

Analisis Korosi pada Elektroda Discharge di Sistem Electrostatic Precipitator (ESP) Pada Boiler dan Pengaruhnya terhadap Kinerja Listrik

Bayu Pradana¹, Siti Anisah², Haris Gunawan³

¹Teknik elektro, Fakultas Sains Dan Teknologi, Universitas Pembangunan Panca Budi

²Teknik elektro, Fakultas Sains Dan Teknologi, Universitas Pembangunan Panca Budi

³Teknik elektro, Fakultas Sains Dan Teknologi, Universitas Pembangunan Panca Budi

lbayupradana958@gmail.com

Corresponding Author: Bayu Pradana

ABSTRACT

The Electrostatic Precipitator (ESP) is a critical component for particulate emission control in industrial boiler systems. ESP performance is strongly influenced by the condition of discharge electrodes, which are responsible for generating corona discharge and gas ionization processes. During long-term operation, the electrodes are exposed to hot flue gas, moisture, and corrosive compounds from shell combustion, leading to corrosion and surface degradation that may reduce electrical performance.

This study aims to analyze the corrosion condition of discharge electrodes in an ESP installed on a 24 ton/h palm-shell-fired boiler and its effect on electrical performance, particularly operating voltage and current. The research employed visual inspection of electrode surfaces, interviews with maintenance personnel, and monitoring of electrical parameters from the transformer-rectifier panel before and after mechanical cleaning and surface coating. A comparative analysis was conducted to evaluate performance changes resulting from electrode maintenance.

The results indicate that corroded electrodes significantly decreased secondary current and operational stability of the ESP. After cleaning and coating, the secondary current increased by up to 254%, the conduction angle became more stable, and overall ESP performance improved substantially. These findings demonstrate that corrosion mitigation and periodic electrode maintenance are essential for maintaining ESP electrical reliability and effective particulate emission control in industrial boilers.

Keywords: *Electrostatic Precipitator, discharge electrode, corrosion, surface coating, electrical performance*

ABSTRAK

Electrostatic Precipitator (ESP) merupakan peralatan utama dalam pengendalian emisi partikulat pada sistem boiler industri. Kinerja ESP sangat dipengaruhi oleh kondisi elektroda discharge yang berfungsi menghasilkan corona discharge dan proses ionisasi gas. Dalam operasi jangka panjang, elektroda terpapar gas panas, uap air, serta senyawa korosif hasil pembakaran cangkang yang dapat memicu korosi dan degradasi permukaan, sehingga berpotensi menurunkan kinerja listrik sistem.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis tingkat korosi pada elektroda discharge ESP pada boiler berbahan bakar cangkang kelapa sawit berkapasitas 24 ton/jam serta pengaruhnya terhadap parameter kelistrikan, khususnya tegangan dan arus operasi. Metode yang digunakan meliputi observasi visual kondisi elektroda, wawancara teknisi pemeliharaan, serta pencatatan parameter listrik dari panel transformer-rectifier sebelum dan sesudah dilakukan pembersihan mekanis dan pelapisan permukaan (coating). Analisis dilakukan secara komparatif untuk mengevaluasi perubahan kinerja sistem akibat perbaikan elektroda.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa kondisi elektroda yang berkarat menyebabkan penurunan signifikan pada arus sekunder dan kestabilan operasi ESP. Setelah dilakukan pembersihan dan coating, arus sekunder meningkat hingga 254%, sudut konduksi menjadi lebih stabil, serta kinerja keseluruhan ESP mengalami perbaikan yang signifikan. Temuan ini menunjukkan bahwa pengendalian korosi dan perawatan elektroda secara berkala berperan penting dalam menjaga keandalan sistem kelistrikan ESP serta efektivitas pengendalian emisi pada boiler industri.

Kata Kunci: *Electrostatic Precipitator, elektroda discharge, korosi, coating, kinerja listrik*



Lisensi

Lisensi Internasional Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0.

1. Pendahuluan

Pembangkit listrik berbasis boiler masih menjadi salah satu sumber utama energi listrik di sektor industri dan ketenagalistrikan di Indonesia. Proses pembakaran bahan bakar di dalam boiler menghasilkan gas buang yang mengandung partikulat seperti abu terbang (fly ash), sulfur oksida, nitrogen oksida, serta senyawa lain yang berpotensi mencemari lingkungan apabila tidak dikendalikan secara efektif. Oleh karena itu, sistem pengendalian emisi menjadi komponen penting dalam operasi boiler guna memenuhi standar baku mutu lingkungan serta menjaga keberlanjutan operasional pembangkit.

Salah satu peralatan utama yang digunakan untuk mengendalikan partikulat tersebut adalah Electrostatic Precipitator (ESP). ESP bekerja dengan memanfaatkan medan listrik bertegangan tinggi untuk mengionisasi gas buang sehingga partikel debu memperoleh muatan listrik dan tertarik menuju pelat pengumpul (collecting plate). Efektivitas sistem ini sangat dipengaruhi oleh kondisi komponen internal, khususnya elektroda discharge yang berfungsi menghasilkan efek corona dan menyediakan ion bagi proses pengisian muatan partikel.

Penelitian sebelumnya pada PLTU melaporkan bahwa perbaikan sistem proteksi interferensi pada ESP dapat meningkatkan keandalan operasi serta menekan gangguan kelistrikan selama proses pengendalian partikulat (Sinurat et al., 2022). Dalam operasi jangka panjang, elektroda discharge terpapar lingkungan gas panas yang mengandung senyawa korosif, uap air, serta partikel abrasif. Paparan tersebut dapat memicu terjadinya korosi, perubahan geometri ujung elektroda, serta degradasi permukaan material yang berpotensi menurunkan intensitas medan listrik dan kestabilan pelepasan corona. Dampak ini pada akhirnya memengaruhi parameter kelistrikan ESP, seperti arus sekunder, tegangan operasi, dan efisiensi penangkapan partikulat.

Selain kondisi material elektroda, kualitas sistem tenaga listrik juga berperan dalam menentukan kestabilan operasi ESP. Aliran daya reaktif, ketidakseimbangan arus, serta faktor daya rendah dilaporkan dapat menurunkan efisiensi sistem kelistrikan dan membebani transformator, sehingga berpotensi mengganggu operasi peralatan listrik tegangan tinggi, termasuk ESP (Bishri et al., 2024; Laia, Rahmaniari, & Gunawan, 2023).

Meskipun berbagai kajian mengenai ESP telah dilakukan, penelitian yang secara khusus mengaitkan tingkat korosi elektroda discharge pada sistem ESP boiler dengan perubahan parameter kinerja listrik berdasarkan pengukuran lapangan masih relatif terbatas, khususnya pada pembangkit berbahan bakar cangkang. Pemahaman mengenai hubungan antara degradasi elektroda dan karakteristik kelistrikan sangat penting sebagai dasar perencanaan pemeliharaan, pemilihan metode perlindungan permukaan elektroda, serta peningkatan keandalan sistem pengendalian emisi.

2. Tinjauan Pustaka

2.1 Electrostatic Precipitator (ESP)

Electrostatic Precipitator (ESP) merupakan peralatan pengendalian emisi partikulat yang banyak digunakan pada sistem boiler industri karena kemampuannya menangkap partikel debu dengan efisiensi tinggi pada laju alir gas yang besar. Prinsip kerja ESP didasarkan pada pembentukan medan listrik bertegangan tinggi antara elektroda discharge dan pelat



pengumpul (collecting plate), sehingga gas buang mengalami proses ionisasi dan partikel padat memperoleh muatan listrik sebelum ditarik menuju permukaan pelat pengumpul.

Secara umum, sistem ESP terdiri atas beberapa komponen utama, yaitu elektroda discharge sebagai sumber pembentukan corona discharge, pelat pengumpul sebagai media deposisi partikel, unit catu daya tegangan tinggi berbasis transformer–rectifier (TR set), sistem isolator, serta mekanisme rapping yang berfungsi melepaskan debu dari pelat agar jatuh ke hopper. Interaksi antara komponen-komponen tersebut menentukan kestabilan operasi dan efisiensi penangkapan partikulat.

Kinerja ESP sangat dipengaruhi oleh besar medan listrik yang terbentuk di dalam ruang pengendapan, karakteristik corona discharge, sifat listrik partikel, serta kondisi permukaan elektroda. Parameter kelistrikan seperti tegangan sekunder, arus sekunder, sudut konduksi, dan kestabilan operasi sering digunakan sebagai indikator performa sistem. Gangguan pada salah satu komponen, khususnya elektroda discharge, dapat menyebabkan penurunan intensitas medan listrik dan fluktuasi arus, yang pada akhirnya berdampak pada efektivitas pengendalian emisi.

Dalam konteks operasi boiler berbahan bakar cangkang kelapa sawit, ESP bekerja pada kondisi termal dan kimia yang berat akibat tingginya kandungan partikulat, uap air, serta senyawa reaktif dalam gas buang. Kondisi ini menjadikan keandalan komponen internal ESP, terutama elektroda discharge, sebagai faktor kunci dalam menjaga kestabilan kinerja listrik dan keberlanjutan operasi sistem pengendalian emisi.

2.2 Corona Discharge dan Proses Ionisasi

Corona discharge merupakan fenomena pelepasan muatan listrik yang terjadi ketika medan listrik di sekitar ujung elektroda discharge cukup tinggi untuk menyebabkan molekul gas di sekitarnya mengalami ionisasi tanpa membentuk loncatan bunga api penuh (spark). Pada kondisi ini, elektron bebas dipercepat oleh medan listrik dan menumbuk molekul gas netral, sehingga menghasilkan ion positif dan elektron tambahan. Proses berantai tersebut menciptakan zona ionisasi di sekitar elektroda yang dikenal sebagai daerah corona.

Ion-ion yang terbentuk akibat corona discharge kemudian bergerak mengikuti garis medan listrik menuju elektroda dengan polaritas berlawanan. Dalam aliran gas buang pada ESP, ion bermuatan tersebut akan bertumbukan dengan partikel debu dan mentransfer muatan listriknya, sehingga partikel menjadi bermuatan. Partikel bermuatan selanjutnya tertarik secara elektrostatis menuju pelat pengumpul dan terdeposisi pada permukaannya.

Efektivitas proses ionisasi sangat dipengaruhi oleh intensitas medan listrik, bentuk geometris ujung elektroda, jarak antar elektroda, serta kondisi permukaan material. Ujung elektroda yang tajam mampu menghasilkan gradien medan listrik yang tinggi sehingga memicu corona discharge yang stabil dan kontinu. Sebaliknya, elektroda yang mengalami keausan atau korosi cenderung menghasilkan corona yang lemah dan tidak stabil, sehingga menurunkan jumlah ion yang terbentuk dan mengurangi efisiensi pengisian muatan partikel.

Selain faktor geometris, sifat gas buang seperti temperatur, kelembapan, dan komposisi kimia juga memengaruhi karakteristik corona discharge. Kandungan uap air dan senyawa asam dalam gas hasil pembakaran cangkang kelapa sawit dapat mengubah konduktivitas



gas serta mempercepat degradasi permukaan elektroda, yang pada akhirnya berdampak pada kestabilan proses ionisasi di dalam ESP.

2.3 Korosi pada Elektroda Discharge

Elektroda discharge pada sistem Electrostatic Precipitator (ESP) beroperasi dalam lingkungan yang ekstrem, yaitu temperatur tinggi, paparan uap air, serta keberadaan senyawa kimia reaktif hasil pembakaran bahan bakar cangkang kelapa sawit, seperti sulfur oksida, klorida, dan nitrogen oksida. Kombinasi faktor termal dan kimia tersebut dapat memicu terjadinya oksidasi suhu tinggi, reaksi elektrokimia, serta pembentukan lapisan oksida pada permukaan elektroda, yang secara umum dikategorikan sebagai proses korosi.

Korosi yang terjadi pada elektroda discharge tidak hanya menyebabkan penipisan material, tetapi juga mengubah morfologi permukaan dan geometri ujung elektroda. Pembentukan kerak oksida dan pembulatan ujung jarum mengurangi ketajaman elektroda, sehingga menurunkan gradien medan listrik lokal yang diperlukan untuk memicu corona discharge. Selain itu, lapisan korosi yang bersifat isolatif dapat meningkatkan resistansi permukaan, yang berpotensi membatasi aliran arus corona dan mengganggu kestabilan operasi ESP.

Lingkungan gas buang pada boiler berbahan bakar cangkang kelapa sawit juga mengandung partikel abu yang bersifat abrasif. Impingement partikel pada permukaan elektroda dapat mempercepat keausan mekanis dan memperluas area kerusakan material, sehingga mempercepat laju degradasi komponen. Dalam jangka panjang, kondisi ini berpotensi menyebabkan penurunan signifikan pada efisiensi penangkapan partikulat serta peningkatan gangguan kelistrikan, seperti fluktuasi arus dan tegangan operasi.

Upaya mitigasi korosi pada elektroda discharge umumnya meliputi pemilihan material yang tahan terhadap lingkungan korosif, penerapan pelapisan permukaan (coating) protektif, serta pelaksanaan program inspeksi dan pemeliharaan berkala. Pelapisan berfungsi sebagai penghalang difusi oksigen dan uap air, sekaligus melindungi permukaan logam dari serangan kimia gas buang. Strategi ini dipandang penting untuk mempertahankan kestabilan corona discharge dan memperpanjang umur pakai elektroda dalam sistem ESP.

2.4 Kinerja Listrik ESP

Kinerja listrik Electrostatic Precipitator (ESP) ditentukan oleh karakteristik sistem catu daya tegangan tinggi serta interaksinya dengan kondisi elektroda dan media gas di dalam ruang pengendapan. Sistem transformer–rectifier (TR set) berfungsi mengonversi suplai listrik dari jaringan menjadi tegangan searah berlevel tinggi yang diterapkan pada elektroda discharge dan pelat pengumpul. Parameter operasi utama yang digunakan untuk mengevaluasi performa ESP meliputi tegangan sekunder, arus sekunder, sudut konduksi, arus primer, serta frekuensi percikan (spark rate).

Arus sekunder merupakan indikator langsung dari intensitas corona discharge dan tingkat ionisasi gas di dalam ESP. Nilai arus yang tinggi dan stabil menunjukkan bahwa proses pengisian muatan partikel berlangsung efektif, sedangkan fluktuasi arus atau pembatasan arus oleh sistem proteksi mengindikasikan gangguan pada medan listrik, yang dapat disebabkan oleh kondisi elektroda yang buruk, penumpukan debu, atau degradasi isolator. Tegangan operasi yang dapat dipertahankan tanpa memicu loncatan bunga api juga mencerminkan kemampuan sistem dalam membentuk medan listrik yang optimal.



Selain faktor internal ESP, kualitas suplai daya listrik dari sistem pembangkit turut memengaruhi kestabilan kinerja. Ketidakseimbangan arus antar fasa, faktor daya rendah, serta tingginya aliran daya reaktif dapat meningkatkan beban transformator dan menyebabkan fluktuasi tegangan, sehingga berdampak pada keandalan peralatan tegangan tinggi seperti ESP. Oleh karena itu, evaluasi kinerja listrik ESP tidak dapat dipisahkan dari kondisi sistem tenaga secara keseluruhan.

Dalam konteks operasi boiler berbahan bakar cangkang kelapa sawit, tingginya laju alir gas buang dan kandungan partikulat menyebabkan ESP bekerja secara kontinu pada beban berat. Kondisi ini menuntut kestabilan parameter kelistrikan serta keandalan komponen internal, khususnya elektroda discharge, agar proses corona discharge tetap berlangsung optimal dan efisiensi penangkapan partikulat dapat dipertahankan.

2.5 Boiler Berbahan Bakar Cangkang Kelapa Sawit dan Karakteristik Gas Buang

Boiler berbahan bakar cangkang kelapa sawit digunakan secara luas di sektor industri karena ketersediaan bahan bakar yang melimpah serta nilai kalor yang relatif tinggi. Proses pembakaran cangkang menghasilkan gas buang dengan kandungan partikulat yang cukup besar, terutama berupa abu terbang yang berasal dari fraksi mineral dalam bahan bakar. Selain itu, komposisi gas buang juga dipengaruhi oleh kadar kelembapan bahan bakar, kandungan sulfur, serta unsur alkali, yang berpotensi membentuk lingkungan reaktif bagi komponen peralatan di hilir boiler.

Pada boiler berkapasitas besar, laju alir gas buang yang tinggi menyebabkan sistem pengendalian emisi, khususnya Electrostatic Precipitator (ESP), harus beroperasi secara kontinu pada kondisi termal dan kimia yang berat. Paparan temperatur tinggi, uap air, serta gas asam seperti sulfur dioksida dapat mempercepat proses oksidasi dan korosi pada komponen internal ESP, terutama elektroda discharge dan sistem isolasi.

Karakteristik abu hasil pembakaran cangkang, yang sering bersifat abrasif dan memiliki resistivitas listrik tertentu, juga memengaruhi performa pengendapan partikel di dalam ESP. Partikel dengan sifat abrasif dapat mempercepat keausan mekanis pada elektroda, sedangkan sifat listrik partikel menentukan efektivitas proses pengisian muatan dan deposisi pada pelat pengumpul. Oleh karena itu, pemahaman mengenai karakteristik operasi boiler berbahan bakar cangkang serta sifat gas buangnya menjadi penting dalam mengevaluasi keandalan dan kinerja sistem ESP.

2.6 Penelitian Terdahulu

Berbagai penelitian telah membahas kinerja Electrostatic Precipitator (ESP) pada sistem pembangkit berbasis boiler serta faktor-faktor yang memengaruhi kestabilan operasinya. Studi sebelumnya melaporkan bahwa peningkatan sistem proteksi dan optimasi parameter kelistrikan mampu meningkatkan keandalan operasi ESP serta menekan gangguan selama proses pengendalian partikulat. Selain itu, kualitas sistem tenaga listrik, seperti kestabilan tegangan, aliran daya reaktif, dan keseimbangan arus, juga dilaporkan berpengaruh signifikan terhadap performa peralatan tegangan tinggi di fasilitas industri.

Penelitian lain menunjukkan bahwa degradasi komponen internal ESP, khususnya elektroda discharge, dapat menyebabkan penurunan intensitas corona discharge dan efisiensi



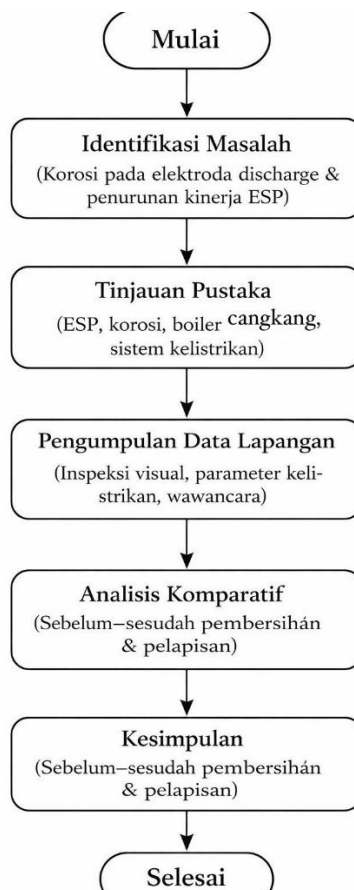
penangkapan partikel. Kondisi permukaan elektroda yang teroksidasi, perubahan geometri ujung jarum, serta penumpukan deposit abu disebut sebagai faktor utama yang memicu fluktuasi arus operasi dan keterbatasan tegangan kerja pada sistem ESP.

Pada pembangkit berbahan bakar cangkang kelapa sawit, kapasitas boiler yang besar dikaitkan dengan meningkatnya laju alir gas buang dan beban kerja ESP, sehingga mempercepat keausan material elektroda dan sistem isolasi. Meskipun demikian, sebagian besar penelitian terdahulu masih menitikberatkan pada aspek performa umum ESP atau optimasi sistem kelistrikan, sementara kajian yang secara spesifik mengaitkan tingkat korosi elektroda discharge dengan perubahan parameter kinerja listrik berdasarkan pengukuran lapangan masih relatif terbatas.

Oleh karena itu, penelitian ini diarahkan untuk mengisi celah tersebut dengan menganalisis hubungan antara degradasi elektroda discharge akibat korosi dan karakteristik kinerja listrik ESP pada boiler berbahan bakar cangkang kelapa sawit dalam kondisi operasi nyata.

3. Metodologi Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan studi lapangan dengan analisis komparatif antara kondisi elektroda discharge sebelum dan sesudah dilakukan pembersihan serta pelapisan (coating). Tahapan penelitian secara umum ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram alir metodologi penelitian

3.1 Jenis dan Pendekatan Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan studi lapangan (field study) dengan metode analisis komparatif untuk mengevaluasi pengaruh kondisi elektroda discharge terhadap kinerja listrik Electrostatic Precipitator (ESP). Analisis dilakukan dengan membandingkan parameter operasi ESP sebelum dan sesudah dilakukan tindakan pemeliharaan berupa pembersihan mekanis dan pelapisan permukaan (coating) pada elektroda discharge.

Pendekatan ini dipilih untuk memperoleh gambaran nyata mengenai hubungan antara tingkat korosi material elektroda dengan perubahan karakteristik kelistrikan ESP selama beroperasi pada kondisi aktual di pembangkit berbasis boiler cangkang.

3.2 Objek dan Lokasi Penelitian

Objek penelitian adalah satu unit Electrostatic Precipitator (ESP) yang terpasang pada sistem boiler berbahan bakar cangkang di fasilitas pembangkit listrik industri. Boiler tersebut beroperasi secara kontinu dengan kapasitas produksi uap sesuai spesifikasi operasional pabrik.

Pengamatan dilakukan langsung di lapangan selama periode pemeliharaan terjadwal (shutdown), sehingga memungkinkan inspeksi visual terhadap kondisi elektroda discharge serta pencatatan parameter listrik sebelum dan sesudah dilakukan tindakan perbaikan.

3.3 Prosedur Pengumpulan Data

Data penelitian diperoleh melalui beberapa tahapan berikut:

1. Inspeksi Visual Elektroda
Pemeriksaan dilakukan pada permukaan batang elektroda dan ujung jarum (needle) untuk mengidentifikasi tingkat korosi, pembentukan oksida, perubahan geometri, serta tingkat keausan.
2. Pengukuran Parameter Listrik
Data diambil dari panel transformer-rectifier (TR set) ESP yang meliputi tegangan primer, arus primer, tegangan sekunder, arus sekunder, sudut konduksi, dan batas arus operasi.
3. Wawancara Personel Pemeliharaan
Wawancara dilakukan dengan teknisi lapangan untuk memperoleh informasi mengenai riwayat gangguan, interval perawatan, serta metode pembersihan dan pelapisan elektroda.
4. Dokumentasi Lapangan
Seluruh kondisi elektroda serta tampilan panel dicatat melalui foto untuk mendukung analisis visual dan pembahasan hasil.

3.4 Prosedur Pembersihan dan Pelapisan Elektroda

Tindakan pemeliharaan yang dilakukan meliputi:

- pembersihan mekanis menggunakan sikat kawat dan alat abrasif ringan untuk menghilangkan lapisan oksida dan deposit abu,
- penghalusan permukaan pada bagian yang mengalami penumpukan korosi,
- aplikasi coating pelindung tahan temperatur tinggi dan lingkungan korosif,
- pengeringan sesuai prosedur teknis sebelum elektroda dipasang kembali ke dalam ESP.

3.5 Metode Analisis Data

Analisis dilakukan dengan membandingkan parameter listrik ESP pada dua kondisi, yaitu:



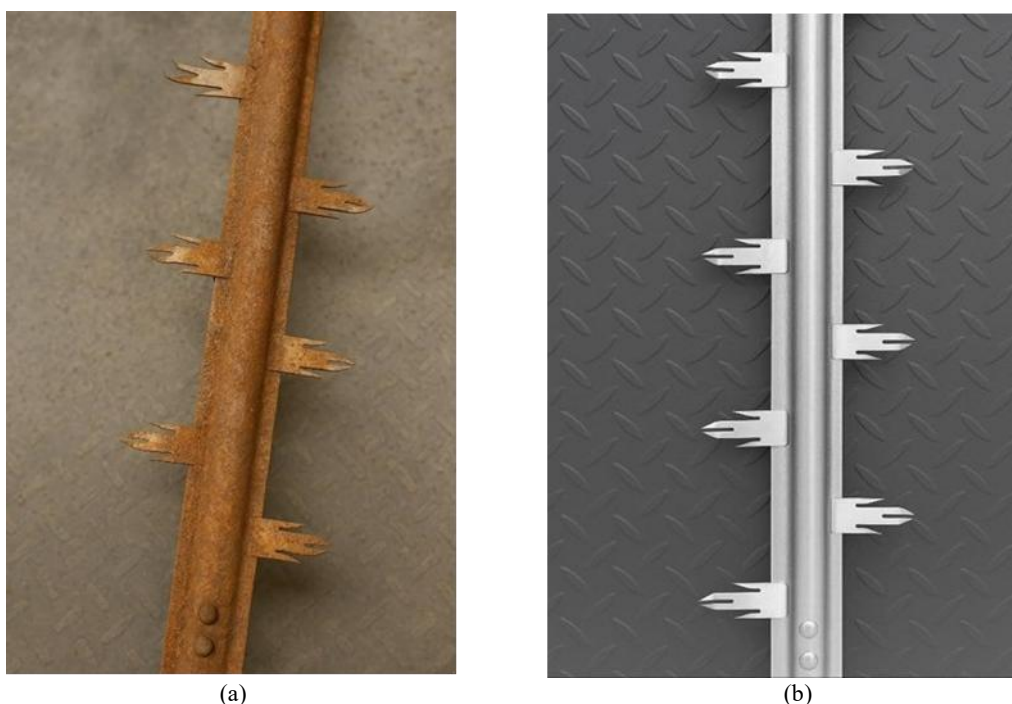
- kondisi elektroda berkarat, dan
- kondisi setelah pembersihan serta pelapisan.

Perubahan nilai tegangan, arus, dan sudut konduksi dianalisis secara kuantitatif dalam bentuk tabel perbandingan, sedangkan perubahan fisik elektroda dievaluasi secara kualitatif berdasarkan hasil inspeksi visual.

Kinerja ESP kemudian dievaluasi berdasarkan kestabilan operasi, peningkatan arus sekunder, serta indikasi perbaikan proses pembentukan corona discharge.

4. Hasil dan Pembahasan

4.1 Kondisi Visual Elektroda Discharge Sebelum Pemeliharaan



Gambar 2. Perbandingan kondisi visual elektroda discharge sebelum perawatan: (a) elektroda berkarat dengan lapisan oksida dan ujung needle tumpul; (b) elektroda dalam kondisi baik dengan permukaan utuh dan ujung needle tajam.

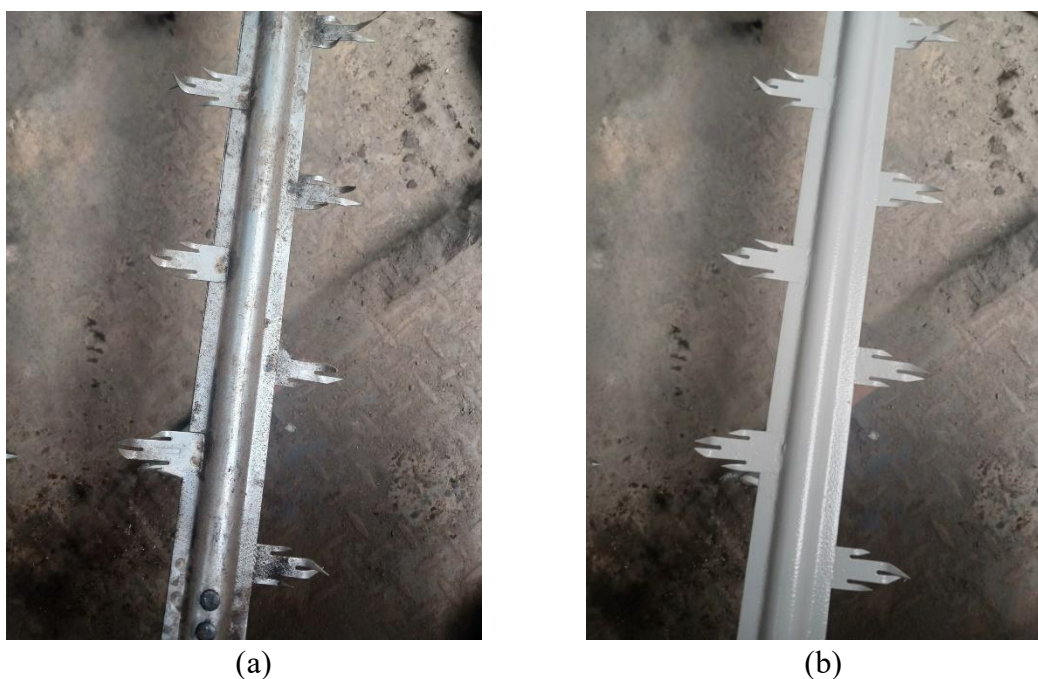
Gambar 2 memperlihatkan perbandingan visual elektroda discharge sebelum dilakukan pemeliharaan, yaitu antara elektroda yang mengalami korosi berat dan elektroda yang masih berada dalam kondisi normal. Pada elektroda yang terkorosi terlihat terbentuk lapisan oksida yang menyelimuti badan elektroda serta ujung jarum (needle), disertai dengan permukaan yang kasar dan tidak merata. Beberapa ujung jarum tampak mengalami penumpukan akibat paparan gas buang panas, uap air, serta partikel abu dari proses pembakaran boiler dalam jangka waktu yang lama.

Degradasi permukaan tersebut sangat berpengaruh terhadap proses pembentukan medan listrik di dalam ESP. Secara prinsip, ujung elektroda yang tajam diperlukan untuk menghasilkan intensitas medan listrik lokal yang tinggi guna memicu terjadinya corona discharge. Apabila ujung jarum menjadi tumpul, kekuatan pelepasan corona akan menurun sehingga produksi ion

berkurang dan kemampuan pengisian muatan partikel debu di dalam ruang ESP menjadi tidak optimal.

Temuan ini menunjukkan bahwa korosi tidak hanya menyebabkan kerusakan mekanis pada elektroda, tetapi juga berdampak langsung pada karakteristik kelistrikan sistem, khususnya pada kestabilan operasi dan efektivitas penangkapan partikulat.

4.2 Kondisi Elektroda Setelah Pembersihan dan Pelapisan



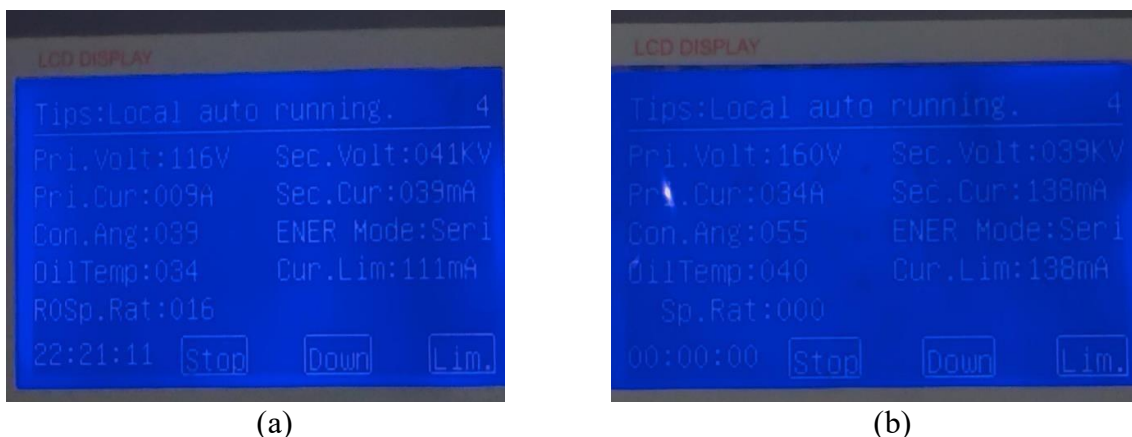
Gambar 3. Kondisi visual elektroda discharge setelah dilakukan pembersihan mekanis dan pelapisan (coating): (a) elektroda setelah pembersihan; (b) elektroda setelah pelapisan permukaan.

Gambar 3 menunjukkan kondisi elektroda discharge setelah dilakukan pembersihan mekanis dan proses pelapisan permukaan (coating). Setelah pemeliharaan, lapisan oksida berhasil dihilangkan sehingga permukaan elektroda terlihat lebih halus dan seragam. Ujung-ujung jarum kembali memiliki profil yang tajam dan simetris, yang sangat penting untuk meningkatkan konsentrasi medan listrik di sekitar elektroda.

Lapisan coating yang diaplikasikan berfungsi sebagai pelindung terhadap komponen gas buang yang bersifat korosif serta kelembapan, sehingga berpotensi memperlambat proses oksidasi pada siklus operasi berikutnya. Selain berperan sebagai proteksi material, pemulihan geometri elektroda ini juga meningkatkan kemampuan sistem dalam membentuk corona discharge yang lebih kuat dan stabil.

Dengan demikian, perbaikan kondisi fisik elektroda diharapkan berkontribusi langsung terhadap peningkatan parameter kelistrikan ESP, yang dibahas pada subbagian berikutnya.

4.3 Kinerja Listrik ESP Sebelum dan Sesudah Pemeliharaan



Gambar 4. Parameter operasi listrik ESP pada panel transformer–rectifier (TR) set: (a) sebelum pemeliharaan dengan kondisi elektroda berkarat; (b) setelah pembersihan dan pelapisan elektroda discharge.

Gambar 4 memperlihatkan tampilan panel transformer–rectifier (TR) set pada kondisi sebelum dan sesudah dilakukan pembersihan serta pelapisan elektroda discharge. Pada kondisi sebelum pemeliharaan, sistem ESP menunjukkan performa kelistrikan yang kurang optimal. Tegangan sekunder tercatat sekitar 41 kV, sedangkan arus sekunder hanya mencapai 39 mA, dengan sudut konduksi sebesar 39°. Parameter ini mengindikasikan terbentuknya corona discharge yang lemah dan proses ionisasi yang terbatas di dalam ruang ESP.

Setelah dilakukan pemeliharaan elektroda, terjadi perubahan yang signifikan pada karakteristik kelistrikan. Arus sekunder meningkat tajam hingga 138 mA, sementara sudut konduksi bertambah menjadi 55°, yang menunjukkan pola konduksi listrik yang lebih stabil dan kontinu. Tegangan sekunder mengalami sedikit penurunan menjadi 39 kV, namun kondisi ini masih dianggap normal karena elektroda yang lebih bersih dan tajam memungkinkan aliran arus yang lebih besar pada tegangan tembus yang lebih rendah, menandakan terbentuknya mekanisme corona yang lebih sehat.



Peningkatan arus sekunder sebesar sekitar 254% menunjukkan bahwa restorasi ujung jarum dan penghilangan lapisan oksida secara signifikan memperbaiki intensitas medan listrik lokal serta efisiensi ionisasi. Selain itu, arus primer meningkat dari 9 A menjadi 34 A, yang menandakan bahwa ESP mampu menyerap daya lebih besar untuk mendukung proses pengendapan partikel secara efektif.

Parameter	Kondisi Berkarat	Kondisi Dibersihkan+Dilapis	Perubahan
Tegangan Primer	116 V	160 V	Meningkat
Tegangan Sekunder	41 kV	39 kV	Sedikit turun (normal)
Arus Sekunder	39 mA	138 mA	+254%
Sudut Konduksi	39°	55°	Meningkat → stabil
Beban Primer	9 A	34 A	Meningkat signifikan
Kondisi Ujung Needle	Tumpul, berkarat	Tajam, bersih	Optimal
Kinerja ESP	Rendah	Tinggi	Meningkat drastis

Tabel 1. Perbandingan parameter kelistrikan Electrostatic Precipitator (ESP) sebelum dan sesudah pembersihan serta pelapisan (coating) elektroda discharge.

Ringkasan kuantitatif perbandingan parameter kelistrikan sebelum dan sesudah pemeliharaan ditampilkan pada Tabel 1. Data tersebut menegaskan bahwa pembersihan dan pelapisan elektroda memberikan dampak nyata terhadap peningkatan kinerja sistem, khususnya melalui kenaikan arus sekunder, sudut konduksi, serta stabilitas operasi secara keseluruhan. Pemulihan geometri elektroda dan kondisi permukaan memungkinkan ESP beroperasi pada beban listrik yang lebih efektif, sehingga meningkatkan potensi penangkapan partikulat dari gas buang boiler.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini memperlihatkan bahwa kondisi permukaan elektroda discharge merupakan faktor dominan yang mengendalikan perilaku kelistrikan ESP. Korosi menyebabkan penurunan performa dan meningkatkan risiko ketidakterpenuhannya pengendalian emisi, sedangkan pemeliharaan berkala melalui pembersihan dan pelapisan terbukti mampu memulihkan kestabilan corona discharge, meningkatkan pemanfaatan arus listrik, serta memperbaiki efektivitas kerja ESP secara signifikan.

5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil inspeksi visual, pengukuran parameter kelistrikan, serta analisis perbandingan sebelum dan sesudah pemeliharaan elektroda discharge pada sistem Electrostatic Precipitator (ESP), dapat disimpulkan bahwa kondisi permukaan elektroda memiliki pengaruh yang sangat signifikan terhadap kinerja listrik dan efektivitas operasi ESP.

Elektroda yang mengalami korosi menunjukkan ujung jarum yang tumpul serta lapisan oksida pada permukaan, yang menyebabkan melemahnya pembentukan corona discharge. Kondisi tersebut tercermin pada rendahnya arus sekunder, sudut konduksi yang kecil, serta terbatasnya kemampuan ESP dalam menarik partikel debu. Setelah dilakukan pembersihan mekanis dan



pelapisan (coating), permukaan elektroda menjadi lebih halus dan seragam, serta ujung jarum kembali tajam, sehingga mampu meningkatkan intensitas medan listrik di sekitar elektroda.

Perbaikan kondisi fisik ini berdampak langsung pada peningkatan performa kelistrikan ESP. Arus sekunder meningkat secara signifikan sebesar 254%, sudut konduksi bertambah dari 39° menjadi 55°, dan arus primer naik dari 9 A menjadi 34 A, yang menunjukkan operasi sistem yang lebih stabil dan efektif. Meskipun terjadi sedikit penurunan pada tegangan sekunder, fenomena tersebut masih berada dalam batas normal dan mengindikasikan terbentuknya mekanisme corona yang lebih sehat.

Secara keseluruhan, pemeliharaan elektroda discharge melalui pembersihan dan pelapisan terbukti efektif dalam memulihkan kinerja ESP serta meningkatkan potensi penangkapan partikulat pada gas buang boiler. Oleh karena itu, kegiatan inspeksi berkala, pembersihan terjadwal, serta penerapan coating protektif direkomendasikan sebagai strategi pemeliharaan untuk menjaga keandalan sistem dan memperpanjang umur pakai komponen ESP.

REFERENSI

- [1] Czech, T., Marchewicz, A., Sobczyk, A. T., Krupa, A., Gazda, M., & Jaworek, A. (2024). Discharge Electrode Degradation in Dry Electrostatic Precipitator Cleaning of Exhaust Gases from Industrial Solid Waste Incinerators. *Applied Sciences (Switzerland)*, 14(17). <https://doi.org/10.3390/app14177616>
- [2] Sutrisno, H., & Meilasari, F. (2024). Teknologi Pengolahan Emisi dengan Menggunakan Electrostatic Presipitator (ESP). *Jurnal Teknologi Lingkungan Lahan Basah*, 12(3), 616–623. <https://doi.org/10.26418/jtllb.v12i3.78644>
- [3] Yasir, M. (2021). Pencemaran Udara Di Perkotaan Berdampak Bahaya Bagi Manusia, Hewan, Tumbuhan dan Bangunan. *Jurnal OSF.Oi*, 1–10. <https://doi.org/10.31219/osf.io/nc5rg>
- [4] Jaworek, A., Krupa, A., & Czech, T. (2018). Modern electrostatic devices and methods for exhaust gas cleaning: A review. *Journal of Electrostatics*, 91, 17–46. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2006.07.012>
- [5] J. Y. Syu et al., “The Applications and Distinctions of Three Different Collection Plates in ESP Performance,” *Aerosol and Air Quality Research*, 2022. <https://doi.org/10.4209/aaqr.220133>
- [6] H. Nugroho, Design of Electrostatic Precipitator (ESP) Prototype as a Solid Particle Collector, *Clean Energy and Smart Technology*, vol. 03, no. 01, Oct. 2024. <https://doi.org/10.58641/cest.v3i1.105>
- [7] Stevanus, W. & Syafei, A. D., “Electrostatic Precipitator Upgrade for Stricter Emission Regulation,” *E3S Web of Conferences*, vol. 485, Article 06001, 2024, <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202448506001>
- [8] N. Č. Kantová, A. Backa, A. Čaja, and S. Šladek, “Increasing electrostatic precipitator efficiency by implementing a flow straightener in the flue gas pipe: CFD simulations and experimental study,” *Case Studies in Thermal Engineering*, 2025, <https://doi.org/10.1016/j.csite.2025.106737>
- [9] Z. Sun, H. Chen, and L. Yang, “Investigation on Condensation Characteristics and Removal Performance of SO₃ in Low-Low-Temperature Electrostatic Precipitator,” *Atmosphere*, vol. 15, no. 2, art. 168, 2024, <https://doi.org/10.3390/atmos15020168>



- [10] M. Badran, Evaluating Performance Indices of Electrostatic Precipitators, *Energies*, 2022. <https://doi.org/10.3390/en15186647>
- [11] R. F. Sinurat, S. Aryza, dan A. S. P. Tarigan, “Study an Improvement of Electrostatic Precipitator (ESP) Interference Protection Systems PLTU Pangkalan Susu Units 1 and 2,” *International Journal of Economic, Technology and Social Sciences (Injests)*, vol. 3, no. 1, pp. 214–221, Nov. 2022, <https://doi.org/10.53695/injests.v3i1.763>
- [12] D. Erivianto, A. Dani, H. Gunawan, “Pengolahan Biomassa Tandan Kosong Kelapa Sawit Sebagai Bahan Bakar Pembangkit Listrik Tenaga Uap,” *Jurnal Ilmiah Sistem & Teknologi (JIST)*, vol. 3, no. 1, pp. 1–9, 2024, <https://doi.org/10.36418/jist.v3i1.337>
- [13] M. A. A. Bishri, M. E. Dalimunthe, & D. Lesmana, “Analysis of Reactive Power Flow in an Electric Power System,” *Fidelity: Jurnal Teknik Elektro*, vol. 6, no. 3, pp. 198–203, 2024, <https://doi.org/10.52005/fidelity.v6i3.237>
- [14] R. Harisandi, Analyze Failure of an Electrostatic Precipitator Ash Transfer System (ESP) at PLTU Pangkalan Susu Operation Maintenance Unit (OMU), Universitas Pembangunan Panca Budi Digital Repository, 2022. <https://digilib.pancabudi.ac.id/article/23110/>
- [15] Laia, A. N., Rahmani, & Gunawan, H., “Analysis of The Quality of Electrical Power and Its Impact on PT Pamin Medan Factory Operations,” *Proceedings of ICIE Universitas Pembangunan Panca Budi*, pp. 1336–1343, 2023.

