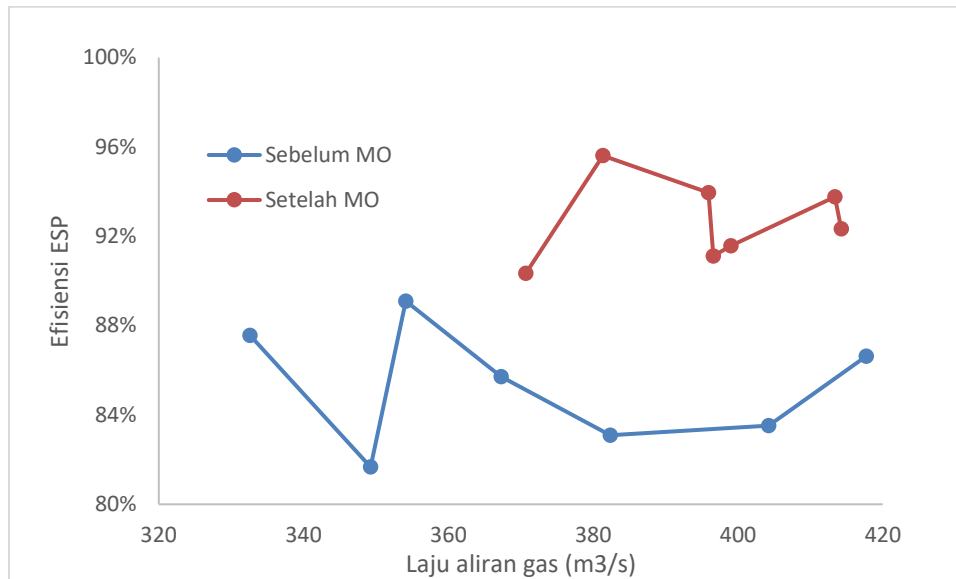
Meskipun kuat medan listrik yang tinggi meningkatkan efisiensi, penerapannya memiliki batas aman operasi. Jika medan listrik terlalu tinggi hingga melewati kekuatan dielektrik gas, akan terjadi korsleting/loncatan bunga api listrik (*sparking*) yang justru menurunkan tegangan operasional secara drastis. Selain itu pada debu dengan resistivitas tinggi, medan listrik yang terlalu kuat pada lapisan debu di pelat pengumpul dapat memicu ionisasi balik (*back corona*) yang merusak efisiensi penangkapan.

Gambar 1 menunjukkan hubungan antara kuat medan listrik terhadap efisiensi sebelum dan sesudah maintenance outage (MO). Efisiensi penyisihan total partikulat pasca maintenance outage meningkat dibandingkan sebelum maintenance outage. Namun belum dapat mencapai efisiensi pada kondisi desain yaitu 99.5%. Efisiensi penyisihan partikulat sebelum maintenance outage cenderung fluktuatif dengan kenaikan kuat medan listrik antara 81,67% hingga 89,10%. Hal tersebut diakibatkan adanya fenomena back corona, resistivitas abu terbang yang tinggi dan distribusi kecepatan gas buang yang tidak seragam di dalam field ESP. Sedangkan efisiensi pasca maintenance outage meningkat seiring dengan kenaikan kuat medan listrik hingga 90,34% hingga 95,61%.

Hubungan laju aliran gas terhadap efisiensi ESP

Semakin tinggi laju aliran gas yang masuk ke dalam ESP, maka efisiensi penangkapan partikulat atau abu terbang (*fly ash*) akan semakin menurun. Hal ini sesuai dengan Persamaan Deutsch-Anderson. Laju aliran gas yang tinggi meningkatkan kecepatan linier gas di dalam ruangan ESP sehingga waktu tinggal (*residence time*) partikel debu di dalam medan listrik menjadi lebih singkat. Partikel bergerak terlalu cepat melewati pelat pengumpul, sehingga tidak memiliki cukup waktu untuk menerima muatan listrik (ionisasi) secara maksimal dan bermigrasi menuju pelat pengumpul (*collecting electrode*).

Gambar 2 menunjukkan hubungan laju aliran gas terhadap efisiensi ESP sebelum dan sesudah maintenance outage. Efisiensi ESP pasca maintenance outage meningkat dibandingkan sebelum maintenance outage, namun cenderung fluktuatif dengan kenaikan laju aliran gas. Hal ini disebabkan karena selain dipengaruhi laju aliran gas, efisiensi ESP juga dipengaruhi oleh kuat medan listrik seperti terlihat pada Gambar 1.

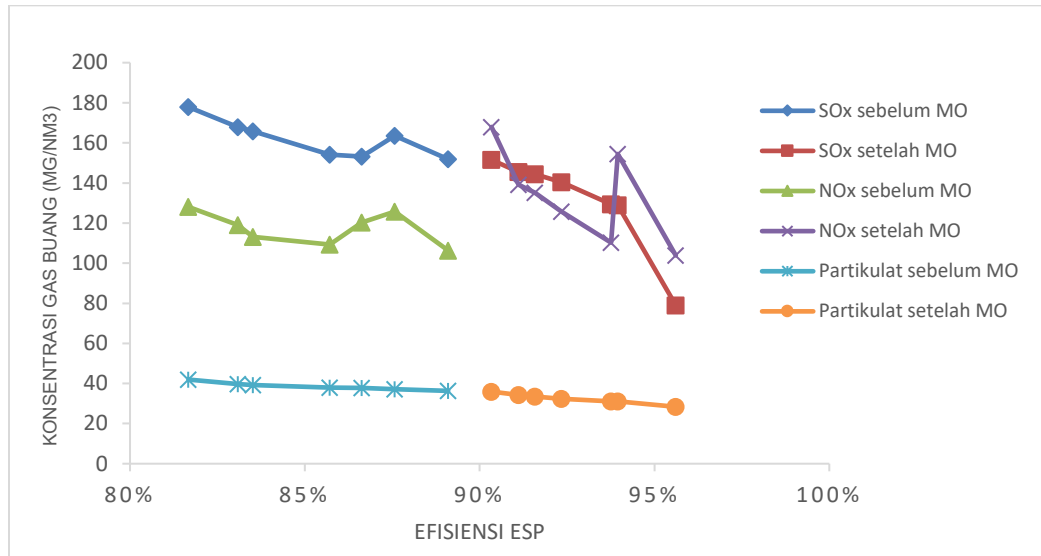


Gambar 2. Grafik hubungan laju aliran gas terhadap efisiensi ESP sebelum dan sesudah MO

Pengaruh Efisiensi ESP terhadap Emisi Gas Buang

Efisiensi ESP berbanding lurus dengan penurunan emisi gas buang, di mana ESP mampu menangkap partikulat (fly ash) secara signifikan untuk memenuhi standar lingkungan. Peningkatan efisiensi ESP secara langsung dapat menurunkan tingkat opasitas (kepekatan asap) dan mencegah polusi visual berupa asap hitam dari cerobong. Secara umum, efisiensi ESP tidak berpengaruh langsung terhadap penurunan emisi gas SO_x dan NO_x, karena ESP dirancang khusus untuk menangkap polutan partikulat padat, bukan gas. Sebaliknya, kandungan SO_x dalam gas buang justru mempengaruhi efisiensi ESP dengan mempengaruhi resistivitas abu terbang (fly ash).

Gambar 3 menunjukkan hubungan efisiensi ESP terhadap emisi gas buang, khususnya partikulat. Dapat dilihat bahwa semakin tinggi efisiensi ESP, konsentrasi partikulat dan SO_x cenderung menurun. Selain itu juga terlihat bahwa pasca maintenance outage efisiensi ESP lebih tinggi dan konsentrasi partikulat serta SO_x juga lebih rendah. Sedangkan emisi gas NO_x meningkat pasca maintenance outage pada ESP. Fenomena tersebut umumnya disebabkan oleh beberapa faktor teknis.



Gambar 3. Grafik hubungan Efisiensi ESP terhadap emisi gas buang

Diantaranya pembentukan ozon oleh efek corona (*Corona Discharge*). Tegangan listrik DC yang tinggi pada elektroda ESP memicu pelepasan muatan listrik (corona). Reaksi ionisasi ini memecah molekul oksigen menjadi radikal bebas yang membentuk ozon (O_3). Ketika ozon ini bertemu dengan gas Nitrogen Monoksida (NO) bawaan dari ruang bakar, terjadi reaksi oksidasi sekunder di dalam ESP yang mengubah NO menjadi Nitrogen Dioksida (NO_2). Hal ini membuat konsentrasi gas NO_2 (komponen utama NO_x) terukur lebih tinggi. Selain itu juga dapat disebabkan karena fluktuasi temperatur dan aliran gas buang yang melintasi ESP memengaruhi kestabilan molekul gas. Jika terjadi retensi panas atau dinamika suhu tinggi di area setelah ESP, reaksi pembentukan NO_x termal sekunder masih berpotensi terjadi jika terdapat sisa oksigen bebas yang tinggi dari proses pembakaran. Secara umum, emisi gas buang sebelum dan sesudah maintenance outage telah memenuhi standar baku mutu gas buang (emisi) Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) di Indonesia yang diatur dalam Permen LHK No. 15 Tahun 2019 tentang Baku Mutu Emisi Pembangkit Listrik Tenaga Termal.

KESIMPULAN

Efisiensi ESP pasca maintenance outage meningkat dibandingkan sebelum maintenace outage. Namun belum dapat mencapai efisiensi pada kondisi desain yaitu 99.5%. Efisiensi ESP sebelum maintenance outage cenderung fluktuatif dengan kenaikan kuat medan listrik antara 81,67% hingga 89,10%. Hal tersebut diakibatkan adanya fenomena back corona,

resistivitas abu terbang yang tinggi dan distribusi kecepatan gas buang yang tidak seragam di dalam field ESP. Sedangkan efisiensi pasca maintenance outage meningkat seiring dengan kenaikan kuat medan listrik hingga 90,34% hingga 95,61%. Emisi gas buang menunjukkan penurunan kandungan partikulat dan SO_x pasca maintenance outage, namun kandungan NO_x mengalami peningkatan pasca maintenance outage. Emisi gas buang sebelum dan sesudah maintenance outage telah memenuhi standar baku mutu gas buang PLTU di Indonesia. Perlu adanya strategi optimalisasi kinerja ESP seperti penyesuaian frekuensi rapping dan modifikasi *gas distribution screen* untuk memulihkan efisiensi ESP sesuai desain sebesar 99,5%.

DAFTAR PUSTAKA

- A. Sudrajad dan W. Firmansyah, “Studi Variasi Tegangan Discharge pada Alat Electrostatic Precipitator untuk Filter Udara,” *Flywheel: J. Teknik Mesin Untirta*, vol. 5, no. 1, Apr. 2019.
- Badran, M., & Mansour, A. M. (2022). *Evaluating Performance Indices of Electrostatic Precipitators*. **Energies**, **15**(18), 6647.
- Guntoro, Berkah Fajar T.K, Asep Yoyo Wardaya, “The Effect of Electrostatic Precipitator Operating Methods on Energy Consumption Efficiency” Published in International Research Journal of Innovations in Engineering and Technology - IRJIET, Volume 7, Issue 8, pp 36-47, August 2023. Article DOI <https://doi.org/10.47001/IRJIET/2023.708006>
- K. P. Shah, “Construction , Working , Operation and Maintenance of Electro Electrostatic Precipitators (ESPs),” no. January, pp. 1–91, 2017,[Online]. Available: www.practicalmaintenance.net
- Liu, H., et al. (2017). *Evaluation on the Energy Efficiency of Electrostatic Precipitators in Coal-Fired Power Plants*. **Electric Power**, **50**(11), 22–27.
- M. Latifi, M. Aghaei, and A. Naseri, “Evaluating performance indices of electrostatic precipitators,” *Energies*, vol. 15, no. 18, pp. 6647, 2023.
- Mahendra, A. Y., Subairi, & Sari, R. D. J. K. (2025). *Analysis of Electrostatic Precipitator (ESP) Performance Based on Changes in Reference Voltage and Temperature in the Coal Boiler*. **Jurnal Media Computer Science**, **4**(2).
- Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan No. 15 Tahun 2019 tentang Baku Mutu Emisi Pembangkit Listrik Tenaga Termal.

- Pradipta, I. (2024). Analisa Kinerja Electrostatic Precipitator (ESP) Berdasarkan Besar Arus Sekunder Transformer di PLTU Tanjung Jati B Unit 3. *ENERGI & KELISTRIKAN*, 15(2), 60– 72.
- Rofandi, M. N. & Irwanto. (2022). Sistem Kerja Electrostatic Precipitator (ESP) Untuk Menangkap Abu Hasil Proses Pembakaran di PLTU PT. Dian Swastatika Sentosa Serang Power Plant. *G-Tech: Jurnal Teknologi Terapan*, 6(2), 376–386.
- Salleh, S. F., Khan, A., Hipolito, C. N., Kinidi, L., & Abang Hardin, D. S. H. (2019). *An Analytical Modeling Approach for Performance Evaluation of Electrostatic Precipitator (ESP)*. ***Journal of Energy and Safety Technology***, 1(2), 63–73.
- Winarno, J. (2020). Analisis Kinerja Electrostatic Precipitator (ESP) Berdasarkan Pembagian Besarnya Arus Transformator di PT. PJB UBJOM PLTU Paiton. *Jurnal EECCIS*, 14(2), 45–57
- Y.-J. Li and Y.-X. Chen, “Application of HighVoltage Power Supply on Electrostatic Precipitator,” *World Journal of Engineering and Technology*, vol. 5, no. 2, pp. 52–60, 2017.