

**ANALISA KINERJA *ELECTROSTATIC PRECIPITATOR* (ESP)
BERDASARKAN HASIL PERUBAHAN EMISI PADA POWER BOILER
PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP
(Studi Kasus di PLTU Lestari Banten Energy)**

NASKAH PUBLIKASI TUGAS AKHIR



ARDY FITRIANTO
5140711020

**PROGRAM STUDI S-1 TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI INFORMASI DAN ELEKTRO
UNIVERSITAS TEKNOLOGI YOGYAKARTA**

**YOGYAKARTA
2018**

**HALAMAN PENGESAHAN
NASKAH PUBLIKASI TUGAS AKHIR MAHASISWA**

Judul Tugas Akhir:

**ANALISA KINERJA *ELECTROSTATIC PRECIPITATOR* (ESP)
BERDASARKAN HASIL DARI PERUBAHAN EMISI PADA POWER
BOILER PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP
(Studi Kasus di PLTU Lestari Banten Energy)**

Judul Naskah Publikasi:

**ANALISA KINERJA *ELECTROSTATIC PRECIPITATOR* (ESP)
BERDASARKAN HASIL DARI PERUBAHAN EMISI PADA POWER
BOILER PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP
(Studi Kasus di PLTU Lestari Banten Energy)**

Disusun oleh:

ARDY FITRIANTO

5140711020

Mengetahui,

Nama	Jabatan	Tanda Tangan	Tanggal
Ikrima Alfi, S.T., M.Eng.	Pembimbing

Naskah Publikasi Tugas Akhir ini telah diterima sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar Sarjana pada Program Studi Teknik Elektro

Yogyakarta,.....

Ketua Program Studi Teknik Elektro

Satyo Nuryadi, S.T., M.Eng.

NIK. 100205023

PERNYATAAN PUBLIKASI

Yang bertanda tangan di bawah ini, Saya:

Nama : Ardy Fitrianto
NIM : 5140711020
Program Studi : Teknik Elektro
Fakultas : Teknologi Informasi dan Elektro

“Analisa Kinerja *Electrostatic Precipitator* (ESP) Berdasarkan Hasil dari Perubahan Emisi pada Power Boiler Pembangkit Listrik Tenaga Uap (Studi Kasus di PLTU Lestari Banten Energy)”

Menyatakan bahwa Naskah Publikasi ini hanya akan dipublikasikan di JURNAL Fakultas Teknologi Informasi dan Elektro, UTY, dan tidak dipublikasikan di jurnal yang lain.

Demikian surat pernyataan ini dibuat dengan sebenar-benarnya.

Yogyakarta, 15 Agustus 2018
Penulis,

Ardy Fitrianto
5140711020

**ANALISA KINERJA ELECTROSTATIC PRECIPITATOR (ESP) BERDASARKAN
HASIL DARI PERUBAHAN EMISI PADA POWER BOILER PEMBANGKIT
LISTRIK TENAGA UAP
(Studi Kasus di PLTU Lestari Banten Energy)**

Ardy Fitrianto

*Program Studi S-1 Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Informasi Dan Elektro
Universitas Teknologi Yogyakarta
Jl. Ringroad Utara Jombor Sleman Yogyakarta
E-mail : fitriantoardy@gmail.com*

ABSTRAK

Pencemaran udara merupakan salah satu pencemaran yang dikategorikan sebagai pencemaran yang sangat berbahaya dan memberikan dampak yang cukup besar. Hal ini dikarenakan partikel polutan dari pencemaran ini berukuran sangat kecil sehingga tidak disadari oleh masyarakat. Berdasarkan wujud fisiknya, pencemar-pencemar yang terdapat di udara tidak hanya berupa gas atau uap, melainkan dapat juga benda-benda padat sebagai partikel, yaitu berupa debu, asap dan bau. Berdasarkan hal tersebut maka diperlukan alat yang digunakan untuk mengendalikan emisi gas yaitu Electrostatic Precipitator (ESP). Prinsip utama sistem ini adalah menangkap atau mengikat debu yang keluar dari hasil pembakaran dengan memberikan arus listrik tegangan dc tinggi pada kawat elektroda bermuatan negatif sehingga debu-debu akan termuati oleh muatan negatif akibatnya debu-debu yang keluar dari hasil pembakaran tertarik atau terikat pada pelat-pelat yang bermuatan positif dan gas bersih bergerak menuju cerobong asap. Dalam melakukan penelitian di PT. Lestari Banten Energy dilakukan dalam beberapa tahap yaitu observasi lapangan di lingkungan PLTU kemudian studi literatur setelah itu pengambilan dan pengolahan data, kemudian studi bimbingan dan tahap terakhir yaitu pembuatan laporan. Tahapan penelitian ini dilakukan untuk memperoleh data yang dibutuhkan terutama spesifikasi mesin ESP, tegangan dan arus setting pada ESP, Tegangan dan arus aktual pada ESP. Maka dalam penulis mengambil judul "Analisa Kinerja Electrostatic Precipitator (ESP) Berdasarkan Hasil dari Perubahan Emisi pada Power Boiler Pembangkit Listrik Tenaga Uap (Studi Kasus di PLTU Lestari Banten Energy)" yang bertujuan untuk menganalisa pengaruh tegangan dc hasil dari setting trafo ESP di PLTU Lestari Banten Energy. Kesimpulan dari penelitian ini adalah mengetahui efisiensi dari setting tegangan DC pada unit trafo ESP dan efisiensi dari mesin ESP, yang mana untuk efisiensi setting tegangan 50kV DC pada unit trafo sebesar 98.71% dan efisiensi ESP berdasarkan desain sebesar 99.99%. Setelah mendapatkan hasil setting trafo tegangan DC di PLTU Lestari Banten Energy, kemudian dilakukan simulasi tegangan dan arus aktual untuk penentuan tegangan optimum ESP, yang mana simulasi setting tegangan masukan 40 kV DC, 60kV DC, dan 72 KV DC didapatkan efisiensi setting tegangan 40 kV DC yaitu 81.98%, setting tegangan 60 kV DC yaitu sebelum gangguan sebesar 98.23% dan setelah gangguan 96.95% terjadi penurunan efisiensi pada kinerja ESP yang disebabkan karena beberapa field trafo mengalami gangguan sehingga tidak dapat mensuplai tegangan. Dan untuk setting tegangan 72 kV DC yaitu 95.72%.

Kata Kunci: Pencemaran Udara, Electrostatic Precipitator(ESP), Tegangan DC

1. PENDAHULUAN

Pencemaran udara merupakan salah satu pencemaran yang dikategorikan sebagai pencemaran yang sangat berbahaya dan memberikan dampak yang cukup besar. Hal ini dikarenakan partikel polutan dari pencemaran ini berukuran sangat kecil sehingga tidak disadari oleh masyarakat. Berdasarkan wujud fisiknya, pencemar-pencemar yang terdapat di udara tidak hanya berupa gas atau uap, melainkan dapat juga benda-benda padat sebagai partikel, yaitu berupa debu, asap dan bau.

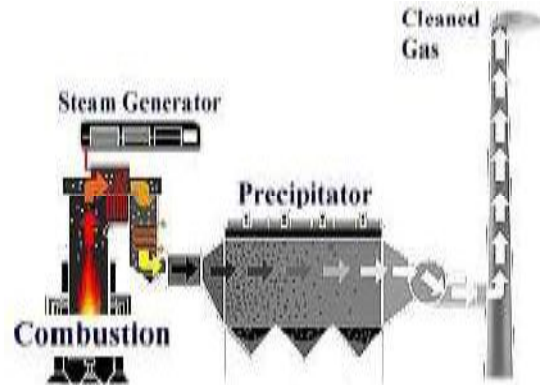
Bertambahnya perindustrian yang muncul saat ini menyebabkan tuntutan akan kebutuhan listrik meningkat. Pada saat ini di Indonesia pembangkit listrik yang paling banyak digunakan adalah Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). Hal ini dikarenakan di Indonesia masih terdapat tambang batubara, minyak bumi dan gas bumi. Namun, yang lebih banyak digunakan adalah batubara, karena jumlahnya masih cukup banyak dibanding dengan minyak bumi dan gas bumi.

Adapun abu hasil pembakaran batubara dalam boiler menghasilkan abu terbang (fly ash) dan abu dasar (bottom ash). Abu terbang disebut fly ash adalah

Berdasarkan hal tersebut maka diperlukan alat yang digunakan untuk mengendalikan emisi gas yaitu Electrostatic Precipitator (ESP). Prinsip utama sistem ini adalah menangkap atau mengikat debu yang keluar dari hasil pembakaran dengan memberikan arus listrik tegangan tinggi pada kawat elektroda bermuatan negatif sehingga debu-debu akan termuati oleh muatan negatif akibatnya debu-debu yang keluar dari hasil pembakaran tertarik atau terikat pada pelat-pelat yang bermuatan positif dan gas bersih bergerak menuju cerobong asap.

2. LANDASAN TEORI

ElectroStatic Precipitator (ESP) adalah salah satu alternatif penangkap debu dengan efisiensi tinggi (mencapai diatas 90%) dan rentang partikel yang didapat cukup besar. Dengan menggunakan electrostatic precipitator (ESP) ini, jumlah limbah debu yang keluar dari cerobong diharapkan hanya sekitar 0,16 % (efektifitas penangkapan debu mencapai 99,84%), ukuran partikel debu terkecil yang diperoleh <2 μC . Alat pengendali debu yang berfungsi untuk memisahkan gas dan abu sebelum gas tersebut keluar dari cerobong (stack) salah satunya adalah Electrostatic Precipitator (ESP). Sebelum gas buang tersebut keluar melalui cerobong, maka gas buang tersebut akan melewati kisi-kisi suatu sistem electrostatic precipitator (ESP).



Gambar 1 : Siklus Gas Buang PLTU
(sumber: www.flowvision-energy.com)

Dari gambar diatas dijelaskan hasil pembakaran (furnance) dari dapur boiler gas buang masuk ke mesin ESP melalui recovery boiler ke dalam mesin ESP yang kemudian partikel-partikel abu akan diproses didalam mesin ESP sehingga abu yang keluar ke cerobong akan sangat sedikit dan efisien sehingga tidak menyebabkan pencemaran udara bagi lingkungan sekitar.

Adapun faktor yang mempengaruhi penangkapan debu, yaitu:

a. Resistifitas Partikel

Resistifitas partikel, suatu ukuran resistansi partikel terhadap listrik, yang merupakan indikator kecepatan migrasi partikel. Resistifitas sangat penting dalam mempengaruhi efisiensi ESP. Satuan untuk resistifitas adalah $\Omega\cdot\text{cm}$. Adapun persamaan resistifitas partikel, yaitu:

$$\rho = \frac{A}{l} \quad (2.1)$$

Dimana:

ρ = Resistifitas ($\Omega\cdot\text{cm}$)

R = Tahanan (Ω)

A = luas penampang (cm^2)

l = Panjang penghantar (cm)

Nilai resistifitas bahan secara umum berada diantara 10⁻³ sampai 10¹⁴ $\Omega\cdot\text{cm}$, sedangkan nilai resistivitas partikel yang baik untuk ESP adalah 10⁷- 10¹⁰ $\Omega\cdot\text{cm}$.

b. Ukuran Partikel

Semakin besar ukuran partikel debu, semakin besar kemungkinan ion gas menabraknya sehingga semakin besar muatan yang dimilikinya.

c. Pengaruh Temperatur

Jika temperature naik maka kuat medan listrik akan turun dan daya penangkapan debu akan turun sehingga efisiensi ESP akan turun.

d. Pengaruh Spark

Spark dapat timbul jika lapisan debu pada permukaan *collecting electrode* terlalu tebal.

Adapun komponen mekanikal dan fungsinya adalah sebagai berikut :

- Collecting plate system berfungsi sebagai pengumpul atau collection ash, karena setelah ash atau abu yang keluar dari boiler dan masuk kedalam ESP maka abu tersebut akan terurai menjadi partikel-partikel yang akan menempel pada permukaan dinding collecting plate.
- Rapper atau rapping system ini berfungsi sebagai pemukul atau pembuat getaran yang mana setelah abu menempel pada permukaan collecting plate maka dipukul menggunakan rapping system.
- Hopper ini berfungsi sebagai penampung abu yang jatuh dari hasil pemukulan oleh rapping system.
- Hammer digunakan untuk memukul elektroda pengumpul yang tergantung agak partikel jatuh akibat getaran mekanis yang diakibatkannya.
- Casing dan Manhole ESP berfungsi sebagai pembatas atau pelindung dari mesin ESP berada pada bagian luar.
- Gas Distribution System berfungsi dan mempunyai peranan yang sangat penting yaitu untuk mendistribusikan fly ash ke seluruh field area agar terperangkap jatuh ke Hopper ESP.
- Ash Transmitter berfungsi sebagai pemindah abu hasil tangkapan ESP (Electrostatic Precipitator).

Adapun komponen elektrik dan fungsinya adalah sebagai berikut :

- Kontrol panel berfungsi untuk mengatur parameter kerja ESP berdasarkan sensor yang terpasang, seperti sensor temperatur, flow rate gas buang dan lain-lain.
- Rectifier berfungsi merubah listrik AC menjadi DC dan menghasilkan arus searah (DC) yang dialirkan pada anoda (kutub positif) dan katoda/ pelat pengumpul (kutub negatif).
- Transformer Rectifier (TR) adalah peralatan utama ESP yang berfungsi mencatu daya sehingga ESP bisa bekerja. Tegangan input: 0-380 Volt AC, Tegangan output: 20-70 kV DC.
- SCR Sebagai Pengatur Tegangan Masukan ESP.

2.3 PERHITUNGAN KINERJA ELECTROSTATIC PRECIPITATOR (ESP)

2.3.1 Pengumpulan Partikel

Pengumpulan partikel pada ESP terjadi ketika melewati gas buang (*flue gas*) melalui suatu medan listrik yang terbentuk antara *discharge electrode* dengan plat pengumpul, *flue gas* yang mengandung butiran debu pada awalnya bermuatan netral dan pada saat melewati medan listrik, partikel debu tersebut akan terionisasi sehingga partikel

debu tersebut menjadi bermuatan negatif (-). Partikel debu yang sekarang bermuatan negatif (-) kemudian menempel pada pelat-pelat pengumpul (*collector plate*), Debu yang dikumpulkan di pelat pengumpul dipindahkan kembali secara periodik dari pelat pengumpul melalui suatu getaran (*rapping*).

2.3.2 Proses Pembentukan Medan Listrik

Terdapat dua jenis elektroda, yaitu discharge electrode yang bermuatan negatif dan plat bermuatan positif. Discharge electrode diletakkan diantara plat pengumpul pada jarak tertentu. Discharge electrode diberi listrik arus searah (DC) dengan muatan minus pada level tegangan antara 55 – 75 KvDC (sumber listrik awalnya adalah 380 volt AC, kemudian dinaikkan oleh transformer menjadi sekitar 55 – 75 Kv dan dirubah menjadi listrik DC oleh rectifier, diambil hanya potensial negatifnya saja).

2.3.3 Perhitungan Luas Satu Permukaan Pelat Pengumpul

Perhitungan luas satu permukaan pelat pengumpul abu terbang dirumuskan oleh persamaan:

$$A = p \times l \times 2 \text{ (permukaan)} \quad (2.2)$$

Dimana:

A = Luas efektif collecting plate (m)²

p = Panjang pelat (m)

l = Luas pelat (m)

Sedangkan perhitungan banyak pelat pengumpul abu terbang dirumuskan oleh persamaan:

$$\text{Baris} \times \text{Kolom} \times \text{Field} \times \text{jumlah ESP} \quad (2.2.1)$$

Sehingga untuk mencari luas pelat pengumpul dirumuskan menggunakan persamaan:

$$A = \text{Luas permukaan pelat} \times \text{jumlah pelat} \quad (2.2.2)$$

2.3.4. Perhitungan Luas Spesifik Pelat Pengumpul

Perhitungan luas spesifik pelat pengumpul dirumuskan oleh persamaan :

$$SCA = \frac{\text{Jumlah luas permukaan pelat pengumpul (m)}}{\text{Kapasitas aliran gas buang (m}^3/\text{h)}} \quad (2.3)$$

2.3.5 Perhitungan Aspek Rasio (AR)

Perhitungan nilai aspek rasio dirumuskan oleh persamaan:

$$AR = \frac{\text{Panjang efektif pelat pengumpul (m)}}{\text{Tinggi efektif pelat pengumpul (m)}} \quad (2.4)$$

Untuk mencari panjang efektif pelat pengumpul menggunakan persamaan:

$$\text{jumlah susunan memanjang} \times \text{lebar pelat} \times 3 \quad (2.4.1)$$

2.3.6 Perhitungan Kecepatan Gas Buang Migrasi Partikel (ω)

Kecepatan migrasi partikel adalah kecepatan gerak partikel ketika diberi muatan negatif bergerak menuju elektroda plat pengumpul. Variable yang mempengaruhinya yaitu ukuran partikel, kuat medan listrik dan viskositas gas. sehingga

kecepatan migrasi partikel dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$\omega = \frac{2 K_0 p a E c E p}{3 \mu} \quad (2.5)$$

Dimana:

- ω = Kecepatan migrasi partikel (m/s)
- a = Jari-jari partikel/diameter partikel (m)
- p = Tekanan (1 atm)
- Ec = Kuat medan listrik (v/m)
- Ep = Kuat medan precipitator (v/m)
- Dapat dianggap bahwa $Ec = Ep = E$
- μ = Viskositas gas (pascal . detik)
- K_0 = Permittivity ($8.85 \times 10^{-12} F/m$)

Adapun persamaan lain untuk mencari kecepatan migrasi yaitu :

$$\omega = -\frac{Q}{A} + \ln(1 - \eta) \quad (2.6)$$

Dimana:

- ω = Kecepatan migrasi partikel (m/s)
- Q = Laju aliran gas (m³/s)
- A = Luas media penangkap (m²)
- η = Efisiensi ESP

2.3.7 Perhitungan Efisiensi Pengumpulan partikel ESP

Perhitungan efisiensi ESP dirumuskan menggunakan rumus Deutch- Anderson. dengan persamaan:

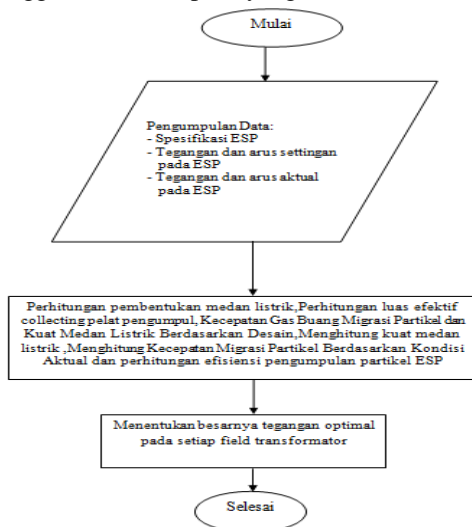
$$\eta = 1 - e^{-A Q \omega} \quad (2.7)$$

Dimana:

- η = Efisiensi ESP
- e = Bilangan natural (2.718)
- A = Luas efektif *collecting plate* dalam ESP (m²)
- Q = Laju aliran gas (m³/s)
- ω = Kecepatan migrasi 4 - 20.4 (m/s)

3. METODE PENELITIAN

Diagram alir penyelesaian penelitian ini menggunakan alir seperti yang terlihat di Gambar 2.



Gambar 2: Flowchart Observasi Perancangan Sistem Penelitian ESP

Penelitian ini diawali dengan mencari dan mempelajari literatur yang relevan dengan penelitian ini, selanjutnya peneliti melakukan

pengambilan data di PT. Lestari Banten Energy yang meliputi data yang didapat melalui proses pengamatan tegangan dan arus aktual pada ESP terhadap perubahan emisi. Adapun pengamatan dilakukan dengan cara bertahap. Hal ini dilakukan karena untuk mengukur efisiensi ESP, serta untuk mengetahui kecepatan partikel. Mengamati besar nilai tegangan dan arus setting serta nilai aktualnya. Setelah masing-masing nilai tegangan dan arus aktual didapat, peneliti juga menghitung Perhitungan pembentukan medan listrik, Perhitungan luas efektif pelat pengumpul, Perhitungan laju aliran gas, kecepatan migrasi partikel dan jarak kawat pada ESP, Perhitungan efisiensi pengumpulan partikel ESP, Menentukan besarnya tegangan pada setiap field transformator sehingga meningkatkan kinerja ESP dalam menangkap emisi. Analisa perhitungan Jumlah Emisi yang Tertangkap Setiap Field Trafo dan hubungan efisiensi terhadap tegangan. Dimana tegangan 72 kV merupakan tegangan maksimum pada transformator.

4. HASIL PEMBAHASAN

4.1 PERHITUNGAN TEGANGAN DAN ARUS PADA ESP

4.1.1 Menentukan Tegangan Optimum Terhadap Perubahan Emisi

Penentuan tegangan pada saat operasi mesin sangat berperan penting pada operasi mesin ESP untuk itu dalam menganalisa besarnya tegangan dan arus setting dan arus aktual pada mesin ESP terhadap perubahan emisi perlu diketahuinya beberapa parameter yang menjadi acuan sebelum menentukan tegangan dan arus tersebut. Dimana tegangan dan arus setting, tegangan dan arus aktual ESP, serta efisiensi tegangan pada saat emisi. Untuk itu perlu adanya perhitungan masing-masing parameter berdasarkan survey serta analisa data yang telah dilakukan pada mesin ESP sewaktu beroperasi.

4.1.2 Setting Tegangan masukan dan Arus pada ESP

Dalam pengamatan yang dilakukan dalam penelitian di mesin ESP terdapat 32 Trafo yang digunakan untuk memberikan tegangan pada mesin ESP dimana setiap Trafo yang digunakan untuk memberikan suplai tegangan yaitu 1 Trafo yaitu 1 Field ESP pada recovery boiler. Uji resistensi tegangan harus dilakukan untuk minyak transformator sekali per tahun, nilai rata-rata tegangan seting harus lebih tinggi dari 35kV. Jika tidak, minyak harus disaring atau diubah nilai resistensinya Nilai resistansi tegangan dari oli baru harus lebih tinggi dari 40kV. Sehingga untuk tegangan setting masukan 50kV sudah cukup karena posisi debu yang tidak terlalu banyak. Dan

$$= 7 \times 2.5 \times 2$$

$$= 3.5 \times 10^7 \text{ mm}^2$$

Jadi luas efektif collecting plate adalah $3.5 \times 10^7 \text{ mm}^2$.

Untuk menghitung banyaknya pelat pengumpul dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$\text{Baris} \times \text{Kolom} \times \text{Field} \times \text{jumlah ESP}$$

$$= 4 \times 4 \times 32 \times 2$$

$$= 1.024 \text{ pelat}$$

Jadi banyaknya pelat pengumpul pada ESP yaitu 1.024 pelat.

Sehingga luas pelat pengumpul adalah

$A = \text{Luas permukaan pelat} \times \text{jumlah pelat}$ Jumlah luas pelat pengumpul

$$A = (3.5 \times 10^7 \text{ mm}^2) \times 1.024$$

$$= 3.584 \times 10^{10}$$

$$= 35840 \text{ m}^2$$

Jadi luas pelat pengumpul adalah 35840 m^2 .

4.2.2 Kecepatan Gas Buang Migrasi Partikel Berdasarkan Desain

ESP dirancang untuk efisiensi $\geq 99.5\%$ maka adapun untuk menghitung kecepatan migrasi partikel nya dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (2.5), yaitu:

$$\text{Diketahui : } A = 35840 \text{ m}^2$$

$$Q = 1.085 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\text{Maka : } \omega = -\frac{Q}{A} + \ln(1 - \eta)$$

$$= -\frac{1.085}{35840} \ln(1 - 0.995)$$

$$= 5.2 \text{ m/s}$$

Jadi kecepatan gas buang migrasi partikel berdasarkan desain adalah 5.2 m/s .

4.2.3 Menghitung Luas Spesifik Pelat Pengumpul

Luas spesifik pelat pengumpul dapat dihitung menggunakan persamaan (2.3) yaitu sebagai berikut:

$$\text{SCA} = \frac{\text{Jumlah luas permukaan pelat pengumpul}(\text{m}^2)}{\text{Kapasitas aliran gas buang}(\text{m}^3/\text{h})}$$

$$= \frac{35840 \text{ m}^2}{1.085 \text{ m}^3/\text{h}}$$

$$= \frac{33.03 \text{ m}^2}{1085 (1000 \frac{\text{m}^3}{\text{h}})}$$

$$= 0.0304 \text{ m}^2 (1000 \text{ m}^3/\text{h})$$

hasil perhitungan penelitian desain.

Terjadi penurunan SCA sebesar 0.0304 m^2 per $1000 \text{ m}^3/\text{h}$ dan tidak berpengaruh pada nilai SCA karena nilai SCA untuk ESP masih dalam kategori (range) desain SCA secara umum yaitu $11 - 45 \text{ m}^2$ per $1000 \text{ m}^3/\text{h}$.

4.2.4 Menghitung Aspek Rasio

Sebelum menghitung nilai aspek rasio terlebih dahulu mencari panjang efektif permukaan pelat pengumpul menggunakan persamaan (2.4.1) yaitu:

$$\text{Jumlah susunan memanjang} \times \text{lebar plat pengumpul} \times 2$$

$$= p \times l \times 2$$

$$= 8 \times 2.5 \times 2 \text{ (permukaan)}$$

$$= 40 \text{ m}$$

Sehingga untuk menghitung nilai aspek rasio ditentukan oleh persamaan (2.4) yaitu sebagai berikut:

$$\text{AR} = \frac{\text{Panjang efektif pelat pengumpul}(\text{m})}{\text{Tinggi efektif pelat pengumpul}(\text{m})}$$

$$= \frac{40 \text{ m}}{20 \text{ m}}$$

$$= 2.0$$

Dari perhitungan Aspek Rasio-nya adalah 2.0 masih berada dalam range desain ESP.

4.2.5 Menghitung Kuat Medan Listrik Berdasarkan Desain

Adapun untuk menghitung kuat medan listrik yang dibutuhkan partikel agar partikel bisa bergerak dan menempel pada collecting plate dapat menggunakan persamaan (2.6) adalah :

$$\text{Diketahui : } \omega = 5.2 \text{ m/s}$$

$$\mu = (1.8 \times 10^{-5})$$

$$\text{KO} = (8.85 \times 10^{-12})$$

$$p_a = 0.15 \times 10^{-6}$$

Maka :

$$E^2 = \frac{1 \omega \mu}{2 \text{ KO } p_a}$$

$$E^2 = \frac{2 \times 5.2 (1.8 \times 10^{-5})}{3 \times (8.85 \times 10^{-12})(0.15 \times 10^{-6})}$$

$$E = 1.41 \times 10^{13}$$

$$E = 141 \text{ kV/m}$$

Maka besar tegangan yang dibutuhkan untuk menimbulkan kuat medan listrik dapat dihitung dengan persamaan $V = E \cdot d$

$$\text{Diketahui : } E = 141 \text{ kV/m}$$

$$d = 0.30 \text{ m}$$

maka :

$$V = 141 \times 0.30$$

$$= 42.3 \text{ KV}$$

4.2.6 Perhitungan Kuat Medan Listrik dan Kecepatan Migrasi Partikel Berdasarkan Kondisi Aktual

Besar kuat medan listrik pada electrostatic precipitator dalam keadaan aktual dapat dicari dengan persamaan dibawah ini :

Nilai kuat medan listrik saat tegangan optimum:

$$E = \frac{v}{d}$$

$$= \frac{27.15}{0.30}$$

$$= 90.5 \text{ kV/m}$$

Maka besar tegangan yang dibutuhkan untuk menimbulkan kuat medan listrik dapat dihitung dengan persamaan $V = E \cdot d$

$$\text{Diketahui : } E = 90.5 \text{ kV/m}$$

$$d = 0.30 \text{ m}$$

maka :

$$V = 90.5 \times 0.30$$

$$= 27.15 \text{ KV}$$

Sehingga kecepatan migrasi partikel berdasarkan kondisi aktual pada mesin ESP dapat diketahui dan dihitung, yaitu:

$$\begin{aligned} \text{Diketahui: } K_o &= (8.85 \times 10^{-12}) \\ P_a &= 0.15 \times 10^{-6} \\ E_c &= 90.5 \text{ kV/m} \\ E_p &= 90.5 \text{ kV/m} \\ \mu &= (1.8 \times 10^{-5}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Maka:} \\ \omega &= \frac{2 K_o P_a E_c E_p}{3 \mu} \\ &= \frac{2 \times (8.85 \times 10^{-12}) (0.15 \times 10^{-6}) (90.5) (90.5)}{3 \times (1.8 \times 10^{-5})} \\ &= \frac{2.174511375 \times 10^{-14}}{5.4 \times 10^{-5}} \\ &= 4.0268729 \times 10^{-20} \\ &= 4 \text{ m/s} \end{aligned}$$

Kecepatan migrasi partikel berdasarkan kondisi kondisi aktual adalah 4 m/s. Terjadi penurunan kecepatan migrasi partikel pada desain dan aktual yaitu pada nilai kecepatan migrasi pada desain bernilai 5.2 m/s dan pada aktualnya bernilai 4 m/s terjadi penurunan sebesar 1.2 m/s, dimana efisiensi berdasarkan kondisi aktual setelah dilakukan perhitungan sebesar 98.71%. terjadi penurunan efisiensi hal tersebut bisa disebabkan karena beberapa faktor diantaranya kerusakan pada komponen *electrostatic precipitator* yaitu *coating* atau penumpukan debu pada komponen DE maupun CE dan *emiting wire* yang putus sehingga medan listrik mengalami pengurangan.

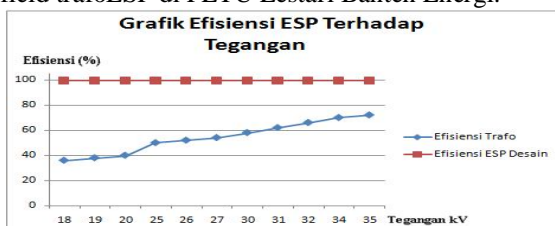
4.2.7 Efisiensi Pengumpulan Partikel ESP (*Electrostatic Precipitator*)

Efisiensi pengumpulan partikel dapat dihitung menggunakan persamaan (2.7) yaitu:

$$\begin{aligned} \text{Dimana: } e &= 2.718 \\ A &= 35840 \text{ m}^2 \\ Q &= 1.085 \text{ m}^3/\text{s} \\ w &= 5.2 \text{ m/s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \eta &= 1 - e^{-A/Qw} \\ &= 1 - 2.718^{-35840/1.085 \times 5.2} \\ &= 1 - 2.718^{-3.0414 \times 5.2} \\ &= 1 - 2.718^{-15.81528} \\ &= 0.9999 \\ &= 99.99\% \end{aligned}$$

Maka dibuat dalam bentuk grafik untuk membandingkan nilai efisiensi berdasarkan efisiensi ESP dan tegangan aktual setting setiap field trafo ESP di PLTU Lestari Banten Energi.



Gambar 3 : Grafik Efisiensi ESP Terhadap Tegangan PLTU LBE

4.1 PENENTUAN BESARNYA TEGANGAN YANG OPTIMUM TERHADAP EMISI ESP

4.3.1 Penentuan Setting Tegangan dan Arus Optimum ESP

Setelah melakukan observasi dan penelitian tegangan *setting* dan arus *setting* yang sudah ada yaitu untuk tegangan yaitu 50KV dan arus 1000mA. Dalam setting tegangan masih dapat dinaikan dan diturunkan disini penulis melakukan beberapa variasi simulasi untuk menentukan tegangan paling optimal dalam *setting* tegangan masukan dan setting tegangan aktual dan arus aktual ESP. Dimana *setting* tegangan masukan yaitu 40KV, 60KV, dan 72KV.

4.3.2 Penentuan Tegangan dan Arus Aktual Optimum ESP

Berdasarkan observasi yang telah dilakukan pada saat penelitian. Penentuan nilai tegangan dan arus aktual dalam sistem operasi mesin ESP diatas masih belum bisa dikatakan optimal, karena tegangan aktual dalam *setting* di PLTU Lestari Banten Energy belum pada kondisi optimum. Sehingga untuk *setting* tegangan dan arus masih dapat dinaikan lagi kebatas optimum.

4.3.2.1 Setting Tegangan 40KV

Disini penulis melakukan simulasi tegangan *setting* tegangan 40KV dan setting tegangan dan arus aktual pada masing-masing field dari 32 trafo dapat dilihat dari tabel dibawah ini:

Tabel 4.7 Simulasi Tegangan dan Arus Aktual Optimum ESP dan Pengaruh Terhadap Resistifitas Partikel

Batas Trafo ESP	Field no ESP	Tegangan (kV)	Arus (mA)	Resistifitas Partikel
1	111	38	174	0.76437 × 10 ⁴
	112	38	133	0.781 × 10 ⁴
	113	21	99	0.74242 × 10 ⁴
	114	36	99	1.27573 × 10 ⁴
2	121	38	174	0.76437 × 10 ⁴
	122	34	100	0.805 × 10 ⁴
	124	35	99	1.23737 × 10 ⁴
	131	40	174	0.8046 × 10 ⁴
3	132	35	135	0.98 × 10 ⁴
	133	22	99	0.7778 × 10 ⁴
	134	33	99	1.16667 × 10 ⁴
	141	36	174	0.75214 × 10 ⁴
4	142	28	124	0.79032 × 10 ⁴
	143	21	100	0.75 × 10 ⁴
	144	34	99	1.20202 × 10 ⁴
	211	36	175	0.78 × 10 ⁴
5	212	36	133	0.78 × 10 ⁴
	213	22	99	0.7778 × 10 ⁴
	214	26	99	1.17778 × 10 ⁴
	221	38	174	0.76462 × 10 ⁴
6	222	28	124	0.79032 × 10 ⁴
	223	22	100	0.77 × 10 ⁴
	224	34	99	1.20202 × 10 ⁴
	231	37	174	0.74425 × 10 ⁴
7	232	27	134	0.7621 × 10 ⁴
	233	22	99	0.7778 × 10 ⁴
	234	30	99	1.06661 × 10 ⁴
	241	36	174	0.75214 × 10 ⁴
8	242	28	124	0.79032 × 10 ⁴
	243	22	100	0.805 × 10 ⁴
	244	32	99	0.888 × 10 ⁴
	RATA RATA		30.281	124.281

Nilai kuat medan listrik saat tegangan optimum:

$$\begin{aligned} E &= \frac{V}{d} \\ &= \frac{30.281}{0.30} \\ &= 100.93 \text{ kV/m} \end{aligned}$$

Maka besar tegangan yang dibutuhkan untuk menimbulkan kuat medan listrik dapat dihitung dengan persamaan $V = E \cdot d$

$$\begin{aligned} \text{Diketahui: } E &= 100.93 \text{ kV/m} \\ d &= 0.30 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{maka:} \\ V &= 100.93 \times 0.30 \\ &= 30.281 \text{ KV} \end{aligned}$$

Sehingga kecepatan migrasi partikel berdasarkan kondisi aktual pada mesin ESP dapat diketahui dan dihitung, yaitu:

Diketahui: $K_0 = (8.85 \times 10^{-12})$
 $P_a = 0.15 \times 10^{-6}$
 $E_c = 100.93 \text{ kV/m}$
 $E_p = 100.93 \text{ kV/m}$
 $\mu = (1.8 \times 10^{-5})$

Maka :

$$\omega = \frac{2 K_0 P_a E_c E_p}{3 \mu}$$

$$= \frac{2 \times (8.85 \times 10^{-12})(0.15 \times 10^{-6})(100.93)(100.93)}{3 \times (1.8 \times 10^{-5})}$$

$$= \frac{2.704612631 \times 10^{-14}}{5.4 \times 10^{-5}}$$

$$= 5.008541909 \times 10^{-20}$$

$$= 5 \text{ m/s}$$

Sehingga efisiensi pengumpulan partikel:

$$\eta = 1 - e^{-A/Q_{xW}}$$

$$= 1 - 2.718^{-3.5/1.085 \times 5}$$

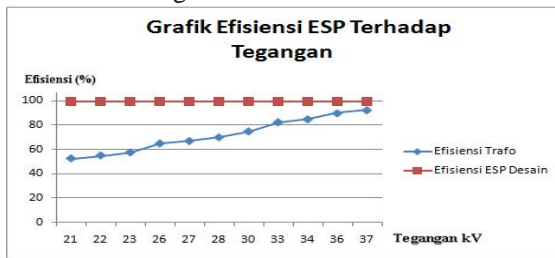
$$= 1 - 2.718^{-3.225806452 \times 5}$$

$$= 1 - 2.718^{-0.198685109}$$

$$= 0.8198$$

$$= 81.98\%$$

Jika dilihat dari grafik maka:



Gambar 4 : Grafik Efisiensi ESP Terhadap Tegangan Simulasi

4.3.2.2 Setting Tegangan 60KV

Disini juga melakukan simulasi tegangan dan arus beserta asumsi apabila terjadi gangguan pada beberapa trafo dan bagaimana cara meminimalisir agar tegangan tetap pada kondisi optimal,

Tabel 4.8 Simulasi Tegangan dan Arus Aktual Optimum ESP dan Pengaruh Terhadap Resistifitas Partikel

Batas Trafo ESP	Field no ESP	Tegangan (kV)	Arus (mA)	Resistifitas Partikel (Ω.m) Emisi Optimum
1	111	49	257	0.667315175 × 10 ⁶
	112	44	215	0.71627907 × 10 ⁶
	113	40	170	0.823529412 × 10 ⁶
	114	39	165	0.827272727 × 10 ⁶
2	122	44	215	0.71627907 × 10 ⁶
	123	41	170	0.844117647 × 10 ⁶
	124	40	170	0.823529412 × 10 ⁶
	121	40	170	0.823529412 × 10 ⁶
3	132	43	190	0.792105263 × 10 ⁶
	133	39	165	0.827272727 × 10 ⁶
	134	40	166	0.843373494 × 10 ⁶
	141	49	257	0.667315175 × 10 ⁶
4	142	49	190	0.792105263 × 10 ⁶
	143	40	170	0.823529412 × 10 ⁶
	144	39	165	0.827272727 × 10 ⁶
	211	50	280	0.625 × 10 ⁶
5	212	45	215	0.7225814 × 10 ⁶
	213	39	165	0.827272727 × 10 ⁶
	214	40	170	0.823529412 × 10 ⁶
	221	49	257	0.667315175 × 10 ⁶
6	222	44	215	0.71627907 × 10 ⁶
	223	41	170	0.844117647 × 10 ⁶
	224	40	170	0.823529412 × 10 ⁶
	231	50	280	0.625 × 10 ⁶
7	232	45	215	0.7225814 × 10 ⁶
	233	39	165	0.827272727 × 10 ⁶
	234	40	166	0.843373494 × 10 ⁶
	241	50	280	0.625 × 10 ⁶
8	242	45	215	0.7225814 × 10 ⁶
	243	39	165	0.827272727 × 10 ⁶
	244	40	166	0.843373494 × 10 ⁶
	RATA-RATA		42.8889	202.28

Nilai kuat medan listrik saat tegangan optimum:

$$E = \frac{V}{d}$$

$$= \frac{42.8889(\text{rata - rata setelah gangguan})}{0.30}$$

$$= 142.9 \text{ kV/m}$$

Maka besar tegangan yang dibutuhkan untuk menimbulkan kuat medan listrik dapat dihitung dengan persamaan $V = E \cdot d$

Diketahui : $E = 142.9 \text{ kV/m}$
 $d = 0.30 \text{ m}$

maka :

$$V = 142.9 \times 0.30$$

$$= 42.87 \text{ KV}$$

Sehingga kecepatan migrasi partikel berdasarkan kondisi aktual pada mesin ESP dapat diketahui dan dihitung, yaitu:

Diketahui: $K_0 = (8.85 \times 10^{-12})$
 $P_a = 0.15 \times 10^{-6}$
 $E_c = 142.9 \text{ kV/m}$
 $E_p = 142.9 \text{ kV/m}$
 $\mu = (1.8 \times 10^{-5})$

Maka :

$$\omega = \frac{2 K_0 P_a E_c E_p}{3 \mu}$$

$$= \frac{2 \times (8.85 \times 10^{-12})(0.15 \times 10^{-6})(142.9)(142.9)}{3 \times (1.8 \times 10^{-5})}$$

$$= \frac{5.21618855 \times 10^{-14}}{5.4 \times 10^{-5}}$$

$$= 9.65608426 \times 10^{-20}$$

$$= 9.6 \text{ m/s}$$

Sedangkan untuk efisiensi pengumpulan partikel:

$$\eta = 1 - e^{-A/Q_{xW}}$$

$$= 1 - 2.718^{-3.5/1.085 \times 9.6}$$

$$= 1 - 2.718^{-3.225806452 \times 9.6}$$

$$= 1 - 2.718^{-0.030967741}$$

$$= 0.9695$$

$$= 96.95\%$$

Efisiensi tegangan rata-rata sebelum terjadi gangguan:

$$\text{Eff} = \frac{V_{\text{aktual}}}{V_{\text{setting}}} \times 100\%$$

$$= \frac{43.3125 \text{ kV}}{60 \text{ kV}} \times 100\%$$

$$= 72.18\%$$

Karena beberapa field trafo mengalami gangguan sehingga tidak mampu mensuplai tegangan sehingga efisiensi tegangan rata-rata pada saat kondisi terjadi gangguan yaitu:

$$\text{Eff} = \frac{V_{\text{aktual}}}{V_{\text{setting}}} \times 100\%$$

$$= \frac{42.8889 \text{ kV}}{60 \text{ kV}} \times 100\%$$

$$= 71.48\%$$

Dari perhitungan diatas terjadi penurunan efisiensi presentase jatuh tegangan rata-rata:

$$\text{Presentase besar jatuh tegangan}$$

$$= \frac{0.4236}{43.3125} \times 100\%$$

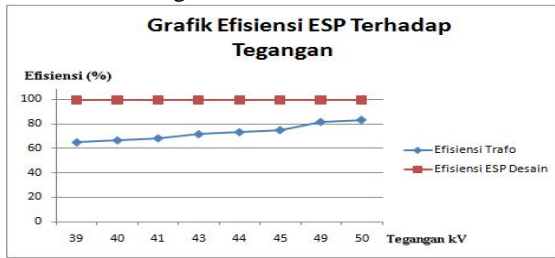
$$= 0.998787879\%$$

Tabel 4.9 Field Trafo yang terjadi Gangguan

Field Trafo no	Tegangan kV
1	45
2	45
3	45
4	45

Dari tabel diatas dijelaskan field trafo yang mengalami gangguan dan dari jumlah field trafo yang mengalami gangguan didapatkan total tegangan yang terbuang dari 5 deret garda trafo yaitu sebesar 5.07kV. untuk meminimalkan kerugian tegangan yang terjadi pada trafo dapat dilakukan dengan cara memperbesar tegangan aktual pada trafo yang tidak mengalami gangguan

Jika dilihat dari grafik maka:



Gambar 5 : Grafik Efisiensi ESP Terhadap Tegangan Simulasi

4.3.2.3 Setting Tegangan 72KV

Disini penulis melakukan simulasi tegangan setting tegangan 72KV dan setting tegangan dan arus aktual pada masing-masing field dari 32 trafo dapat dilihat dari tabel di bawah ini:

Tabel 4.8 Simulasi Tegangan dan Arus Aktual Optimum ESP dan Pengaruh Terhadap Resistifitas Partikel

Baris Trafo ESP	Field no ESP	Tegangan (kV)	Arus (mA)	Resistifitas Partikel
1	111	39	299	0.69064 × 10 ⁻¹⁰
	112	48	288	0.58333 × 10 ⁻¹⁰
	113	34	263	0.45547 × 10 ⁻¹⁰
	114	36	263	0.49909 × 10 ⁻¹⁰
2	121	59	299	0.69064 × 10 ⁻¹⁰
	122	48	288	0.58333 × 10 ⁻¹⁰
	123	35	237	0.51688 × 10 ⁻¹⁰
	124	39	263	0.51901 × 10 ⁻¹⁰
3	131	59	299	0.69064 × 10 ⁻¹⁰
	132	49	266	0.59965 × 10 ⁻¹⁰
	133	34	263	0.45547 × 10 ⁻¹⁰
	134	36	263	0.49909 × 10 ⁻¹⁰
4	141	59	299	0.69064 × 10 ⁻¹⁰
	142	48	288	0.58333 × 10 ⁻¹⁰
	143	37	263	0.49945 × 10 ⁻¹⁰
	144	39	264	0.51705 × 10 ⁻¹⁰
5	211	60	300	0.7 × 10 ⁻¹⁰
	212	49	288	0.59549 × 10 ⁻¹⁰
	213	35	263	0.46578 × 10 ⁻¹⁰
	214	37	237	0.54641 × 10 ⁻¹⁰
6	221	59	299	0.69064 × 10 ⁻¹⁰
	222	48	288	0.58333 × 10 ⁻¹⁰
	223	34	263	0.45547 × 10 ⁻¹⁰
	224	35	264	0.46402 × 10 ⁻¹⁰
7	311	60	300	0.7 × 10 ⁻¹⁰
	312	49	288	0.59549 × 10 ⁻¹⁰
	313	35	263	0.46578 × 10 ⁻¹⁰
	314	37	237	0.49945 × 10 ⁻¹⁰
8	241	59	299	0.69064 × 10 ⁻¹⁰
	242	48	288	0.58333 × 10 ⁻¹⁰
	243	37	265	0.48868 × 10 ⁻¹⁰
	244	39	267	0.51124 × 10 ⁻¹⁰
RATA-RATA		48	276.781	

Besar kuat medan listrik pada electrostatic precipitator dalam keadaan aktual dapat dicari dengan persamaan dibawah ini :

Nilai kuat medan listrik saat tegangan optimum:

$$E = \frac{v}{d} = \frac{45}{0.30} = 150 \text{ kV/m}$$

Maka besar tegangan yang dibutuhkan untuk menimbulkan kuat medan listrik dapat dihitung dengan persamaan $V = E \cdot d$

Diketahui : $E = 150 \text{ kV/m}$
 $d = 0.30 \text{ m}$

maka :

$$V = 150 \times 0.30 = 45 \text{KV}$$

Sehingga kecepatan migrasi partikel berdasarkan kondisi aktual pada mesin ESP dapat diketahui dan dihitung, yaitu:

Diketahui: $Ko = (8.85 \times 10^{-12})$
 $Pa = 0.15 \times 10^{-6}$
 $Ec = 150 \text{ kV/m}$
 $Ep = 150 \text{ kV/m}$
 $\mu = (1.8 \times 10^{-5})$

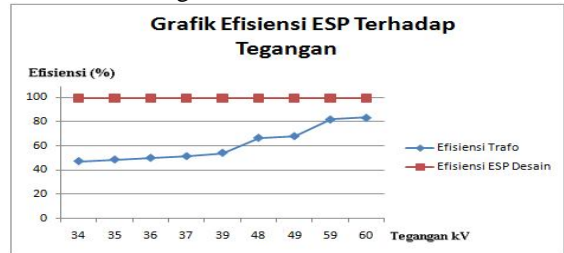
Maka :

$$\omega = \frac{2 K0paEcEp}{3\mu} = \frac{2 \times (8.85 \times 10^{-12})(0.15 \times 10^{-6})(150)(150)}{3 \times (1.8 \times 10^{-5})} = \frac{5.97375 \times 10^{-14}}{5.4 \times 10^{-5}} = 110625 \times 10^{-19} = 11 \text{ m/s}$$

Sehingga efisiensi pengumpulan partikel:

$$\eta = 1 - e^{-A/QxW} = 1 - 2.718^{-3.5/1.085 \times 11} = 1 - 2.718^{-3.225806452 \times 11} = 1 - 2.718^{-0.043710723} = 0.9572 = 95.72\%$$

Jika dilihat dari grafik maka:



Gambar 6 : Grafik Efisiensi ESP Terhadap Tegangan Simulasi

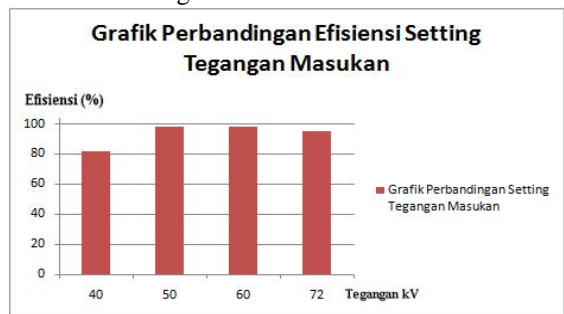
4.3.2.4 Perbandingan Efisiensi Berdasarkan Setting Tegangan

Setelah melakukan beberapa farisai simulasi berdasarkan setting tegangandiperoleh efisiensi dari masing-masing setting tegangan dari tegangan setting 40KV, 50KV, 60KV, dan 72KV.

Tabel 4.9 Perbandingan Efisiensi Berdasarkan Setting Tegangan

No.	Tegangan Setting (KV)	Efisiensi (%)
1	40	81.98
2	50 (Setting Perusahaan)	98.71
3	60	98.23
4	72	95.72

Jika dilihat dari grafik maka:



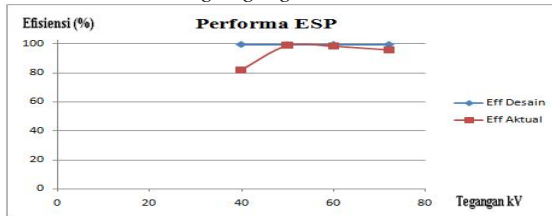
Gambar 7 : Grafik Perbandingan Efisiensi Setting Tegangan Masukan

Dari grafik di atas dijelaskan untuk setting tegangandengan efisiensi tertinggi yaitu pada

setting tegangan masukan 50KV sesuai setting perusahaan Lestari Banten Energy dengan efisiensi 98.71%.

Jika dilihat dari grafik performa kinerja ESP berdasarkan setting tegangan masukan maka:

Tabel 4.10 Grafik Performa Kinerja ESP Berdasarkan Setting Tegangan Masukan



Dari grafik di atas dijelaskan performa kinerja dari ESP berdasarkan setting tegangan masukan yaitu 40 KV, 50 KV, 60 KV, dan 72 KV. Dimana hasil kinerja setting tegangan 40 KV di dapatkan efisiensi 81.98%, setting tegangan masukan 50 KV di dapatkan efisiensi 98.71%, setting tegangan 60 KV di dapatkan efisiensi 98.23%, dan untuk setting tegangan 72 KV di dapatkan efisiensi 95.72%. Sedangkan efisiensi esp desain yaitu 99.99%.

5. PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian serta analisis, dapat diambil kesimpulan yaitu

1. Setting tegangan sebesar 50kV DC di PT. Lestari Banten Energy efisiensi penangkapan gas buang oleh pelat pengumpul, yang mana setelah dilakukan perhitungan, kecepatan migrasi partikel berdasarkan desain 5.2 m/s, sedangkan kecepatan migrasi partikel berdasarkan kondisi aktual 4 m/s, terjadi penurunan kecepatan migrasi partikel, sehingga mempengaruhi penangkapan gas buang oleh pelat pengumpul sehingga berpengaruh pada penurunan efisiensi pengumpulan partikel ESP.
2. Efisiensi dari hasil kinerja Electrostatic Precipitator (ESP) di PT. Lestari Banten Energy yang mana efisiensi berdasarkan desain sebesar 99.99% dan berdasarkan aktual 98.71%.
3. Setelah mendapatkan hasil setting trafo tegangan DC di PLTU Lestari Banten Energy, kemudian dilakukan simulasi tegangan dan arus aktual untuk penentuan tegangan optimum ESP, yang mana setting tegangan masukan 40 kV DC, 60kV DC, dan 70 kV DC didapatkan efisiensi setting tegangan 40 kV DC yaitu 81.98%, setting tegangan 60 kV DC yaitu sebelum gangguan sebesar 98.23% dan setelah gangguan 96.95% terjadi penurunan efisiensi pada kinerja ESP yang disebabkan karena beberapa field trafo mengalami gangguan sehingga tidak dapat mensuplai

tegangan. Dan untuk setting tegangan 72 kV DC yaitu 95.72%.

5.2. Saran

Beberapa saran yang penulis ingin sampaikan setelah melaksanakan Penelitian Tugas Akhir ini antara lain:

1. Dalam pengerjaan laporan tugas akhir ini penulis yang hanya berfokus pada efisiensi ESP berdasarkan besarnya tegangan DC yang dihasilkan, sehingga untuk peneliti selanjutnya yang akan mengambil judul laporan tugas akhir ini sebaiknya lebih mengembangkan lagi untuk meningkatkan efisiensi dengan memfariasikan lebar jarak antar pelat pengumpul atau memperbesar pelat pengumpul yang akan berpengaruh pada resitifitas penangkapan partikel pada dinding pelat pengumpul, sehingga kinerja ESP akan menjadi lebih optimal.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Afrian, N. dan Ervianto, E., (2015), *Analisa Kinerja Electrostatic Precipitator (Esp) Berdasarkan Besarnya Tegangan Dc Yang Digunakan Terhadap Pulp and Paper*, 2(2), 1–12.
- [2] Muttaqim, L.M., Trimulyono, A., Hadi, E.S., (2015), *Pengendalian Partikulat Debu Gas Buang Main Engine Kapal Latih Bimasakti*, Jurnal Teknik Perkapalan, 3(1).
- [3] Sepfitrah dan Rizal, Y., (2015), *Analisis Electrostatic Precipitator (ESP) Untuk Penurunan Emisi Gas Buang Pada Recovery Boiler*, Jurnal Aptek, 7(1), 53–64.
- [4] Rizal, T.R., (2017), *Prototipe Pengikat Abu Terbang Skala Kecil Dengan Prinsip Electrostatic*, Skripsi, S.T., Teknik Elektro, Universitas Islam Indonesia.
- [5] Aprilianto, T.F., (2018), *Analisis Performa Electrostatic Precipitator Sebagai Pengendali Fly Ash Dan Pemanfatan Limbah B3 Pada Boiler Di Pltu Suralaya*, Skripsi, S.T., Teknik Elektro, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta.
- [6] Fadhil, K.F. dan Anaam, A.H., (2017), *Collection Efficiency of Wire-Duct Electrostatic Precipitator*, Beau Bassin, OmniScriptum Publishing Group.
- [7] Margono, S. dan Supriono., (2013), *Pengaruh Kegagalan Collecting Plate System Electrostatic Precipitator Dengan Kenaikan Emisi Pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap*, Jurnal Ilmiah Teknologi Industri, XII(2).
- [8] Yuliani, T.L., (2013), *Pemanfaatan Limbah Abu Terbang (Fly Ash) Batubara Sebagai Adsorben Untuk Penentuan Kadar Gas No2 Di Udara*, Skripsi, MIPA., Kimia, Universitas Jember.