

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Dalam penelitian yang berjudul “Analisa Kinerja *Electrostatic precipitator*(ESP) Berdasarkan besarnya tegangan DC yang digunakan terhadap perubahan emisi di power Boiler Industri Pulp and Paper Menyatakan bahwa semakin besar emisi yang masuk ke WESP maka tegangannya juga semakin besar, yaitu tegangan maksimum aktual sebesar 70 kV dan tegangan maksimum emisi yang masuk (135 mg/nm^3), serta efisiensi WESP juga dipengaruhi oleh tegangan yang dihasilkan, semakin besar tegangan yang dihasilkan maka efisiensi akan semakin meningkat. [2]

Penelitian tentang Performa cyclone dan *Electrostatic precipitator* sebagai penangkap debu pada pabrik semen. Menyatakan bahwa Cyclone dan electrostatic precipitator (EP) adalah contoh alat yang dapat mengurangi pencemaran udara di industri semen. Hasil evaluasi menunjukkan efisiensi cyclone sebesar 95,5% dan EP sebesar 98,72%. Kedua nilai efisiensi ini masih memenuhi standar efisiensi alat, yang berarti kinerja cyclone dan EP tersebut masih baik. yang juga telah memenuhi standar yaitu 95% . [4]

Penelitian tentang Analisa Kinerja Electrostatic precipitator (Electrostatic Precipitator) Berdasarkan Hasil Perubahan Emisi Pada Power Boiler Pembangkit Listrik Tenaga Uap (Studi Kasus di PLTU Lestari Banten Energy). Menyatakan bahwa Mengetahui efisiensi dari setting tegangan DC pada unit trafo WESP dan efisiensi dari mesin WESP, yang mana untuk efisiensi setting tegangan 50kV DC pada unit trafo sebesar 98.71% dan efisiensi WESP 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 WESP, 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 WESP yang disebabkan karena beberapa field trafo mengalami gangguan sehingga tidak dapat mensuplai tegangan. Dan untuk setting tegangan 72 kV DC yaitu 95.72%. Hasil penelitian tentang Collection enhancement mechanism and test of side-flow electrostatic precipitation. Aerosol and Air Quality Research, 20(4), 844–851. Menyebutkan bahwa bahwa konsentrasi emisi dan masuknya kembali debu adalah 45% dan 42% lebih rendah, masing-

masing, untuk WESP aliran samping dibandingkan WESP konvensional pada laju aliran gas yang sama. [8]

Berdasarkan pemaparan beberapa penelitian terdahulu di atas, sebagian besar analisis performa *Electrostatic Precipitator* (ESP) dilakukan pada kondisi unit yang sudah beroperasi secara matang (*steady state*) dengan efisiensi yang sudah stabil di atas 95%. Perbedaan sekaligus keterbaruan (*novelty*) dalam penelitian ini terletak pada lokus analisis yang berfokus pada performa *Wet Electrostatic Precipitator* (WESP) yang berada pada **tahap awal pengujian (*commissioning phase*)** di industri peleburan konsentrat tembaga. Penelitian ini tidak hanya mengukur parameter kelistrikan standar, melainkan menganalisa secara kuantitatif faktor-faktor yang menyebabkan terjadinya *gap* penurunan efisiensi aktual yang ekstrem (mencapai $\pm 35\%$) dibandingkan efisiensi desain (99,52%) akibat proses *fine-tuning* sistem elektrostatik yang belum selesai.

2.2 Dasar Teori

2.2.1 *Wet electrostatic precipitator*

Electrostatic precipitator (WESP) adalah salah satu alternatif penangkap debu dengan efisiensi tinggi (mencapai diatas 90%) dan rentang partikel yang didapat cukup besar. Dengan menggunakan electrostatic precipitator (WESP) 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 $< 2 \mu\text{C}$. Alat pengendali debu yang berfungsi untuk memisahkan gas dan abu sebelum gas tersebut keluar dari cerobong (stack) salah satunya adalah Electrostatic precipitator (WESP). Sebelum gas buang tersebut keluar melalui cerobong, maka gas buang tersebut akan melewati kisi-kisi suatu sistem electrostatic precipitator (WESP). Electrostatic precipitator sangat efektif dalam mengurangi polusi partikel, termasuk partikel yang ukurannya berdiameter 1 mikron (0,00004 inci), dan beberapa presipitator dapat menghilangkan partikel berdiameter 0,01 mikron. Selain itu, Electrostatic precipitator dapat menangani volume besar gas di berbagai suhu dan laju aliran, menghilangkan partikel padat atau tetesan cair. Electrostatic precipitator tersedia dalam berbagai ukuran dan jenis, dirancang untuk berbagai jenis karakteristik debu dan tetesan air serta aliran volume gas. Beberapa jenis dirancang untuk berfungsi dengan aliran gas dengan karakteristik suhu dan kelembaban tertentu. Perkembangan industri yang semakin pesat menyebabkan tuntutan, terhadap pengelolaan lingkungan yang lebih serius. Kemajuan dunia industri harus memberikan dampak sekecil mungkin terhadap

lingkungan [10]. Terdapat faktor–faktor yang mempengaruhi kinerja Electrostatic precipitator dalam sistem pengendapan debu gas buang adalah sebagai berikut :

Laju alir gas masuk; Laju alir berpengaruh terhadap efisiensi kerja alat tersebut. Jika laju alir gas masuk terlalu tinggi maka collecting plate akan mengalami kesulitan dalam penangkapan partikel debu. Kadar air gas masuk Electrostatic Precipitator harus diperhatikan. Kandungan air cukup tinggi akan mengakibatkan penumpukan material karena menempel pada plate baffle. Kadar air sangat erat hubungannya dengan suhu dan tekanan, sehingga perlu diperhatikan berapa kadar air untuk suhu dan tekanan tertentu agar tidak terjadi akumulasi material pada inlet Electrostatic Precipitator.

Suhu dan tekanan operasi dari gas harus dibatasi tidak boleh terlalu rendah atau terlalu tinggi. Suhu yang tinggi akan menyebabkan viscositas gas turun sehingga mobilitasnya menjadi tinggi, sehingga efisiensi akan turun. Sebaliknya suhu harus dijaga tidak boleh turun sampai titik embun air karena dapat mengakibatkan coating material, korosi, dan flash over pada line tegangan tinggi. Suhu yang tinggi juga dapat mengakibatkan deformasi collecting plate sehingga menurunkan kinerja Electrostatic Precipitator. Untuk kondisi tekanan atmosferis, suhu dijaga antara 100 – 120 oC, dimana kondisi paling baik dicapai pada suhu 110 oC. Apabila tekanan gas bertambah maka efisiensi akan bertambah, karena dapat mengurangi mobilitas ion sehingga proses pemisahan material dapat lebih baik.

Jarak antar elektroda juga sangat berpengaruh terhadap efisiensi Electrostatic Precipitator. Jarak yang terlalu jauh akan menurunkan efisiensi, sedangkan jarak yang terlalu dekat bisa menimbulkan spark yang tinggi dan berakibat pada deformasi collecting plate. Tegangan dan arus yang diberikan akan mempengaruhi kuat medan elektrostatis dalam separating area. Apabila tegangan rendah maka kuat medan elektrostatis (E) juga akan turun dan akibatnya lebih banyak debu yang akan lewat begitu saja, tidak bisa tertangkap oleh collecting electrode. Tegangan kerja yang baik adalah antara 40 sampai 100 kV dan arus 5 sampai 2000 mA. Luas bidang penangkapan/pengendapan sangat berpengaruh terhadap efisiensi [11].

2.2.2 Tahapan Commissioning Wet Electrostatic Precipitator (WESP)

Commissioning merupakan tahapan penting sebelum suatu sistem dinyatakan siap beroperasi secara normal. Pada tahap ini dilakukan serangkaian pengujian untuk memastikan seluruh peralatan bekerja sesuai spesifikasi desain yang telah ditetapkan. Tujuan

commissioning adalah memverifikasi fungsi mekanis, elektris, instrumentasi, dan performa sistem sebelum memasuki kondisi operasi normal (steady state). Tahapan commissioning WESP secara umum meliputi:

1. Mechanical Completion, yaitu tahap pemeriksaan dan penyelesaian seluruh instalasi mekanis peralatan.
2. Pre-Commissioning, yaitu pemeriksaan fungsi komponen, sistem kontrol, sistem proteksi, serta instrumentasi.
3. Energizing, yaitu proses pemberian tegangan awal pada sistem untuk memastikan seluruh komponen kelistrikan berfungsi dengan baik.
4. Functional Test, yaitu pengujian fungsi operasi peralatan sesuai desain.
5. Performance Test, yaitu pengujian performa sistem berdasarkan parameter desain yang telah ditentukan.
6. Steady State Operation, yaitu kondisi ketika seluruh parameter operasi telah stabil dan sistem beroperasi secara normal.

Tahapan commissioning umumnya dibagi menjadi beberapa fase penting:

1. Fase Pre-Commissioning (Kondisi Dingin / Cold Commissioning): Pengujian komponen listrik secara parsial tanpa adanya aliran gas buang (no load test). Pada tahap ini, transformator pengubah daya diuji kemampuannya dalam menyuplai tegangan AC ke rectifier hingga menghasilkan keluaran tegangan tinggi searah (DC) sesuai batas setting desain.
2. Fase Hot Commissioning (Kondisi Aktual Berbeban): Pengujian unit dengan dialiri gas buang hasil pembakaran secara nyata. Pada fase inilah karakterisasi riil dari partikulat fly ash, kelembapan gas buang, dan temperatur diuji secara simultan.

Kinerja penangkapan abu pada WESP sepanjang tahap commissioning sangat fluktuatif dan umumnya belum mampu menyamai efisiensi desain ideal (di atas 99%). Hal ini disebabkan karena sistem Automatic Voltage Control (AVC) pada unit rectifier masih berada dalam tahap penyesuaian (tuning process) untuk mencari titik operasi tegangan optimum. Suplai tegangan dan arus aktual sengaja dibatasi jauh di bawah rating maksimum desain untuk menghindari risiko terjadinya loncatan bunga api listrik (sparking) yang ekstrem atau pemburukan deformasi mekanis akibat belum stabilnya jarak antar-elektroda (d) di dalam lapangan. Berdasarkan Persamaan Deutsch-Anderson, rendahnya pasokan tegangan aktual selama masa commissioning ini berdampak langsung pada penurunan kuat medan

listrik elektrostatik (E), yang kemudian memperlambat kecepatan migrasi partikel (ω) menuju pelat pengumpul dan berujung pada rendahnya nilai efisiensi penangkapan aktual.

Pada penelitian ini, pengambilan data dilakukan pada tahap commissioning sehingga performa aktual WESP belum sepenuhnya mencerminkan kondisi operasi normal (steady state). Oleh karena itu, terdapat kemungkinan terjadinya perbedaan antara efisiensi aktual dan efisiensi desain.

2.2.3 Resistivitas Partikel Penangkapan Debu

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

$$\rho = R \frac{A}{l} \quad (1)$$

Dimana:

ρ : resistivitas listrik partikel atau material ($\Omega \cdot \text{cm}$)

R : tahanan listrik (Ω)

A : luas penampang lintasan arus (cm^2)

l : panjang lintasan arus (cm)

Nilai resistivitas bahan secara umum berada diantara 10–3 sampai 1014 $\Omega \cdot \text{cm}$, sedangkan nilai resistivitas partikel yang baik untuk WESP adalah 107- 1010 $\Omega \cdot \text{cm}$. [2]

Ukuran Partikel Semakin besar ukuran partikel debu, semakin besar kemungkinan ion gas menabraknya sehingga semakin besar muatan yang dimilikinya. Pengaruh temperature, Jika temperature naik maka kuat medan listrik akan turun dan daya penangkapan debu akan turun sehingga efisiensi WESP akan turun. Pengaruh Spark, Spark dapat timbul jika lapisan debu pada permukaan collecting electrode terlalu tebal.

2.2.4 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.

2.2.5 Pengaruh Spark

Luas permukaan collecting plate merupakan salah satu parameter penting yang memengaruhi kinerja Wet Electrostatic Precipitator (WESP). Luas permukaan ini menentukan area efektif yang tersedia untuk menangkap partikel bermuatan dari aliran gas buang. Pada sistem WESP, kedua sisi pelat pengumpul berperan aktif dalam proses penangkapan partikel, sehingga luas permukaan efektif dihitung dengan mengalikan luas geometris pelat dengan faktor dua. Spark terjadi ketika ada penebalan tumpukan fly ash yang tertangkap oleh collecting plate tidak terbuang dan terus menempel menjadi kerak dan semakin membesar. Spark dapat kita amati ketika cerobong/chimney mengeluarkan asap tebal coklat pekat secara tiba-tiba. Jika spark tidak segera di perbaiki maka di khawatirkan akan ada ledakan di dalam WESP. Perhitungan luas satu permukaan pelat pengumpul abu terbang dirumuskan oleh persamaan:

$$A = L \times H \times 2 \quad (2)$$

Dimana:

A : luas permukaan efektif satu collecting plate (m²)

L : panjang collecting plate (m)

H : tinggi collecting plate (m)

Faktor 2 menunjukkan bahwa kedua sisi pelat berfungsi sebagai permukaan pengumpul partikel

2.2.6 Perhitungan Luas Spesifik Pelat Pengumpul (elektroda)

Elektroda emisi yang kuat, terbuat dari baja tahan karat kualitas tinggi. Memerlukan perawatan minimal dan jika diperlukan, sangat mudah diganti. Karena itu desain, penumpukan debu jarang terjadi. Specific Collection Area (SCA) merupakan parameter yang menyatakan perbandingan antara luas total permukaan collecting plate dengan laju alir gas buang yang melewati sistem Wet Electrostatic Precipitator (WESP). Nilai SCA digunakan sebagai indikator ketersediaan area penangkapan partikel terhadap volume gas buang yang diolah. Semakin besar nilai SCA, maka luas permukaan pengumpul yang tersedia relatif lebih besar dibandingkan laju alir gas, sehingga peluang partikel tertangkap oleh collecting plate menjadi lebih tinggi.

Perhitungan luas spesifik pelat pengumpul dirumuskan oleh persamaan:

$$SCA = \frac{A}{Q} \quad (3)$$

Dimana:

SCA : Specific Collection Area ($\text{m}^2 \cdot \text{s}/\text{m}^3$ atau $\text{m}^2/(\text{m}^3/\text{s})$)

A : luas total permukaan collecting plate yang efektif (m^2)

Q : laju alir gas buang (m^3/s)

2.2.7 Perhitungan Aspek Ratio (AR)

Aspect Ratio (AR) merupakan parameter geometrik yang menyatakan perbandingan antara panjang dan tinggi collecting plate pada sistem Wet Electrostatic Precipitator (WESP). Nilai Aspect Ratio digunakan untuk menggambarkan karakteristik dimensi pelat pengumpul yang memengaruhi pola aliran gas dan waktu tinggal partikel di dalam medan listrik. Aspect Ratio yang sesuai akan mendukung distribusi aliran gas yang lebih seragam dan memberikan waktu yang cukup bagi partikel bermuatan untuk bermigrasi menuju collecting plate.

Perhitungan luas spesifik pelat pengumpul dirumuskan oleh persamaan:

$$AR = \frac{L}{H} \quad (4)$$

Dimana:

AR : Aspect Ratio (tanpa satuan)

L : panjang efektif collecting plate (m)

H : tinggi efektif collecting plate (m)

2.2.8 Perhitungan Kecepatan Migrasi Partikel

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. Kecepatan migrasi partikel merupakan parameter yang menunjukkan kecepatan rata-rata partikel bermuatan bergerak menuju permukaan collecting plate akibat gaya elektrostatis. Nilai kecepatan migrasi partikel tidak mudah diukur secara langsung, sehingga penentuannya dilakukan melalui pendekatan matematis dengan membalik persamaan efisiensi Deutsch–Anderson berdasarkan data efisiensi pengumpulan partikel. Persamaan ini digunakan untuk merepresentasikan kondisi aktual kinerja WESP, khususnya pada tahap commissioning. sehingga kecepatan migrasi partikel dapat dinyatakan dengan persamaan:

Adapun persamaan lain untuk mencari kecepatan migrasi yaitu :

$$\omega = -\left(\frac{Q}{A}\right) \ln(1 - \eta) \quad (5)$$

Dimana:

ω : kecepatan migrasi partikel (m/s)

Q : laju alir gas buang (m³/s)

A : luas total collecting plate (m²)

η : efisiensi penangkapan WESP

2.2.9 Analisis Regresi Linear

Analisis regresi linear merupakan metode statistik yang digunakan untuk mengetahui hubungan antara variabel bebas (independent variable) dan variabel terikat (dependent variable). Dalam penelitian ini, regresi linear digunakan untuk menganalisis hubungan antara tegangan terhadap efisiensi WESP serta hubungan antara arus terhadap efisiensi WESP. Persamaan regresi linear sederhana dinyatakan sebagai berikut:

$$Y = a + bX$$

Dimana:

Y = variabel terikat (efisiensi WESP)

X = variabel bebas (tegangan atau arus)

a = konstanta (intercept), yaitu nilai Y jika X bernilai 0

b = koefisien regresi (slope), yang menunjukkan arah dan besarnya perubahan variabel Y untuk setiap kenaikan satu satuan variabel X

Hubungan yang diperoleh dari analisis regresi dapat digunakan untuk mengetahui arah pengaruh suatu variabel terhadap variabel lainnya. Apabila nilai koefisien regresi (b) bernilai positif maka peningkatan variabel bebas akan menyebabkan peningkatan variabel terikat. Sebaliknya apabila bernilai negatif maka peningkatan variabel bebas akan menyebabkan penurunan variabel terikat.

Selain itu, digunakan koefisien determinasi (R^2) untuk mengetahui seberapa besar variasi efisiensi dapat dijelaskan oleh perubahan tegangan maupun arus operasi WESP.

Dalam penelitian ini analisis regresi linear digunakan sebagai metode untuk mengetahui kecenderungan hubungan antara parameter tegangan dan arus terhadap efisiensi WESP. Hasil analisis regresi digunakan untuk memperkuat pembahasan mengenai pengaruh perubahan parameter elektrik terhadap perubahan efisiensi

penangkapan partikulat.

2.2.10 Perhitungan efisiensi Pengumpulan Partikel WESP

Efisiensi pengumpulan partikel pada Wet Electrostatic Precipitator (WESP) dapat dianalisis menggunakan persamaan Deutsch–Anderson. Persamaan ini menunjukkan bahwa efisiensi pengumpulan dipengaruhi oleh luas permukaan pengumpul, kecepatan migrasi partikel, serta laju alir gas buang. Semakin besar luas permukaan collecting plate dan kecepatan migrasi partikel, serta semakin kecil laju alir gas buang, maka efisiensi pengumpulan partikel akan semakin tinggi.

Perhitungan efisiensi WESP dirumuskan menggunakan rumus Deutsch-Anderson, dengan persamaan:

$$\eta = 1 - \exp\left(-\frac{A\omega}{Q}\right) \quad (6)$$

Dimana:

η : efisiensi pengumpulan partikel

A : luas total collecting plate (m^2)

ω : kecepatan migrasi partikel (m/s)

Q : laju alir gas buang (m^3/s)

Persamaan Deutsch–Anderson digunakan dalam penelitian ini karena merupakan model matematis yang paling umum digunakan untuk memperkirakan efisiensi pengumpulan partikel pada Electrostatic Precipitator berdasarkan luas collecting plate, kecepatan migrasi partikel, dan laju aliran gas. Persamaan tersebut dipilih karena mampu merepresentasikan hubungan antara parameter desain dan kondisi aktual WESP yang dianalisis dalam penelitian ini.

2.2.11 Kebaruan (Novelty) Penelitian

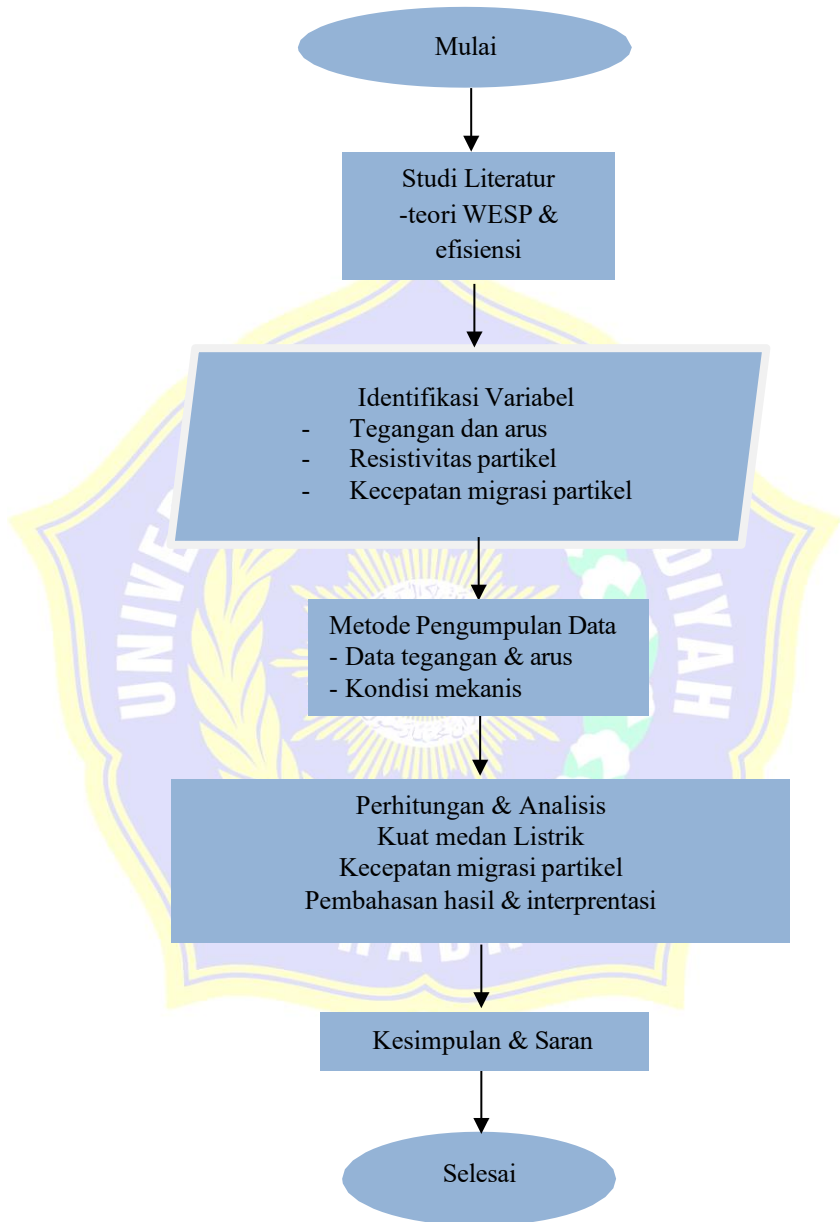
Penelitian mengenai Wet Electrostatic Precipitator (WESP) telah banyak dilakukan dengan fokus pada perancangan sistem maupun evaluasi efisiensi pada kondisi operasi normal. Namun demikian, penelitian yang secara khusus mengevaluasi performa WESP berdasarkan data aktual pada tahap commissioning masih relatif terbatas.

Kebaruan penelitian ini terletak pada analisis menyeluruh terhadap hubungan antara parameter elektrik berupa tegangan dan arus operasi dengan kuat medan listrik, kecepatan migrasi partikel, resistivitas partikel, serta efisiensi penangkapan partikulat berdasarkan data operasional aktual selama proses commissioning. Selain itu,

penelitian ini juga membandingkan secara langsung performa desain dengan performa aktual sehingga dapat mengidentifikasi penyebab terjadinya penurunan efisiensi WESP.



2.2.12 Kerangka Pemikiran



Gambar 1 Kerangka Pikir

2.3 Energi Listrik

Energi listrik merupakan bentuk energi yang digunakan untuk mengoperasikan berbagai peralatan industri, termasuk sistem Wet Electrstatic Precipitator (WESP). Tanpa adanya energi listrik, berbagai aktivitas manusia tidak dapat berjalan baik dan lancar. Namun konsumsi energi listrik secara berlebihan akan membawa dampak negatif. Oleh karena itu, pemanfaatan energi listrik harus dilakukan secara hemat dan efisien. Untuk mengetahui penggunaan energi listrik di suatu equipment atau peralatan dapat dilakukan secara Analisa sebelumnya menurut data sheet.

2.4 Daya Listrik

Daya listrik merupakan penghantar energi pada suatu rangkaian. Perhitungan daya listrik dapat diperhatikan pada persamaan

$$P = V \times I \quad (7)$$

Dimana:

P = Daya (watt)

V = Tegangan (volt)

I = Arus (ampere)

Tiga jenis daya listrik meliputi:

1. Daya aktif merupakan daya yang terpakai sebenarnya. Daya aktif memiliki satuan watt.

$$P = V \times I \times \cos\phi \quad (8)$$

2. Daya reaktif merupakan daya yang diperlukan dalam pembentukan medan magnet yang kemudian menghasilkan fluks magnet. Daya reaktif memiliki satuan VAR.

$$Q = V \times I \times \sin\phi \quad (9)$$

3. Daya semu merupakan hasil dari kalkulasi antara tegangan rms dengan arus rms. Daya semu memiliki satuan VA.

$$S = V \times I \quad (10)$$

2.4.1 Medan Listrik Elektrostatik pada WESP

Medan listrik elektrostatik merupakan komponen utama yang menentukan mekanisme kerja Wet Electrostatic Precipitator (WESP)

dalam proses pengumpulan partikel dari aliran gas buang. Medan listrik ini dibentuk oleh perbedaan tegangan tinggi antara elektroda pemancar (discharge electrode) dan elektroda pengumpul (collecting plate). Perbedaan tegangan tersebut menghasilkan medan listrik yang berfungsi untuk mengionisasi gas dan memberikan muatan listrik pada partikel yang terbawa aliran gas.

Partikel yang telah bermuatan akan mengalami gaya elektrostatik yang mendorongnya bergerak menuju permukaan collecting plate. Proses pergerakan partikel bermuatan ini disebut sebagai migrasi partikel dan menjadi dasar utama proses penangkapan partikel pada sistem WESP. Besarnya gaya elektrostatik yang bekerja pada partikel sangat dipengaruhi oleh kuat medan listrik yang terbentuk di antara kedua elektroda. Hubungan tersebut dapat dituliskan dalam bentuk persamaan sebagai berikut:

$$E = \frac{V}{d} \quad (11)$$

Dimana :

E : kuat medan listrik (V/m)

V : tegangan listrik yang diterapkan (V)

d : jarak antar elektroda (m)

2.5 Transformator

Transformator merupakan suatu alat listrik yang mengubah tegangan arus bolak-balik dari satu tingkat ke tingkat yang lain melalui suatu gandengan magnet dan berdasarkan prinsip-prinsip induksi elektromagnet dimana perbandingan tegangan antara sisi primer dan sisi sekunder berbanding lurus dengan perbandingan jumlah lilitan dan berbanding terbalik dengan perbandingan arusnya, Transformator terdiri atas sebuah inti, yang terbuat dari besi berlapis dan dua buah kumparan, yaitu kumparan primer dan kumparan sekunder. [14]

Prinsip kerja transformator adalah berdasarkan hukum Ampere dan faraday yaitu “arus listrik dapat menimbulkan medan magnet dan sebaliknya medan magnet dapat menimbulkan arus listrik”. Jika salah satu kumparan pada trafo dialiri arus listrik, maka timbul gaya garis magnet yang berubah-ubah. Kumparan sekunder akan menerima gaya gaya magnet dari kumparan primer yang besarnya berubah-ubah dan di kumparan sekunder juga timbul induksi yang diakibatkan antara dua ujung kumparan terdapat beda tegangan, Jumlah garis gaya (fluks) yang masuk kumparan sekunder adalah sama dengan garis gaya yang keluar dari kumparan primer. [15]

Berdasarkan perbandingan antara jumlah lilitan primer dan jumlah lilitan skunder transformator ada dua jenis yaitu:

1. Transformator step up yaitu transformator yang mengubah tegangan bolak-balik rendah menjadi tinggi, transformator ini mempunyai jumlah lilitan kumparan sekunder lebih banyak daripada jumlah lilitan primer ($N_s > N_p$).
2. Transformator step down yaitu transformator yang mengubah tegangan bolak-balik tinggi menjadi rendah, transformator ini mempunyai jumlah lilitan kumparan primer lebih banyak daripada jumlah lilitan sekunder ($N_p > N_s$).

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (12)$$

Dimana :

E_1 = GGL induksi/ tegangan efektif pada kumparan primer (V)

E_2 = GGL induksi/ tegangan efektif pada kumparan sekunder (V)

N_1 = Jumlah lilitan kumparan primer

N_2 = Jumlah lilitan kumparan sekunder

2.6 Rectifier

Rectifier merupakan suatu rangkaian alat listrik untuk mengubah arus listrik bolak-balik/AC (Alternating Current) menjadi arus searah/DC (Direct Current) yang berfungsi untuk memberikan tegangan DC. Di dalam rectifier terdapat sebuah baterai, yang berfungsi untuk menyimpan tegangan DC. Rectifier dibagi menjadi 2 jenis yaitu :

1. Rectifier setengah gelombang (Half Wave rectifier)
2. Rectifier gelombang penuh

Rectifier setengah gelombang hanya menggunakan 1 buah diode sebagai komponen utama dalam menyearahkan gelombang AC. Prinsipnya adalah hanya mengambil satu sisi sinyal yaitu sinyal positif dari arus AC untuk dilewatkan dan menahan gelombang sisi sinyal negative sehingga menjadi arus searah (Direct current).

Rectifier gelombang penuh merubah semua sisi sinyal baik itu positif ataupun negative menjadi gelombang searah (Direct current). Rectifier gelombang penuh lebih efisien karena tidak ada gelombang yang terbuang, semua dirubah menjadi gelombang DC. Rectifier gelombang penuh dapat dibuat dengan menggunakan 2 dioda atau 4 dioda.

2.7 Heater Control

Peralatan kontrol untuk pemanas isolator dipasang di Pemanas terpisah Kabinet Kontrol, yang harus dipasang di dalam ruangan. Sistem pemanas memastikan agar isolator di bagian atas *Wet electrostatic precipitator* tetap kering dan terlindungi kondensasi dll. Komponen kunci dalam HCC adalah unit thyristor. Setiap Unit thyristor menyuplai daya ke satu pemanas isolator yang memberikan kontrol penuh pada masing-masing pemanas kap insulator.

Macam- macam tipe thermocouple antara lain:

1. Thermocouple Tipe E Bahan Logam Konduktor Positif : Nickel Chromium Bahan Logam Konduktor Negatif : Constantan Rentang Suhu : $-200^{\circ}\text{C} - 900^{\circ}\text{C}$
2. Thermocouple Tipe J Bahan Logam Konduktor Positif : Iron (Besi) Bahan Logam Konduktor Negatif : Constantan Rentang Suhu : $0^{\circ}\text{C} - 750^{\circ}\text{C}$
3. Thermocouple Tipe K Bahan Logam Konduktor Positif : Nickel-Chromium Bahan Logam Konduktor Negatif : Nickel-Aluminium Rentang Suhu : $-200^{\circ}\text{C} - 1250^{\circ}\text{C}$
4. Thermocouple Tipe N Bahan Logam Konduktor Positif : Nicrosil Bahan Logam Konduktor Negatif : Nisil Rentang Suhu : $0^{\circ}\text{C} - 1250^{\circ}\text{C}$
5. Thermocouple Tipe T Bahan Logam Konduktor Positif : Copper

(Tembaga) Bahan Logam Konduktor Negatif : Constantan Rentang Suhu : $-200^{\circ}\text{C} - 350^{\circ}\text{C}$

6. Thermocouple Tipe U (Kompensasi Tipe S dan Tipe R) Bahan Logam Konduktor Positif : Copper (Tembaga) Bahan Logam Konduktor Negatif : Copper-Nicker Rentang Suhu : $0^{\circ}\text{C} - 1450^{\circ}\text{C}$
- Thermocouple tipe J dan K merupakan tipe yang biasanya digunakan oleh Industri karena harganya yang relatif murah. Penggunaannya pun untuk mengontrol suhu heater atau oven dan furnace agar terkontrol dan tetap konstan.

