

Analysis Of Electrostatic Precipitator (ESP) Performance Based On Changes In Reference Voltage And Temperature In The Coal Boiler At Pt. Chandra Asri So Puloampel

Analisis Kinerja *Electrostatic Precipitator* (ESP) Didasarkan Pada Perubahan Nilai Tegangan Referensi Dan Temperatur Di Coal Boiler Pt. Chandra Asri So Puloampel

Adit Yuda Mahendra¹⁾, Subairi²⁾, Resi Dwi Jayanti Kartika Sari³⁾

^{1),2),3)}Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Merdeka Malang

Email: ¹⁾ yudaadit008@gmail.com ; ²⁾ subairi@unmer.ac.id ; ³⁾ resi.sari@unmer.ac.id

How to Cite :

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 At Pt. Chandra Asri So Puloampel. Jurnal Media Computer Science, 4(2) Doi: <https://doi.org/10.37676/jmcs.v4i2>

ARTICLE HISTORY

Received [19 Mei 2025]

Revised [17 Juni 2025]

Accepted [06 Juli 2025]

KEYWORDS

Electrostatic Precipitator, Reference Voltage, Temperature

This is an open access article under the [CC-BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license



ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk memahami secara mendalam berbagai aspek yang memengaruhi kinerja sistem electrostatic precipitator (ESP) di lingkungan industri. Penelitian ini menggunakan metode eksperimen dengan pendekatan kuantitatif untuk menganalisis pengaruh tegangan referensi dan suhu terhadap kinerja electrostatic precipitator (ESP). Proses penelitian melibatkan pengumpulan data melalui observasi, perhitungan efisiensi menggunakan persamaan Deutch-Anderson, serta pengujian sistem secara langsung. Sistem monitoring berbasis Arduino Uno WiFi R3 dan ESP8266 dirancang untuk memantau parameter tegangan, arus, dan aktivitas sparking secara real-time melalui aplikasi Blynk. Diagram alir digunakan untuk menggambarkan tahapan analisis dan pembuatan alat monitoring sebagai bagian dari keseluruhan proses penelitian. Penelitian ini menunjukkan bahwa kinerja electrostatic precipitator (ESP) sangat dipengaruhi oleh pengaturan tegangan dan arus referensi, suhu, serta kondisi lingkungan kompartemen. Efisiensi hanya mencapai 75% saat feedback tegangan 42kV dengan arus 100mA, sehingga dibutuhkan penyetelan simultan tegangan dan arus untuk mencapai efisiensi optimal 99,5%. Nilai resistansi tertinggi 9,13 GΩ pada suhu 69,4°C menunjukkan pentingnya menjaga kebersihan dan kelembapan untuk mengurangi risiko sparking. Sistem monitoring berbasis Arduino Uno WiFi R3 dan ESP8266 berhasil menampilkan data real-time via Blynk, meskipun terdapat error ±6%. Sistem indikator keselamatan juga berfungsi efektif dalam mendeteksi gangguan dan mendukung operasi ESP yang aman.

ABSTRACT

This study aims to gain an in-depth understanding of various factors that influence the performance of electrostatic precipitator (ESP) systems in industrial environments. An experimental method with a quantitative approach was used to analyze the effects of reference voltage and temperature on ESP performance. The research process involved data collection through observation, efficiency calculations using the Deutch-Anderson equation, and direct system testing. A monitoring system based on

Arduino Uno WiFi R3 and ESP8266 was designed to track voltage, current, and sparking activity in real-time via the Blynk application. Flowcharts were used to illustrate the stages of analysis and the development of the monitoring tool as part of the overall research process. The findings indicate that the performance of the electrostatic precipitator (ESP) is significantly influenced by the settings of reference voltage and current, temperature, and compartment environmental conditions. Efficiency reached only 75% when the feedback voltage was 42kV with a current of 100mA, highlighting the need for simultaneous adjustment of voltage and current to achieve the optimal 99.5% efficiency. The highest resistance value of 9.13 GΩ at a temperature of 69.4°C demonstrates the importance of maintaining cleanliness and humidity to reduce the risk of sparking. The monitoring system based on Arduino Uno WiFi R3 and ESP8266 successfully displayed real-time data via Blynk, despite an error margin of ±6%. Additionally, the safety indicator system functioned effectively in detecting disturbances and supporting the safe operation of the ESP.

PENDAHULUAN

Pencemaran udara merupakan salah satu masalah lingkungan yang paling serius di abad ke-21 (Afrian & Ervianto, 2015). Polusi udara memberikan dampak langsung terhadap kesehatan manusia, lingkungan, dan kelangsungan ekosistem global. Salah satu bentuk pencemaran udara yang paling berbahaya adalah keberadaan partikulat halus (PM_{2.5}) yang memiliki ukuran kurang dari 2,5 mikrometer dan mampu menembus jauh ke dalam paru-paru manusia. Polutan jenis ini dapat menimbulkan berbagai penyakit pernapasan kronis, penyakit kardiovaskular, bahkan kematian dini (Yorifuji dkk., 2015). Dalam konteks global, studi IQAir (2023) menyatakan bahwa Indonesia menempati posisi kesembilan dalam daftar negara dengan kualitas udara terburuk, dengan rata-rata konsentrasi PM_{2.5} mencapai 55 µg/m³, jauh di atas batas aman yang direkomendasikan oleh WHO yaitu 5 µg/m³ (IQAir, 2023). Kondisi ini menunjukkan adanya kebutuhan mendesak untuk memperbaiki sistem pengendalian pencemaran udara, khususnya di sektor industri yang menjadi penyumbang utama emisi partikulat. Berdasarkan data dari (International Energy Agency., 2021) sekitar 51% emisi karbon dioksida (CO₂) di Indonesia berasal dari aktivitas pembangkit listrik tenaga batubara. Batubara masih memainkan peran signifikan dalam bauran energi nasional, menyumbang sekitar 30% dari total produksi energi pada tahun 2021. Emisi dari sektor pembangkit listrik berkontribusi sebesar 44% terhadap total emisi CO₂ nasional, disusul oleh sektor industri (24%), dan sisanya berasal dari transportasi serta aktivitas rumah tangga (Kementerian Energi Dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, 2015). Melihat besarnya kontribusi pembakaran batubara terhadap pencemaran udara, maka diperlukan solusi teknologi yang mampu meminimalisir dampak negatif tersebut. Salah satu teknologi yang umum digunakan untuk mereduksi emisi partikulat hasil pembakaran adalah Electrostatic Precipitator (ESP). Sistem ini mampu mengeluarkan partikel padat (debu) dari emisi gas tanpa mempengaruhi aliran gas secara signifikan. Mekanisme kerjanya melibatkan pemberian muatan listrik pada partikel melalui medan listrik tegangan tinggi, sehingga partikel tersebut tertarik ke elektroda pengumpul dan kemudian dikeluarkan secara mekanis. Salah satu keunggulan utama ESP adalah efisiensinya yang tinggi, bahkan dalam menangkap partikel yang sangat halus (Jaworek dkk., 2007). Namun demikian, efektivitas ESP sangat bergantung pada kondisi operasional seperti tegangan referensi, temperatur gas buang, ukuran partikel, dan resistivitas material partikulat.

Beberapa studi sebelumnya telah menyoroti pentingnya faktor-faktor tersebut dalam mempengaruhi performa ESP. Penelitian yang dilakukan oleh (Lebedev dkk., 2020) menunjukkan bahwa peningkatan temperatur pada aliran gas buang dapat mengurangi efisiensi penangkapan partikel karena perubahan sifat resistivitas debu yang menjadi lebih tinggi. Hal ini menyebabkan partikel sulit untuk dikenai muatan atau bahkan terlepas dari elektroda pengumpul. Sementara itu,

(Han dkk., 2009) menekankan pentingnya kestabilan tegangan tinggi dalam mempertahankan medan elektrostatik yang kuat. Tegangan referensi yang tidak stabil atau terlalu rendah dapat menurunkan efisiensi pengumpulan partikel secara drastis, terutama pada kondisi beban puncak boiler. Selain itu, (Zhou dkk., 2024) mengkaji pengaruh distribusi ukuran partikel terhadap performa ESP dan menemukan bahwa partikel yang sangat halus atau sangat besar memerlukan penyesuaian tegangan agar dapat ditangkap secara efektif. Distribusi ukuran partikel yang tidak seragam, seperti pada sistem boiler industri, menuntut strategi adaptif dalam pengaturan parameter ESP. Penelitian terbaru oleh (Zhang dkk., 2024) juga mengangkat permasalahan spark atau percikan listrik yang terjadi ketika tegangan terlalu tinggi. Fenomena ini dapat menyebabkan gangguan pada sistem ESP, bahkan menurunkan efisiensinya secara drastis jika tidak ditangani dengan baik. Meskipun telah banyak dilakukan kajian terkait parameter operasional ESP, sebagian besar penelitian hanya berfokus pada satu variabel atau dilakukan dalam kondisi laboratorium dan simulasi, bukan pada kondisi industri nyata. Hingga saat ini, masih sangat terbatas penelitian yang secara simultan menganalisis pengaruh perubahan nilai tegangan referensi dan temperatur terhadap kinerja ESP dalam lingkungan industri petrokimia, khususnya pada sistem coal boiler.

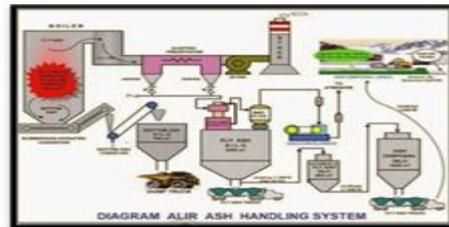
Padahal, dalam praktiknya, kedua parameter tersebut kerap mengalami fluktuasi yang memengaruhi kestabilan sistem filtrasi emisi. Oleh karena itu, penting dilakukan studi empiris di lingkungan operasional nyata untuk mengidentifikasi dinamika perubahan performa ESP berdasarkan variasi parameter tersebut. Penelitian ini dilakukan di PT. Chandra Asri SO Puloampel, sebuah perusahaan petrokimia yang memproduksi Styrene Monomer. Dalam proses produksinya, perusahaan ini menggunakan coal boiler sebagai sumber energi untuk menghasilkan uap (steam). Proses pembakaran batubara dalam boiler tersebut menghasilkan residu yang dapat mencemari lingkungan jika tidak ditangani dengan baik. Untuk itu, sistem boiler dilengkapi dengan Electrostatic Precipitator sebagai alat filtrasi udara. Namun, dalam pengaplikasiannya, efektivitas ESP seringkali tidak konsisten karena adanya fluktuasi pada nilai tegangan referensi dan temperatur gas buang, sehingga diperlukan evaluasi menyeluruh terhadap pengaruh kedua parameter tersebut. Penelitian ini bertujuan untuk memahami secara mendalam berbagai aspek yang memengaruhi kinerja sistem electrostatic precipitator (ESP) di lingkungan industri. Fokus utama diarahkan pada analisis pengaruh perubahan nilai tegangan referensi terhadap efisiensi kerja ESP, mengingat tegangan yang tidak stabil dapat menurunkan kemampuan sistem dalam menangkap partikel debu secara efektif. Selain itu, penelitian ini juga mengeksplorasi dampak perubahan temperatur terhadap hasil pengujian isolasi (insulation test) pada discharge electrode, serta kaitannya terhadap performa keseluruhan sistem ESP. Di sisi lain, studi ini juga bertujuan untuk mengembangkan dan menentukan komponen serta pengkodean yang tepat dalam merancang aplikasi monitoring berbasis Blynk, yang akan dikonfigurasi agar terintegrasi secara optimal dengan sistem kontrol ESP. Tidak kalah penting, penelitian ini bertujuan untuk menemukan metode yang efektif dalam menangani permasalahan teknis yang sering terjadi, khususnya spark (hubungan singkat) dan open circuit pada sistem ESP, yang kerap kali dipicu oleh fluktuasi tegangan referensi dan temperatur. Melalui pendekatan ini, penelitian diharapkan dapat memberikan solusi aplikatif dan inovatif dalam meningkatkan efisiensi dan keandalan sistem ESP di sektor industri. Kebaruan (novelty) dari studi ini terletak pada pendekatan terintegrasi dalam mengevaluasi performa ESP secara empiris di industri petrokimia, serta menawarkan rekomendasi pengoptimalan berdasarkan data operasional aktual. Diharapkan hasil dari penelitian ini dapat menjadi dasar pengembangan strategi teknis dan operasional yang lebih adaptif dalam mengendalikan emisi pada sistem boiler berbahan bakar batubara di sektor industri.

LANDASAN TEORI

Pengertian Electrostatic Precipitator (ESP)

Electrostatic Precipitator (ESP) merupakan salah satu perangkat pengendali polusi udara yang digunakan untuk menangkap partikel debu dari gas buang hasil pembakaran, seperti pada sistem boiler berbahan bakar batu bara (coal boiler) (Fitrianto, 2018). ESP termasuk dalam sistem

penanganan abu ringan (fly ash system) yang juga mencakup heater and blower, kompresor, serta sistem loading dan unloading abu (Arita dkk., 2019). Dengan efisiensi penangkapan partikel di atas 90%, ESP dikenal juga sebagai scrubber kering yang menggunakan prinsip kelistrikan statis dalam prosesnya.

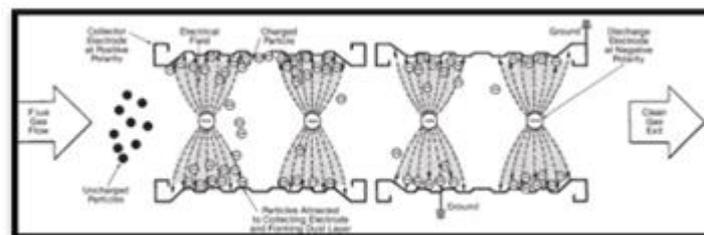


Gambar 1. Ash Handling System

Gambar di atas menunjukkan sistem *ash handling* pada *coal boiler* yang berfungsi mengatur dan mengelola abu hasil pembakaran. Sistem ini terdiri dari dua bagian utama, yaitu *bottom ash system* (penanganan abu berat) dan *fly ash system* (penanganan abu ringan). Penanganan abu ringan melibatkan penggunaan *Electrostatic Precipitator (ESP)*, *heater and blower* untuk menjaga suhu abu, serta *kompresor* sebagai sumber tenaga transportasi abu.

Prinsip Kerja Electrostatic Precipitator

ESP bekerja dengan memanfaatkan prinsip muatan listrik, di mana partikel debu diberikan muatan negatif saat melewati *discharge electrode*. Partikel bermuatan ini kemudian tertarik menuju *collecting plate* yang bermuatan positif, sehingga terjadi pemisahan antara partikel padat dan gas. Konsep dasar yang mendasari prinsip kerja ini meliputi potensial listrik, medan listrik, fluks listrik, hukum Coulomb, dan hukum Gauss.



Gambar 2. Prinsip Kerja ESP

Gambar di atas menggambarkan prinsip kerja *Electrostatic Precipitator (ESP)*, yaitu dengan memberikan muatan negatif pada partikel debu menggunakan *discharge electrode*. Partikel bermuatan ini kemudian tertarik secara elektrostatis ke pelat pengumpul (*collecting plate*) yang bermuatan positif. Setelah debu menumpuk di pelat, sistem *rapper* mengguncangnya sehingga partikel jatuh ke bawah dan keluar dari sistem ESP.

Bagian-Bagian Electrostatic Precipitator

ESP terdiri dari berbagai komponen utama yang saling terintegrasi dalam proses kerjanya. Komponen-komponen ini berperan penting dalam menghasilkan dan mengatur medan listrik serta mengumpulkan dan membuang debu yang tertangkap (Shah, 2017).

Gambar di atas menunjukkan sistem pelat pengumpul (collecting plate) yang bekerja dengan menerima arus tegangan tinggi positif. Tegangan ini menciptakan medan listrik yang menarik partikel abu bermuatan negatif dari discharge electrode sehingga abu tersebut terkumpul pada pelat pengumpul.

Rapping Hammer dan Hopper

Rapping hammer atau rapper digunakan untuk mengguncang collecting plate sehingga partikel debu yang menempel dapat jatuh ke hopper. Hopper kemudian menampung abu yang jatuh dan mengarahkannya menuju sistem silo sebagai bagian dari proses penanganan lanjutan.

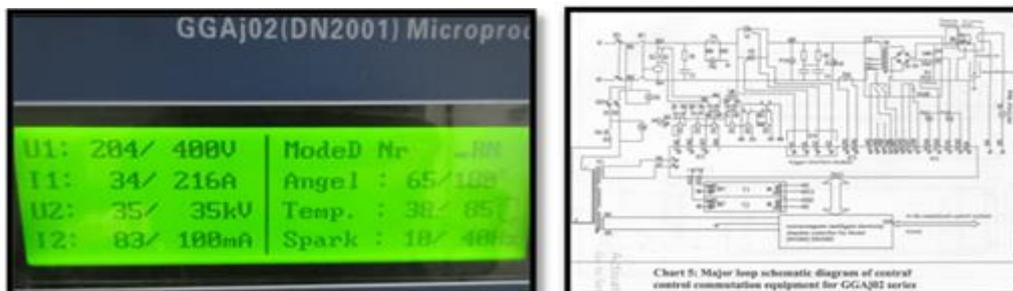


Gambar 5. Rapper Hammer and Hopper

Gambar di atas menunjukkan bahwa hopper berperan sebagai wadah penampung abu hasil pukulan dari rapping system, yang selanjutnya dialirkan ke silo melalui sistem penanganan abu (ash handling system).

Panel Kontrol Lokal (Catu Daya ESP)

Panel kontrol lokal mengatur suplai daya untuk sistem ESP, khususnya untuk mengatur tegangan DC yang dihasilkan dari sumber AC. Komponen seperti Silicon Controlled Rectifier (SCR) dan AVR (Automatic Voltage Regulator) digunakan untuk mengatur dan menstabilkan tegangan serta arus pada sistem output.



Gambar 6. Rangkaian Control dan Display ESP

Gambar di atas menggambarkan sistem wiring pengontrolan pada ESP, di mana tegangan 380V dialirkan melalui Silicon Controlled Rectifier (SCR) sebelum masuk ke transformer-rectifier untuk dinaikkan dan disearahkan. Sistem ini juga dilengkapi dengan AVR (Automatic Voltage Regulator) yang berfungsi mengatur tegangan DC dan arus sekunder pada output transformer-rectifier.

Internet of Things (IoT)

Internet of Things (IoT) merupakan konsep teknologi yang memungkinkan objek fisik dapat terhubung dan saling berkomunikasi melalui jaringan internet. Konsep ini pertama kali diperkenalkan oleh Kevin Ashton pada tahun 1999, yang juga merupakan salah satu pendiri Auto-ID Center di MIT (Yudhanto & Azis, 2019). IoT bertujuan untuk memberikan kemampuan otomatisasi

dan kendali jarak jauh pada perangkat elektronik melalui konektivitas internet, tanpa dibatasi oleh jarak geografis. Dalam implementasinya, IoT memberikan fleksibilitas bagi pengembang untuk mengatur sistem sesuai dengan kebutuhan. Misalnya, pengembang dapat menciptakan sistem otomatisasi yang terhubung ke internet menggunakan perangkat seperti Raspberry Pi, dengan tambahan sensor untuk mendeteksi perubahan lingkungan dan mengatur respon perangkat secara otomatis. IoT telah menjadi fondasi utama dalam pengembangan sistem rumah pintar, industri 4.0, dan pengendalian sistem berbasis cloud.

Software Arduino IDE

Arduino IDE (Integrated Development Environment) merupakan perangkat lunak utama dalam pemrograman mikrokontroler Arduino. Arduino IDE memungkinkan pengguna menulis, mengedit, mengompilasi, dan mengunggah kode (disebut *sketch*) ke dalam papan mikrokontroler.

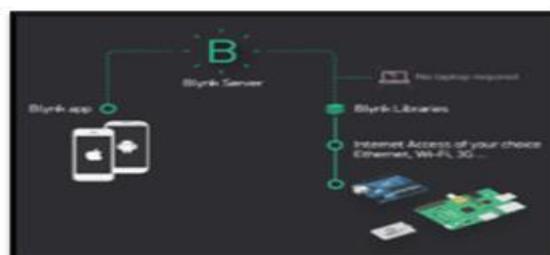


Gambar 7. Tampilan Utama Software Arduino IDE

Arduino IDE memiliki sejumlah fitur utama yang dirancang untuk mendukung proses pemrograman mikrokontroler secara efisien. Salah satu fitur penting adalah **editor program**, yang berfungsi sebagai tempat untuk menulis dan mengedit kode menggunakan bahasa pemrograman Processing. Selain itu, terdapat **compiler** yang berguna untuk mengubah kode yang telah ditulis menjadi bentuk biner agar dapat dikenali dan dijalankan oleh mikrokontroler. Setelah kode dikompilasi, proses selanjutnya adalah **uploader**, yaitu fitur yang memungkinkan pengguna untuk mengunggah program tersebut ke papan Arduino melalui koneksi USB. Antarmuka dari Arduino IDE juga dirancang agar ramah pengguna, dengan dilengkapi **toolbar**, **area pesan**, dan **konsol teks** yang sangat membantu dalam proses debugging serta memantau status unggahan program ke perangkat keras secara real-time.

Aplikasi Blynk

Blynk merupakan platform aplikasi berbasis Android dan iOS yang dirancang untuk mengontrol perangkat IoT seperti Arduino, Raspberry Pi, dan ESP8266 melalui koneksi internet. Platform ini tidak bergantung pada jenis hardware tertentu, tetapi membutuhkan koneksi internet, khususnya WiFi, agar dapat berfungsi optimal.



Gambar 8. Sistem Komunikasi Blynk

Sistem komunikasi pada aplikasi Blynk terdiri dari tiga komponen utama yang saling terhubung dan bekerja secara terintegrasi. Komponen pertama adalah aplikasi, yang berperan sebagai antarmuka pengguna pada perangkat smartphone, memungkinkan pengguna untuk memantau dan mengontrol perangkat keras secara langsung. Komponen kedua adalah server, yang bertugas mengatur dan mengelola proses komunikasi antara perangkat keras seperti Arduino atau ESP8266 dengan aplikasi pengguna. Selanjutnya, terdapat storage atau penyimpanan yang berfungsi untuk menyimpan data serta status dari perangkat-perangkat yang telah terhubung. Blynk dikenal sebagai salah satu solusi populer dalam implementasi proyek Internet of Things (IoT) karena memiliki antarmuka yang sederhana, mudah digunakan, serta mampu diintegrasikan dengan berbagai jenis perangkat keras tanpa memerlukan konfigurasi yang kompleks.

Arduino Uno WiFi R3

Arduino Uno WiFi R3 merupakan pengembangan dari papan Arduino Uno R3 yang dilengkapi dengan modul WiFi ESP8266, mikrokontroler ATmega328, dan konverter USB-TTL CH340G dalam satu board. Dengan kombinasi ini, Arduino Uno WiFi R3 sangat mendukung pengembangan sistem berbasis IoT karena mampu melakukan komunikasi data secara nirkabel. Papan ini memiliki 14 pin digital yang dapat digunakan sebagai input maupun output. Pemrogramannya dapat menggunakan fungsi `pinMode()`, `digitalWrite()`, dan `digitalRead()` dengan tegangan kerja 5V dan arus maksimum 40mA. Terdapat juga DIP Switch yang memungkinkan pengaturan komunikasi antara dua mikrokontroler dalam satu board secara independen atau terhubung. Arduino Uno WiFi R3 mampu mendukung berbagai proyek IoT, khususnya yang memerlukan integrasi dengan aplikasi seperti Blynk, karena memiliki fasilitas komunikasi serial TTL (UART) serta fitur konektivitas yang lengkap.



Gambar 9. Arduino Uno Wifi R3 dan Setting DIP Switch Board

Arduino Uno WiFi R3, sebagaimana ditunjukkan pada di atas merupakan papan mikrokontroler yang dilengkapi dengan 14 pin digital yang berfungsi sebagai input maupun output. Pemrogramannya dapat dilakukan menggunakan fungsi-fungsi standar seperti `pinMode()`, `digitalWrite()`, dan `digitalRead()`, dengan tegangan kerja sebesar 5V. Board ini mengintegrasikan dua mikrokontroler yang dapat diprogram secara terpisah maupun saling terhubung, tergantung pada konfigurasi DIP switch yang digunakan. Terdapat lima pengaturan DIP switch yang memungkinkan komunikasi antar mikrokontroler ataupun pengoperasian secara mandiri. Setiap pin I/O memiliki kemampuan untuk mengalirkan dan menerima arus maksimum sebesar 40 mA serta dilengkapi resistor pull-up berkisar antara 20–50 kOhm. Selain itu, Arduino Uno WiFi R3 juga dilengkapi dengan berbagai fasilitas komunikasi, termasuk antarmuka serial UART TTL 5V yang memungkinkan koneksi langsung dengan komputer. Keunggulan lainnya adalah kompatibilitas papan ini dengan berbagai modul IoT, seperti Blynk, yang menjadikannya sangat ideal untuk digunakan dalam proyek berbasis Internet of Things (IoT) karena mendukung pengoperasian yang terintegrasi dan fleksibel.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini secara komprehensif mengkaji pengaruh tegangan referensi dan suhu terhadap kinerja sistem *electrostatic precipitator* (ESP). Fokus utama terletak pada bagaimana pengaturan tegangan memengaruhi terjadinya aktivitas *sparking*, yang dapat berdampak pada

efisiensi kerja sistem. Dengan adanya alat monitoring yang dirancang, seluruh proses dapat terpantau secara real-time, sehingga memungkinkan penerapan langkah penanganan yang lebih cepat, tepat, dan efisien saat terjadi permasalahan akibat *sparking*.

Tahapan pelaksanaan penelitian berfungsi sebagai acuan dalam menjalankan proses dari awal hingga akhir. Diagram alir atau flowchart merupakan representasi visual yang menggunakan simbol-simbol khusus untuk menunjukkan urutan langkah-langkah secara rinci serta keterkaitan antar proses dalam suatu sistem. Flowchart ini nantinya akan dibagi menjadi dua bagian, yaitu flowchart analisis yang mencakup aktivitas pengumpulan dan perhitungan data sebagai dasar dalam menjawab rumusan masalah, serta flowchart pembuatan alat monitoring yang menggunakan aplikasi Blynk sebagai media kontrol dan pemantauan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Electrostatic precipitator (ESP) merupakan sistem penyaring debu sisa pembakaran pada boiler yang menggunakan prinsip listik statis dimana *discharge electrode* dan *collecting plate* memegang peranan yang sangat penting dalam sistem tersebut, PT. Chandra Asri Pacific mempunyai 2 unit sistem ESP yaitu 2ESP-611 dan 2ESP-612 masing – masing terdiri atas 3 kompartemen dengan kapasitas konsumsi power sebesar 30kW dirancang dan dibangun oleh PT. Weltest Energi Nusantara, tiap kompartemen tersusun atas 11 baris *discharge electrode* dan 12 baris *collecting plate*, dari keseluruhan itu, didasarkan design awal perencanaan pada masing – masing ESP, serta didukung oleh data audit energi yang dilakukan oleh Kensi pada tahun 2019, ESP tersebut memiliki efisiensi sebesar 99,52% dengan kata lain bahwa limbah debu yang keluar setelah melewati ESP hanya sebesar 0.48%. Berdasarkan prinsip kerjanya, *electrostatic precipitator* bergantung pada tegangan bermuatan negatif yang diperoleh sebelumnya dari konversi tegangan menggunakan trafo *rectifier* dengan output maksimal sebesar 72kVDC yang selanjutnya dialirkan menuju *discharge elektrode* sehingga partikel yang terinduksi memiliki muatan yang sama, partikel yang bermuatan tersebut sesuai dengan prinsip kerja dari listrik statis akan bergerak menuju muatan yang lebih positif yaitu *collecting plate*, dari uraian prinsip kerja dari ESP tersebut dapat diketahui bahwa tegangan memiliki peranan kunci dalam proses filtrasi debu dan menjadi faktor yang berpengaruh terhadap efisiensi sistem, maka dari itu pada pembahasan pertama, peneliti membahas mengenai pengujian pengaruh perubahan nilai tegangan referensi terhadap efisiensi *electrostatic precipitator*.

Perhitungan Pengaruh Tegangan Referensi Terhadap Efisiensi ESP

Pada proses pengujian, peneliti melakukan perhitungan dengan menggunakan persamaan Deutsch-Anderson terhadap data yang diambil sebelumnya terkait diameter partikel, viskositas gas, laju aliran gas, serta luas penampang ESP. Data tersebut diperoleh dari audit *electrical energy* pada tahun 2019 oleh Kensi yang kemudian dijadikan acuan dalam proses perhitungan, disini peneliti menekankan bahwa nilai tegangan referensi yang menjadi variabel bebas dalam pengujian ini.

Tabel 1. Parameter *Electrostatic Precipitator*

No	Spesifikasi ESP	Nilai		Satuan
		ESP 1	ESP 2	
1	Diameter (d)	0,15	0,15	m
2	Permittivity (Ko)	$8,85 \times 10^{-12}$	$8,85 \times 10^{-12}$	
3	Viskositas gas (μ)	$1,8 \times 10^{-5}$	$1,8 \times 10^{-5}$	
4	Laju aliran gas (Q)	38,00	38,00	m ³ /s
5	Luas Penampang (A)	11785	11785	m ²
6	Efisiensi desain (η)	99,52	99,52	%
7	Tekanan (Pa)	$0,5 \times 10^{-6}$	$0,5 \times 10^{-6}$	
8	Velocity (V)	12,68	12,68	m/s
9	Bilangan napier €	2,718	2,718	

Data di atas merupakan data yang diambil pada bulan September tahun 2019 oleh lembaga audit Kensi dimana kapasitas batu bara pada pembakaran boiler sebesar 8000 kg/jam, partikulat yang masuk di *flue gas* minimum sebesar 178 kg/s dan maksimum 297 kg/s, serta partikulat yang keluar minimum sebesar 17, 24 mg/Nm³ dan maksimum 19,4 mg/Nm³. Dari data tersebut dapat dicari efisiensi sistem ESP dengan menggunakan persamaan Deutsch-Anderson.

Perhitungan Migrasi Partikel

Pada perhitungan migrasi partikel kuat medan listrik, ukuran partikel, dan viskositas gas merupakan variabel yang mempengaruhi penentuan kecepatan migrasi partikel, pada bagian ini peneliti memainkan peranan medan listrik untuk mencapai efisiensi yang dikehendaki didasarkan perubahan tegangan referensi, pengambilan data dilaksanakan pada tanggal 05 Mei 2025 dengan pembebanan ESP oleh boiler sebesar 8000kg/jam menggunakan bantuan alat ukur avometer (Fluke 87V) dan clamp ampere (Fluke 305) untuk mengonfirmasi nilai pasti dari kontroller di tiap tiap kompartemen 2ESP-611 A/B/C dan 2ESP-612 A/B/C.

Tabel 2. Data Tegangan dan Arus Referensi 2ESP-611 A/B/C

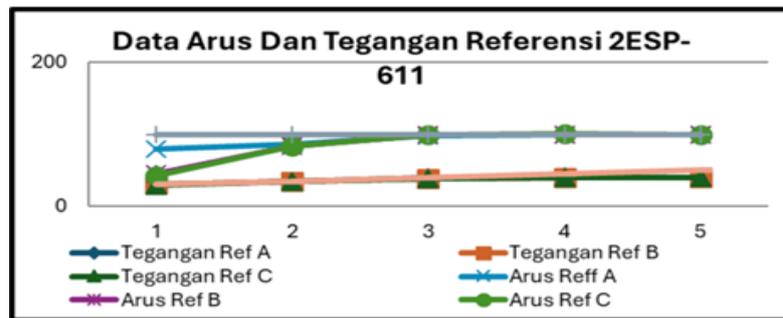
Unit	Data	I1 (A)	V1 (V)	I2 (Ref) (mA)	V2 (Ref) (kV)	Daya (kW)
2ESP-611-A	1	23.9	154.5	52/100	30/30	3.69
	2	33.9	194.6	83/100	35/35	6.60
	3	39.1	214.5	100/100	38/40	8.39
	4	39.3	215.2	100/100	40/45	8.46
	5	40.2	216.3	100/100	40/50	8.70
2ESP-611-B	1	22.6	148.8	48/100	30/30	3.36
	2	32.9	187.9	76/100	35/35	6.18
	3	37.7	199.2	97/100	40/40	7.51
	4	39.2	214.9	100/100	41/45	8.42
	5	39.8	215.4	101/100	42/50	8.57
2ESP-611-C	1	23.1	148.8	49/100	30/30	3.44
	2	34.2	197.1	86/100	35/35	6.74
	3	38.2	201.2	98/100	40/40	7.69
	4	39.1	215.1	100/100	41/45	8.41
	5	40.1	216.1	100/100	41/50	8.67

Tabel 3. Data Tegangan dan Arus Referensi 2ESP-612 A/B/C

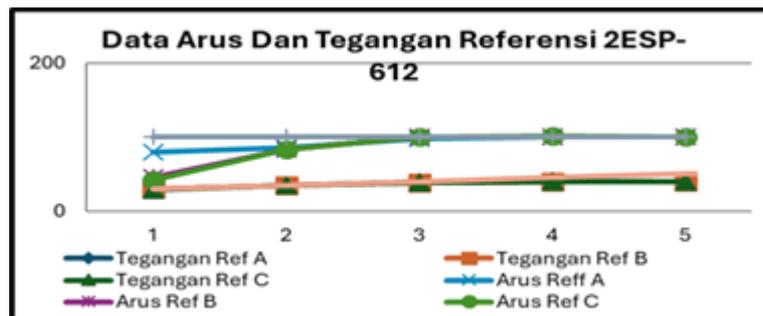
Unit	Data	I1 (A)	V1 (V)	I2 (Ref) (mA)	V2 (Ref) (kV)	Daya (kW)
2ESP-612-A	1	33.1	188.9	79/100	30/30	4.50
	2	34.1	197.1	86/100	35/35	4.84
	3	39.1	201.2	98/100	39/40	5.66
	4	39.8	215.7	100/100	41/45	6.18
	5	40.1	215.9	100/100	40/50	6.23
2ESP-612-B	1	20.5	136.9	45/100	30/30	2.02
	2	33.9	194.6	83/100	35/35	4.75
	3	39.1	214.5	100/100	38/40	6.04
	4	39.2	215.0	100/100	40/45	6.07
	5	40.2	216.3	100/100	40/50	6.26
2ESP-612-C	1	19.9	128.7	42/100	29/30	1.84
	2	21.9	141.8	83/100	35/35	2.24

	3	33.2	199.1	100/100	38/40	4.76
	4	39.3	215.2	101/100	39/45	6.09
	5	40.1	215.9	100/100	39/50	6.23

Dari data diatas dapat dianalisa bahwa rumus perbandingan kumparan trafo tidak berlaku dikarenakan trafo yang digunakan berjenis *rectifier* yang diatur oleh *silicone controlled rectifier* dan terdapat rangkaian resistor di dalamnya sebelum keluar menjadi tegangan referensi/*feedback* (DCV), selain itu juga semakin tinggi tegangan referensi sebagai variabel bebas pada penelitian ini maka semakin tinggi juga arus dan tegangan aktual yang disupply menuju beban (DE/CE) namun pada saat arus referensi sudah mencapai *set point* 100mA, tegangan dan arus supply membentuk kurva lurus / *steady state* dan tidak mengalami kenaikan, aktivitas kurva tersebut berlaku juga untuk kenaikan tegangan referensi mencapai settingan maksimal (72kV). Perhitungan daya aktif pada tiap - tiap kompartemen juga menunjukkan bahwa nilai tersebut masih dibawah kapasitas maksml trafo yaitu 30kW dengan cos phi sebesar 0.72, semakin tinggi arus dan tegangan aktual yang disupply menuju beban maka semakin tinggi nilai daya aktif yang diterapkan pada sistem.



Gambar 11. Kurva Tegangan dan Arus Referensi 2ESP-611A/B/C



Gambar 12. Kurva Tegangan dan Arus Referensi 2ESP-612A/B/C

Dari gambar di atas dapat diketahui bahwa kurva antara arus dan tegangan feedback terhadap set point tidak menunjukkan gejala spark dimana arus atau tegangan feedback tidak melebihi nilai set point yang ditetapkan, dari data diatas dapat dilihat juga bahwa pembebanan mula mula pada kompartemen A lebih tinggi dibanding kompartemen setelahnya berlaku pada kedua sistem ESP, hal tersebut diakibatkan oleh filtrasi awal yang masuk menuju kompartemen A terlebih dahulu sehingga intensitas debu yang ditarik lebih banyak daripada kompartemen yang lain.

Perhitungan Efisiensi ESP Per Kompartemen

Setelah mengetahui data tegangan dan arus tersebut selanjutnya kuat medan dapat diperoleh menggunakan persamaan (2.1) dan migrasi partikel menggunakan persamaan (2.8) pada tiap tiap kompartemen untuk memperoleh nilai efisiensi di setiap kenaikan tegangan referensi.

Tabel 4. Data Efisiensi Per Kompartemen 2ESP-611 A/B/C

Unit	Data	V2 (Ref) (kV)	d (m)	Kuat Medan (V/m)	w (m/s)	η (%)
2ESP-611-A	1	30	0.15	200.00	0.003278	0.637
	2	35	0.15	233.33	0.003824	0.694
	3	39	0.15	260.00	0.004261	0.732
	4	41	0.15	273.33	0.004480	0.750
	5	40	0.15	266.67	0.004370	0.741
2ESP-611-B	1	30	0.15	200.00	0.003278	0.637
	2	35	0.15	233.33	0.003824	0.694
	3	40	0.15	266.67	0.004370	0.741
	4	41	0.15	273.33	0.004480	0.750
	5	42	0.15	280.00	0.004589	0.758
2ESP-611-C	1	30	0.15	200.00	0.003278	0.637
	2	35	0.15	233.33	0.003824	0.694
	3	40	0.15	266.67	0.004370	0.741
	4	41	0.15	273.33	0.004480	0.750
	5	41	0.15	273.33	0.004480	0.750

Tabel 5. Data Efisiensi Per Kompartemen 2ESP-612 A/B/C

Unit	Data	V2 (Ref) (kV)	d (m)	Kuat Medan (V/m)	w (m/s)	η (%)
2ESP-612-A	1	30	0.15	200.00	0.003270	0.637
	2	35	0.15	233.33	0.003824	0.694
	3	39	0.15	260.00	0.004261	0.732
	4	41	0.15	273.33	0.004480	0.750
	5	40	0.15	266.67	0.004370	0.741
2ESP-612-B	1	30	0.15	200.00	0.003278	0.637
	2	35	0.15	233.33	0.003824	0.694
	3	38	0.15	253.33	0.004152	0.723
	4	40	0.15	266.67	0.004370	0.741
	5	40	0.15	266.67	0.004370	0.741
2ESP-612-C	1	29	0.15	193.33	0.003169	0.625
	2	35	0.15	233.33	0.003824	0.694
	3	38	0.15	253.33	0.004152	0.723
	4	39	0.15	260.00	0.004261	0.732
	5	39	0.15	260.00	0.004261	0.732

Dari data di atas dapat diketahui bahwa tegangan referensi yang disetting berpengaruh terhadap nilai kuat medan dimana semakin tinggi *feedback* atas tegangan referensi yang disetting maka semakin tinggi juga nilai kuat medan yang dihasilkan hal tersebut berimbas pada nilai efisiensi ESP pada tiap kompartemennya, namun pada kasus ini meskipun menaikkan tegangan sampai pada kondisi maksimal tanpa menaikkan nilai referensi pada arus, salah satu *feedback* akan *stuck*, hal

tersebut dibuktikan dengan nilai feedback atas tegangan berhenti di nilai 39/40kV meskipun tegangan referensi disetting pada nilai 50kV, semua itu dikarenakan arus *feedback* sudah mencapai *set point* referensi yaitu 100mA. Efisiensi maksimal hasil dari perhitungan pada saat tegangan referensi mencapai 72kV adalah 0.912 atau 91%, didasarkan pada tabel diatas nilai efisiensi yang dihasilkan masih terlalu jauh dari nilai efisiensi maksimal apalagi efisiensi design awal sebesar 99.5%, efisiensi terhitung hanya mencapai 75% pada saat tegangan feedback mencapai 42kV, perlu adanya keselarasan antara menaikkan setting pada arus referensi dan menaikkan setting pada tegangan referensi, jika kenaikan hanya pada satu sisi maka efisiensi yang diharapkan tidak dapat tercapai.

Pengaruh Temperatur Terhadap Nilai *Insulation Test* DE

Pada proses pengujian, peneliti melakukan pengamatan dan pengukuran terhadap temperatur kompartemen menggunakan IR Thermometer (Fluke 62 max) dan *discharge electrode insulation test* menggunakan 5kV Insulation Tester Megger MIT 525, data diambil per 1 jam pada pukul 09.00 s/d 16.00 WIB dan dilaksanakan tanggal 12 Mei 2025 pada saat ESP tidak beroperasi dimana suhu ambient sekitar 31°C mengacu pada data accuweather.com untuk area Pulo Ampel, *insulation test* dilaksanakan dengan cara memutus hubungan antara bagian *discharge electrode* dengan trafo dikarenakan jika kondisi masih tetap terhubung maka akan mempengaruhi data pengukuran selain itu juga probe pada insulation tester harus diarahkan pada *discharge electrode* (Merah) dan *collecting plate* (Hitam).

Tabel 6. Data Temperatur dan *Insulation Test* 2ESP-611 A/B/C

Unit	Data	Temp Ambient (°C)	Temp DE Compartment (°C)	Hasil <i>Insulation Test</i> (Gohm)
2ESP-611-A	09.00	30	31.0	0.0523
	10.00	30	36.2	1.22
	11.00	31	40.9	1.98
	12.00	32	44.0	2.86
	13.00	32	52.9	3.91
	14.00	31	56.4	4.88
	15.00	31	59.0	5.12
2ESP-611-B	16.00	30	61.6	5.67
	09.00	30	29.7	0.0202
	10.00	30	35.9	0.0256
	11.00	31	39.7	0.0298
	12.00	32	41.7	0.0313
	13.00	32	51.8	0.0497
	14.00	31	53.2	0.0511
2ESP-611-C	15.00	31	54.8	0.0524
	16.00	30	56.5	0.0537
	09.00	30	30.2	0.0191
	10.00	30	36.5	0.0953
	11.00	31	40.9	1.32
	12.00	32	42.8	2.42
	13.00	32	51.8	2.67
	14.00	31	53.2	2.71
	15.00	31	54.1	2.79
	16.00	30	56.4	2.89

Tabel 7. Data Temperatur dan *Insulation Test* 2ESP-612 A/B/C

Unit	Data	Temp Ambient (°C)	Temp DE Compartment (°C)	Hasil <i>Insulation Test</i> (Gohm)
2ESP-612-A	09.00	30	32.7	0.0800
	10.00	30	35.9	4.01
	11.00	31	39.7	4.12
	12.00	32	51.7	5.05
	13.00	32	58.8	6.18
	14.00	31	59.9	6.37
	15.00	31	64.2	8.18
	16.00	30	66.9	8.45
2ESP-612-B	09.00	30	31.2	0.0544
	10.00	30	35.8	2.65
	11.00	31	41.2	2.98
	12.00	32	48.8	4.12
	13.00	32	61.2	6.41
	14.00	31	62.5	6.88
	15.00	31	69.1	8.12
	16.00	30	69.4	9.13
2ESP-612-C	09.00	30	29.7	0.0328
	10.00	30	34.9	1.56
	11.00	31	39.7	3.97
	12.00	32	47.2	4.51
	13.00	32	59.8	6.12
	14.00	31	61.2	6.43
	15.00	31	68.1	7.12
	16.00	30	68.9	7.79

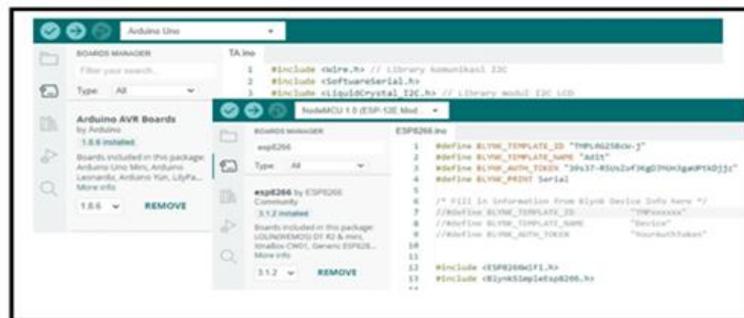
Berdasarkan data di atas dapat diketahui bahwa seiring dengan kenaikan temperatur DE pada masing - masing kompartemen maka nilai dari *insulation test discharge electrode* terhadap *collecting plate* juga semakin naik, nilai terendah tahanan DE pada saat dilakukan pengujian adalah 0.0191Gohm yaitu di kompartemen C *line* 2ESP-611 pada pukul 09.00 pada saat temperatur kompartemen mencapai 30.2°C dan nilai tertinggi tahanan DE pada saat dilakukan pengujian adalah 9.13Gohm yaitu di kompartemen B *line* 2ESP-612 pada pukul 16.00 WIB pada saat temperatur kompartemen mencapai 69.4°C, nilai tersebut menunjukkan bahwa semakin baik tahanan antara *discharge electrode* terhadap *collecting plate* maka kemungkinan *sparking* dapat diminimalisir akibat adanya perpindahan muatan. Pengujian ini dilaksanakan menggunakan bantuan 2 buah heater yang terpasang sebelumnya untuk menaikkan temperatur pada kompartemen, terletak di ujung dan di pangkal kompartemen sehingga dalam 7 jam pengambilan sampel pengujian, temperatur pada kompartemen naik dari 29.7°C s/d 69.4°C. Dari data diatas dapat dianalisa juga bahwa pada kompartemen B *line* 2ESP-611 hanya terjadi sedikit kenaikan *insulation test/tahanan discharge electrode* terhadap *collecting plate* yaitu dari nilai tahanan sebesar 0.0202Gohm hanya naik menjadi 0.0537Gohm meskipun mendapatkan temperatur yang sama dengan kompartemen lain, hal tersebut didasari oleh faktor kebersihan *discharge electrode* dan *collecting plate* dimana debu *fly ash* yang menempel pada DE dan *collecting plate* akan menurunkan nilai tahanan, serangkaian investigasi juga dilakukan akibat nilai tahanan yang rendah tersebut, ditemukan 2 buah rapping hammer yang sudah tidak berfungsi sebagaimana mestinya mengakibatkan penumpukan debu tersebut, disini dapat dilihat juga bahwa meskipun temperatur mengambil peranan penting untuk

menaikkan hasil *insulation test*/tahan discharge electrode terhadap *collecting plate*, peran dari intensitas kebersihan kompartemen juga harus diperhitungkan.

Pengujian Software Monitoring Electrostatic Precipitator

Software monitoring yang diujikan disini berupa nilai *feedback* tegangan dan arus yang diambil sebelumnya dari keluaran trafo *rectifier* berbentuk data analog (0-5VDC), nilai tersebut menjadi dasar bagi peneliti untuk mensetting secara manual sistem ESP jika sewaktu waktu terjadi malfungsi sistem, ditandai dengan intensitas *sparking* dan nilai *feedback* yang termonitor secara *realtime* melalui aplikasi Blynk, data yang dihimpun nantinya juga akan dibandingkan dengan pembacaan pada aplikasi Blynk terhadap *display* nilai yang tertampil pada kontroler ESP dengan tujuan mencari *error* atas *software monitoring* yang telah dibuat, ditambahkan juga tanda peringatan batas *sparking* berupa lampu LED hijau, kuning, merah serta buzzer yang diprogram sedemikian rupa untuk membantu peneliti dalam mengambil kesimpulan pada pengujian *short circuit* dan *open circuit*.

Software diterapkan pada mikrokontroler Atmega328P dan selanjutnya diintegrasikan dengan aplikasi Blynk melalui wifi sebagai media transmisi data, diawali dengan menginstall sistem operasi Arduino IDE kemudian selanjutnya menambahkan library Liquid Crystal I2C pada board Arduino Uno dan Blynk pada board NodeMCU 1.0 (ESP-12E Module) atau board Generic ESP8266 Module, pemrograman dilakukan terpisah antara board Arduino Uno dan board NodeMCU 1.0.



Gambar 13. Board Arduino Uno dan Board NodeMCU 1.0

Berdasarkan pada gambar 13 pada board NodeMCU 1.0 (ESP-12 Module) yang nantinya diprogram dan diintegrasikan dengan aplikasi Blynk, perlu diperhatikan bahwa *auth token* sangat diperlukan dalam proses pemrograman, pemrograman dibagi menjadi 2 tahap dimana pada saat proses *upload sketch* pada board ATmega328P DIP switch 3 dan 4 harus dalam posisi on dan pada saat proses *upload sketch* pada board ESP8266 dipilih DIP switch 5,6, dan 7, masing – masing proses *upload* data perlu menekan MCU reset pada board Arduino Uno Wifi R3 sebagai syarat inisialisasi.

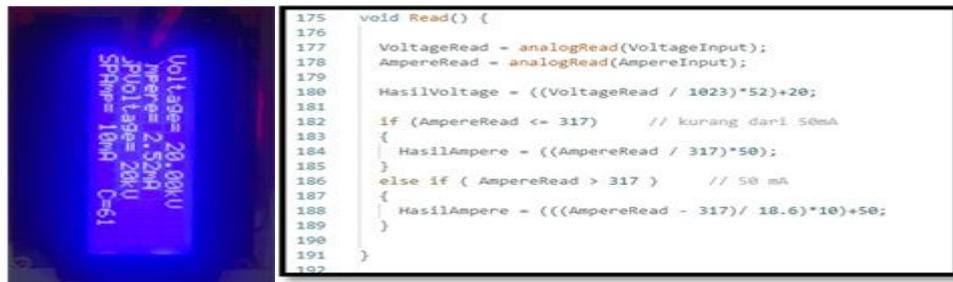
Pengujian Program Nilai Tegangan dan Arus Feedback

Didasarkan pada pokok pembahasan sebelumnya mengenai pengaruh tegangan referensi terhadap efisiensi dari sistem *electrostatic precipitator*, dimana setting tegangan dan arus referensi yang sesuai sangat dibutuhkan untuk meningkatkan efisiensi dari sistem *electrostatic precipitator*, maka dari itu disini peneliti melakukan konstruksi alat sederhana untuk memantau perkembangan secara real time melalui aplikasi Blynk atas nilai tegangan referensi/*set point* dan *feedback* yang nantinya akan dilakukan perbandingan terhadap pembacaan kontroler ESP *eksisting* untuk menguji tingkat *error* dari alat tersebut.

Scaling Program Pada Software Monitoring

Scaling program dilakukan untuk menguji kesesuaian nilai data analog (0-5VDC) yang nantinya akan diteruskan menuju program dan dirubah menjadi satuan kV untuk tegangan *feedback* (0-72kV) dan satuan mA untuk arus *feedback* (0-400mA), pengujian *scaling program* dibantu *adjustable power supply* sebagai pengganti sementara *feedback* asli dari trafo (0-5VDC), dibantu dengan 4 push button

yang berfungsi untuk mengontrol kenaikan tegangan dan arus referensi/*set point* sehingga perubahan atas *set point* dapat terkontrol dengan baik, data hasil *scaling* tersebut nantinya akan ditampilkan pada LCD I2C 20x4.

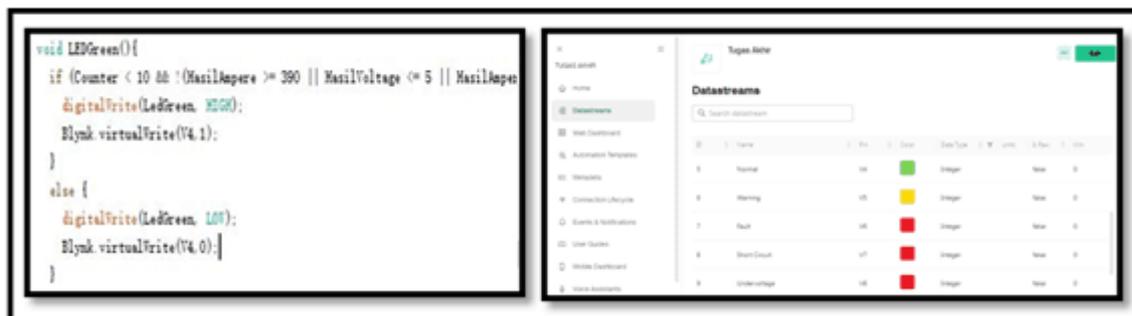


Gambar 14. Program Scaling Arduino Uno

Gambar di atas merupakan program *software* arduino yang didalamnya berisi kalkulasi yang terdiri atas HasilVoltage dan HasilAmpere, hasil kalkulasi tersebut adalah nilai akhir yang ditampilkan pada LCD I2C 20x4, pada HasilAmpere tegangan feedback (0-12VDC) di rubah menjadi (0-5VDC). Setelah dilakukan *scaling* atas tegangan input selanjutnya peneliti melakukan pengujian atas program tersebut dengan membandingkan hasil *scaling* dengan local display. Pemrograman arduino untuk Hasil Ampere terjadi lonjakan *feedback* VDC yang signifikan dari pembacaan 0-50mA maka dari itu pemrograman *scaling* dilakukan terpisah, untuk pembacaan 50mA ketas dikalkulasi kembali atas hasil pengujian yang dilakukan berdasarkan kontroler *eksisting* ESP, ditetapkan batas bawah untuk tegangan referensi/*set point* yaitu 20kV dan 10mA untuk arus referensi/*set point*, kenaikan tegangan referensi/*set point* dibuat per 1kV dan untuk arus referensi/*set point* dibuat per 10mA menyesuaikan kontroler *eksisting* ESP.

Inisialisasi (Arduino Uno Wifi R3 to Blynk)

Kesesuaian atas pembacaan perlu diperhatikan antara data yang tertampil pada LCD I2C 20x4 dengan data yang nantinya dikirim dan dihimpun oleh aplikasi Blynk, pengujian dilakukan oleh peneliti untuk memaksimalkan kesesuaian atas data tersebut. Pemrograman dilakukan pada board NodeMCU 1.0 kemudian diinisialisasikan oleh aplikasi Blynk.



Gambar 15 Program Inisialisasi Arduino to Blynk

Gambar di atas merupakan pemrograman inisialisasi pada *board* NodeMCU 1.0 terhadap *template* datastream yang sebelumnya telah dibuat pada aplikasi Blynk sehingga data yang nantinya dikirim akan sama dengan data yang tertampil pada LCD I2C 20x4 dalam bentuk integer, selain menerima data dari *board* NodeMCU 1.0 untuk ditampilkan pada aplikasi Blynk, aplikasi Blynk juga dapat memberi *command reset* untuk alat monitoring tersebut menggunakan pin 9 sehingga counter sparking kembali ke 0, namun untuk permasalahan *short circuit* dan *open circuit*, permasalahan harus diselesaikan terlebih dahulu dikarenakan aspek safety.

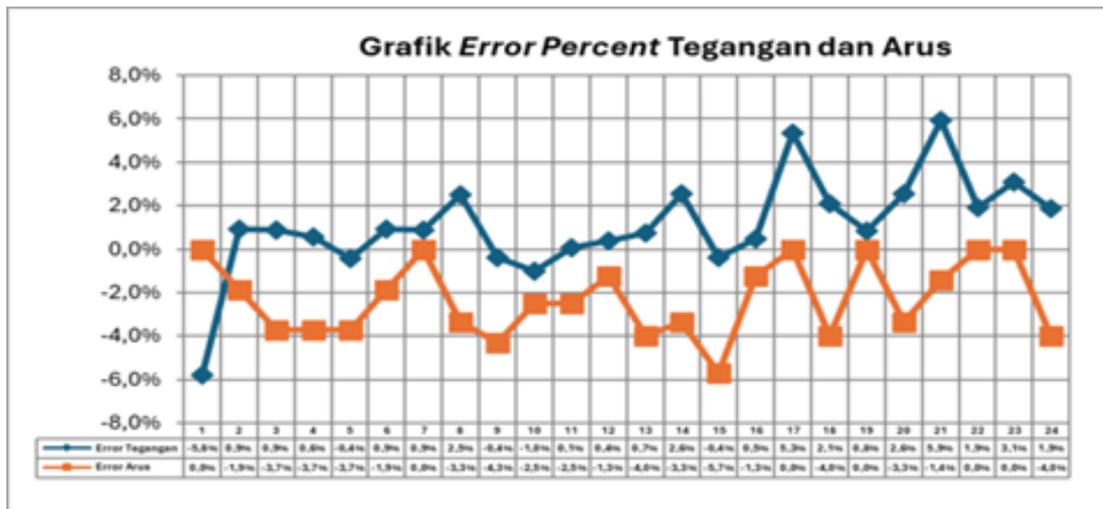
Pengujian Error Percent Alat Monitoring

Pengujian *error percent* alat *monitoring* terhadap pembacaan *display eksisting ESP* dilaksanakan pada tanggal 08 Mei 2025 dengan pembebanan ESP oleh boiler sebesar 8000kg/jam, alat *monitoring* ditempatkan di 2ESP-612 kompartemen B dipilih sebagai *sample* untuk menguji kinerja dari alat *monitoring* didasarkan pada tata letak *discharge electrode/collecting plate* yang berada pada pertengahan sistem *electrostatic precipitator*. Data pengujian diambil dan diterapkan pada tegangan referensi 30-45kV dan arus referensi 50-100mA, sedangkan data atas tegangan dan arus *feedback* menyesuaikan berdasarkan pembebanan aktual ESP.

Tabel 8. Data Aktual VDC (Tegangan dan Arus Feedback)

No	V/I (Referensi/Set Point)	V/I (Display) (Feedback)	V/I (Blynk) (Feedback)	Aktual V/I (DCV)
1	30/50	30/50	28.27/50	0.97/3.77
2	30/60	30/54	30.28/53	0.97/3.77
3	30/70	30/54	30.27/52	0.97/3.77
4	30/80	30/54	30.17/52	0.97/3.77
5	30/90	30/54	29.87/52	0.97/3.77
6	30/100	30/54	30.28/53	0.97/3.77
7	35/50	30/50	30.27/50	0.97/3.77
8	35/60	32/60	32.80/58	1.08/4.01
9	35/70	34/70	33.87/67	1.24/4.25
10	35/80	35/80	34.65/78	1.38/4.39
11	35/90	35/80	35.02/78	1.38/4.41
12	35/100	35/80	35.13/79	1.38/4.41
13	40/50	30/50	30.22/48	0.97/3.77
14	40/60	32/60	32.82/58	1.08/4.01
15	40/70	34/70	33.87/66	1.24/4.25
16	40/80	35/80	35.17/79	1.36/4.39
17	40/90	36/90	37.92/90	1.54/4.63
18	40/100	38/100	38.80/96	1.70/4.81
19	45/50	30/50	30.25/50	0.97/3.77
20	45/60	32/60	32.82/58	1.08/4.01
21	45/70	34/70	36.02/69	1.24/4.25
22	45/80	35/80	35.67/80	1.36/4.39
23	45/90	36/90	37.12/90	1.54/4.63
24	45/100	38/100	38.71/96	1.70/4.81

Pada tabel di atas data aktual (DCV) diambil menggunakan multimeter Fluke 87V dimana data tersebut menunjukkan kenaikan seiring dengan naiknya nilai *feedback* pada *display eksisting ESP* dan aplikasi Blynk, data pengukuran menunjukkan nilai 0.97VDC pada saat tegangan 30kV dan 3.77VDC pada arus 50mA, keduanya mengalami kenaikan tertinggi pada saat pengujian mencapai 1.70VDC pada tegangan 38kV dan 4.81VDC pada arus 100mA, data yang diambil masih jauh dari toleransi batas atas dari *feedback* trafo *rectifier* yaitu 72kV dan 400mA, dikarenakan pembebanan coal boiler masih di minimum operasi yaitu 8000kg/jam, jika setting atas tegangan dan arus referensi/*set point* dinaikkan maka akan dapat mengakibatkan terjadinya *sparking*.



Gambar 16. Data Error Percent Program

Dari gambar di atas dapat diketahui bahwa pembacaan yang terhimpun pada aplikasi Blynk masih terpaut nilai yang cukup signifikan dimana *error* atas pembacaan tersebut $\pm 6\%$ terhadap pembacaan yang ditampilkan pada *display* kontroler *eksisting*, hal tersebut dikarenakan *delay time* yang disetting pada pada aplikasi Blynk terlalu cepat disesuaikan dengan perubahan data atas tegangan *feedback* (0-5VDC) yang dihimpun yaitu sebesar 500ms, selain *delay* yang disetting nilai *error* yang cenderung tinggi tersebut diakibatkan oleh perangkat mikrokontroler sangat sensitif karena pengaruh terminasi *wiring*. Dari total keseluruhan pengujian terdapat 0% *error* yang semua diperoleh dari pembacaan arus, yang mendasari hal tersebut adalah pengaturan pembacaan pada aplikasi Blynk yang di terapkan memiliki satuan yang sama dengan pembacaan pada *display* kontroler *eksisting* (mA) sedangkan untuk tegangan pilihan atas satuan tegangan hanya sebatas volt sehingga pada proses *scaling* harus dikalikan 1000, pada tabel 8 mengonfirmasi hal tersebut dengan menambahkan dua nilai di belakang tanda titik.

Pengujian Short Circuit dan Open Circuit

Pengujian *short circuit* (*Sparking*) dilakukan atas dasar memberikan pemahaman kepada pembaca tentang proses terjadinya *sparking*, dimana pada saat kondisi *sparking* arus *feedback* (mA) akan mengalami lonjakan dengan waktu yang sangat singkat akibat beban berlebih yang membuat resistansi antara *discharge electrode* terhadap *collecting plate* turun, hal tersebut sesuai dengan prinsip hukum Ohm, dapat dilihat juga pada pengujian sebelumnya tentang pengaruh temperatur terhadap nilai *insulation test discharge electrode* dimana kelembapan dan tingkat kebersihan menjadi salah satu faktor turunnya nilai resistansi tersebut, menurut standar yang dipakai oleh PT. Tai&Chyun yang merupakan engineer ESP jarak antara *discharge electrode* dan *collecting plate* yang diizinkan adalah 180mm, tingkat kekotoran ESP dapat memperpendek jarak tersebut.

Pengujian *open circuit* dilakukan atas dasar memberikan pemahaman kepada pembaca terkait beberapa faktor penyebab yang mungkin terjadi sehingga mengakibatkan ESP dalam keadaan *open circuit*, untuk menyikapi permasalahan diatas peneliti menambahkan program terkait *safety operation ESP* dimana *counter sparking* akan ditampilkan pada LCD I2C dan aplikasi Blynk, dibantu dengan 3 lampu operasi red, yellow, dan green (RYG) serta 1 buzzer sebagai penanda atas permasalahan yang timbul pada ESP. Dalam sub bab ini peneliti membagi permasalahan menjadi 5 bagian sesuai dengan faktor yang menjadi pemicu, kemudian disertakan juga pemecahan atas permasalahan tersebut.

Tabel 9. Safety Operation dan Alarm ESP

NO	SIGN	PROGRAM	PENYEBAB	PENYELESAIAN
1	NORMAL (LED HIJAU)	Nilai <i>feedback</i> dibawah nilai referensi/ <i>set point</i>	-	
2	WARNING (LED KUNING)	Nilai <i>feedback</i> diatas nilai referensi/ <i>set point</i> dengan <i>counter</i> ≥ 10 kali (<i>sparking</i>)	- Kelembapan ESP - Kebersihan ESP - Setting referensi kurang dari nilai <i>feedback</i> akibat proses pembebanan	- Memastikan <i>heater</i> berfungsi dengan baik - Memastikan rapping hammer dalam keadaan <i>running</i> - Setting ulang nilai referensi terhadap <i>feedback</i> ESP
3	FAULT (LED MERAH + BUZZER)	Nilai <i>feedback</i> diatas nilai referensi/ <i>set point</i> dengan <i>counter</i> ≥ 40 kali (<i>sparking</i>)	- Kelembapan ESP - Kebersihan ESP - Setting referensi kurang dari nilai <i>feedback</i> akibat proses pembebanan	- Memastikan <i>heater</i> berfungsi dengan baik - Memastikan rapping hammer dalam keadaan <i>running</i> - Setting ulang nilai referensi terhadap <i>feedback</i> ESP
4	SHORT CIRCUIT (BUZZER)	Nilai arus <i>feedback</i> melebihi nilai maksimal kapasitas trafo 400mA	- Kelembapan ESP - Kebersihan ESP - Benda asing masuk kedalam ESP - <i>Short circuit</i> pada <i>wiring feedback</i>	- Memastikan <i>heater</i> berfungsi dengan baik - Memastikan rapping hammer dalam keadaan <i>running</i> - PM/CM bulanan
5	OPEN CIRCUIT (BUZZER)	Nilai arus <i>feedback</i> dibawah 5mA dibuat sebagai batas bawah operasi ESP	- <i>Blade</i> trafo masih belum terhubung ke DE - <i>Dumping Resistor was broken</i> - <i>Open circuit</i> pada <i>wiring feedback</i>	- Memastikan <i>blade</i> trafo terhubung dengan DE - PM/CM bulanan

Berdasarkan tabel 9 dapat diketahui bahwa kondisi ESP pada saat menunjukkan alarm warning dan fault di samping faktor kelembapan dan kebersihan, setting atas tegangan dan arus referensi juga menjadi faktor ESP mengalami *sparking*, maka dari itu pada pembahasan sebelumnya peneliti membuat sebuah program untuk memonitor secara real time atas nilai - nilai tersebut, batas *counter* terjadinya *sparking* dibuat oleh peneliti berdasarkan pengalaman di lapangan dan saran yang diberikan oleh PT. Tai&Chyun yang merupakan engineer ESP di PT. Chandra Asri Pacific.

```

void ShortCircuit()
{
  if (ImsilAmpere >= 400){
    Blynk.virtualWrite(V7, 1);
  }
  else {
    Blynk.virtualWrite(V7, 0);
  }
}

void UnderVoltage()
{
  if (ImsilAmpere <= 5){
    Blynk.virtualWrite(V8, 1);
  }
  else {
    Blynk.virtualWrite(V8, 0);
  }
}

```

Gambar 17. Program *Short Circuit* dan *Open Circuit*

Gambar di atas merupakan program pada arduino IDE untuk memberikan indikasi yang nantinya ditampilkan di aplikasi Blynk, sehingga alarm yang terjadi akibat *short circuit* dan *open circuit* dapat termonitor dengan baik dengan syarat bahwa *short circuit* akan menampilkan indikasi jika nilai arus *feedback* diatas 400mA sedangkan *open circuit* akan menampilkan indikasi jika nilai arus *feedback* dibawah 5mA.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Berdasarkan hasil observasi, perhitungan, dan serangkaian pengujian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa efektivitas kerja sistem *electrostatic precipitator* (ESP) sangat dipengaruhi oleh beberapa faktor teknis, khususnya tegangan referensi, suhu, serta kondisi lingkungan dalam kompartemen. Pertama, pengujian terhadap tegangan referensi menunjukkan bahwa penetapan nilai tegangan sebagai satu-satunya parameter pengaturan belum cukup untuk mencapai efisiensi maksimal. Hal ini terlihat ketika efisiensi hanya mencapai 75% pada set point 50kV dengan feedback 42kV, akibat arus telah menyentuh batas referensi 100mA. Oleh karena itu, diperlukan penyesuaian antara tegangan dan arus referensi secara bersamaan agar efisiensi yang diharapkan sebesar 99,5% dapat dicapai. Selanjutnya, pengaruh temperatur terhadap nilai *insulation test* menunjukkan pentingnya menjaga kelembapan dan kebersihan dalam ruang ESP. Hasil uji membuktikan bahwa nilai resistansi tertinggi sebesar 9,13 G Ω terjadi pada temperatur 69,4°C, yang mengindikasikan bahwa kondisi lingkungan yang bersih dan kering dapat meminimalkan risiko *sparking* akibat loncatan muatan listrik yang tidak diinginkan. Selain itu, perangkat lunak pemantauan yang dirancang dengan mengintegrasikan Arduino Uno WiFi R3 dan modul ESP8266 berhasil memfasilitasi pemantauan parameter sistem secara *real-time* melalui aplikasi Blynk. Meskipun demikian, tingkat kesalahan pembacaan data mencapai $\pm 6\%$, yang disebabkan oleh pengaturan *delay time*, terminasi mikrokontroler, serta konversi satuan parameter yang belum optimal. Terakhir, sistem indikator keselamatan berbasis tiga lampu indikator (merah, kuning, hijau) dan buzzer yang terhubung ke aplikasi Blynk mampu memberikan peringatan dini terhadap kondisi *short circuit* dan *open circuit*. Sistem ini mampu mendukung operasi ESP yang aman dengan memberikan informasi status seperti operasi normal, peringatan, dan kesalahan sistem. Langkah-langkah perbaikan seperti pemeriksaan heater, rapping hammer, penyetelan ulang nilai referensi, dan pemeliharaan rutin menjadi bagian penting dalam menjaga kinerja dan keselamatan sistem secara menyeluruh.

Saran

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis dari berbagai pengujian yang telah dilakukan, terdapat beberapa saran yang dapat dijadikan acuan untuk pengembangan penelitian selanjutnya. Pertama, disarankan menggunakan Arduino WiFi R4 dengan ESP32 karena integrasi antara mikrokontroler dan modul WiFi lebih efisien dibandingkan Arduino Uno WiFi R3 yang masih memerlukan pemrograman terpisah melalui pengaturan DIP switch. Kedua, penggunaan platform server.php atau website lebih disarankan daripada aplikasi Blynk sebagai antarmuka, mengingat keterbatasan fitur dan pembatasan data pada versi gratis Blynk. Ketiga, pengujian terhadap

temperatur sebaiknya dilakukan dalam rentang waktu yang lebih panjang agar dapat mencapai suhu tinggi yang lebih stabil dan memberikan data perbandingan yang lebih akurat. Terakhir, pembuatan wiring secara langsung pada papan PCB lebih dianjurkan karena dapat meningkatkan akurasi pembacaan nilai pada mikrokontroler dan meminimalkan gangguan dari sistem terminasi kabel yang tidak permanen.

DAFTAR PUSTAKA

- Afriani, N., & Ervianto, E. (2015). Analisa Kinerja Electrostatic Precipitator (ESP) berdasarkan Besarnya Tegangan DC yang digunakan terhadap Perubahan Emisi di Power Boiler Industri Pulp and Paper [PhD Thesis, Riau University]. <https://www.neliti.com/publications/186054/analisa-kinerja-electrostatic-precipitator-esp-berdasarkan-besarnya-tegangan-dc>
- Arita, S., Hadiah, F., Amalia, R., Rosmalisa, E., & Andalia, W. (2019). Production of Glucose from Waste Bark Acacia Mangium Using Delignification and Chemical Hydrolysis Process. *Journal of Physics: Conference Series*, 1167(1), 012052. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1167/1/012052>
- Fitrianto, A. (2018). Analisa Kinerja Electrostatic Precipitator (ESP) Berdasarkan Hasil Perubahan Emisi Pada Power Boiler Pembangkit Listrik Tenaga Uap (Studi Kasus di PLTU Lestari Banten Energy). Skripsi: Program Studi S-1 Teknik Elektro Fakultas Teknologi Informasi dan Elektro Universitas Teknologi Yogyakarta.
- Han, B., Hudda, Neelakshi, Ning, Zhi, Kim, Yong-Jin, & Sioutas, C. (2009). Efficient Collection of Atmospheric Aerosols with a Particle Concentrator—Electrostatic Precipitator Sampler. *Aerosol Science and Technology*, 43(8), 757–766. <https://doi.org/10.1080/02786820902919502>
- International Energy Agency. (2021). *Global Energy Review: CO2 Emissions in 2021*. <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-co2-emissions-in-2021-2>
- IQAir. (2023). *2024 World Air Quality Report*. <https://www.iqair.com/world-air-quality-report>
- Jaworek, A., Krupa, A., & Czech, T. (2007). Modern electrostatic devices and methods for exhaust gas cleaning: A brief review. *Journal of electrostatics*, 65(3), 133–155.
- Kementerian Energi Dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia. (2015). *Data Inventory Emisi GRK Sektor Energi*. Kementerian Energi Dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia.
- Kho, D. (2022). Pengertian Rectifier (Penyearah Gelombang) dan Jenis-jenisnya. <https://teknikelektronika.com/pengertian-rectifier-penyearah-gelombang-jenis-rectifier/>
- Lebedev, A., Anariba, F., Li, X., & Wu, P. (2020). Rational design of visible-light-sensitive Ag-BiVO4 oxides by matching redox potentials of catalyst, dyes, and reactive oxygen species towards more efficient photocatalytic degradation. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(3), 103748. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.103748>
- Shah, K. P. (2017). Construction, working, operation and maintenance of electrostatic precipitators (ESPs). *Practical Maintenance*. <http://practicalmaintenance.net/wp-content/uploads/Construction-Working-Operation-and-Maintenance-of-Electrostatic-Precipitators-ESPs.pdf>
- Utami, S. N. (2022). Transformator: Pengertian, Fungsi, dan Prinsip Kerjanya Halaman all—Kompas.com. <https://www.kompas.com/skola/read/2022/02/07/144348069/transformator-pengertian-fungsi-dan-prinsip-kerjanya?page=all>
- Yorifuji, T., Bae, S., Kashima, S., Tsuda, T., Doi, H., Honda, Y., Kim, H., & Hong, Y.-C. (2015). Health Impact Assessment of PM10 and PM2.5 in 27 Southeast and East Asian Cities. *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 57(7), 751. <https://doi.org/10.1097/JOM.0000000000000485>
- Yudhanto, Y., & Azis, A. (2019). *Pengantar Teknologi Internet of Things (IoT)*. UNSPress.
- Zhang, J., Wang, J., Ren, H., Fu, J., Li, J., & Zhang, Z. (2024). Enhancement of PM2.5 removal efficiency in high-temperature ESP under multi-field coupling: A numerical simulation study on

temperature and magnetic field effects. *Powder Technology*, 434, 119376.
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2024.119376>

Zhou, Y., Liu, Y., Shi, Z., Li, X., & Yu, M. (2024). Enhanced size-dependent efficiency of removal of ultrafine particles: New solution of two-stage electrostatic precipitator with thermophoresis. *Separation and Purification Technology*, 346, 127479.
<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.127479>