

**ANALISIS PENGARUH PERFORMA ELECTROSTATIC PRECIPITATOR
TERHADAP PENCEMARAN UDARA PARTIKULAT
(Studi kasus PLTU PT. Semen Tonasa)**

ARSI AMALIA

P032192003



SEKOLAH PASCASARJANA

UNIVERSITAS HASANUDDIN

MAKASSAR

2021

**ANALISIS PENGARUH PERFORMA ELECTROSTATIC PRECIPITATOR
TERHADAP PENCEMARAN UDARA PARTIKULAT
(Studi kasus PLTU PT. Semen Tonasa)**

Tesis

Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Mencapai Gelar Magister

Program Studi
Pengelolaan Lingkungan Hidup

Disusun dan Diajukan oleh

ARSI AMALIA

Kepada

**SEKOLAH PASCASARJANA
UNIVERSITAS HASANUDDIN**

2021

MAKASSAR

LEMBAR PENGESAHAN TESIS

**ANALISIS PENGARUH PERFORMA ELECTROSTATIC PRECIPITATOR
TERHADAP PENCEMARAN UDARA PARTIKULAT
(STUDI KASUS PLTU PT. SEMEN TONASA)**

Disusun dan diajukan oleh :

**ARSI AMALIA
P032192003**

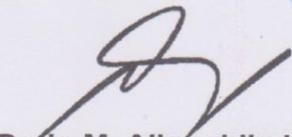
Telah dipertahankan dihadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian Studi Program Magister Program Studi Pengelolaan Lingkungan Hidup Sekolah Pascasarjana Universitas Hasanuddin

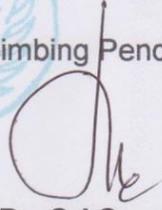
pada tanggal 9 Agustus 2021
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

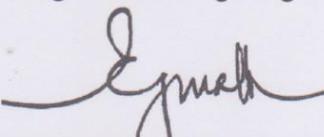
Pembimbing Utama

Pembimbing Pendamping


Dr. Ir. M. Alimuddin H. Assagaf, M.Eng
NIP : 19670929 199303 1003


Prof. Dr. Sri Suryani, D.E.A
NIP : 19580508 198312 2 001

Ketua Program Studi
Pengelolaan Lingkungan Hidup


Prof. Dr. Ir. Eymal B Demmallino, M.Si
NIP : 1964 0815 1992 02 1001



Prof. Dr. Jamaluddin Jompa, M.Sc
NIP : P 1967 0308 1990 03 1001

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini ;

Nama : Arsi Amalia
NIM : P032192003
Program Studi : Pengelolaan Lingkungan Hidup
Jenjang : S2

Analisis Pengaruh Performa Electrostatic Precipitator Terhadap Pencemaran Udara Partikulat (Studi Kasus PLTU PT. Semen Tonasa)

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain bahwa Tesis yang saya tulis benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan Tesis ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut

Makassar, 16 Agustus 2021

Yang Menyatakan



(Arsi Amalia)

PRAKATA

Segala puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah 'Azza wa Jalla, yang hanya Dia semata yang berhak disembah, atas berkah, nikmat iman dan Islam serta rahmat-Nya sehingga Tesis dengan judul "***Analisis Pengaruh Performa Electrostatic Precipitator Terhadap Pencemaran Udara Partikulat (Studi kasus PLTU PT. Semen Tonasa)***" dapat terselesaikan sebagaimana mestinya. Penulisan tesis ini diajukan sebagai salah satu persyaratan guna mencapai derajat Magister Lingkungan pada Program Studi Pengelolaan Lingkungan Hidup, minat studi Teknologi Lingkungan, Sekolah Pascasarjana Universitas Hasanuddin, Makassar.

Dalam pelaksanaan studi ini penulis banyak mendapatkan baik dari perorangan maupun instansi/lembaga baik pemerintah maupun swasta. Pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada :

1. Bapak Dr. M. Alimuddin Hamzah Assagaf, M.Eng sebagai ketua komisi penasihat dan Ibu Prof. Dr. Sri Suryani, DEA selaku anggota penasihat yang telah membimbing, memberikan arahan dan masukan dalam penyusunan tesis ini.
2. Bapak Dr. Ir. Darhamsyah, M.Si; Ibu Dr. Paulina Taba, M. Phill, dan Prof. Dr. Ir. Eymal Bahsar Demmallino, M.Si sebagai anggota komisi penasihat yang telah banyak memberikan masukan dan koreksi dalam penyusunan tesis ini.

3. Bapak dan Ibu dosen pengampu mata kuliah pada program S2 Pengelolaan Lingkungan Hidup atas ilmu yang telah diberikan.
4. Pegawai, Staf dan Jajaran Direksi, Khususnya di Unit Electrical Maintenance PLTU PT. Semen Tonasa dan Diklat PT. Semen Tonasa yang telah membantu dalam memberikan data dan informasi dalam penyelesaian studi.
5. Kedua orang tuaku terkasih Bapak Muh. Kasim Hasan dan Ibu Sri Rahayu serta kedua saudaraku Irzha Adiwira dan Amirah Tsabita atas segala doa, motivasi dan kasih sayangnya yang tak hentinya diberikan.
6. Sahabat-sahabat PLH tanpa sekat angkatan yang telah banyak memberikan bantuan dan kerja sama dalam penyelesaian studi ini.
7. Sahabat-sahabatku ST. Aisyah Humaerah, Sri Batara Nurfajri Arisaputri, Magfirah Rusdi, Nur Aulia Hamzah, dan ST. Muhajrah Linda
8. Pasanganku Marta Saputra atas segala dukungan dan motivasi yang telah diberikan

Harapan semoga Tesis ini membantu menambah pengetahuan dan pengalaman bagi para pembaca, sehingga saya dapat memperbaiki bentuk maupun isi tulisan ini sehingga kedepannya dapat lebih baik.

Makassar, Agustus 2021

Arsi Amalia

ABSTRAK

ARSI Amalia Analisis Pengaruh Performa Electrostatic Precipitator Terhadap Pencemaran Udara Partikulat (Studi kasus PLTU PT. Semen Tonasa) (dibimbing oleh Alimuddin Hamzah Assegaf dan Sri Suryani).

Electrostatic Precipitator merupakan alat yang dapat digunakan untuk menangkap partikulat hasil pembakaran batu bara. Alat ini dapat mencapai efisiensi 99.9% apabila kinerja alat berada dalam kondisi yang optimum, Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kinerja Electrostatic Precipitator untuk menjaga kinerja alat ini.

Penelitian ini berlokasi di PLTU PT. Semen Tonasa, Kabupaten Pangkajene Kepulauan. Jenis penelitian ini adalah survei dengan menggunakan metode deskriptif kuantitatif berupa pengumpulan data lapangan, serta pengolahan data lapangan.

Hasil penelitian menunjukkan kinerja alat dengan efisiensi riil sebesar 65.86% dan 87.85% dengan laju alir 15 m³/s dan 20 m³/s dan kecepatan migrasi 0.0027 m/s dan 0.0085m/s . Efisiensi ini dapat ditingkatkan dengan memperkecil laju alir menjadi 2.45 m³/s dan 6.48 m³/s sehingga didapatkan efisiensi optimum sebesar 99.86% dan 99.85%. Efisiensi juga dapat dinaikkan dengan meningkatkan kecepatan migrasi dari 0.0027 m/s dan 0.0085 m/s menjadi 0.0164 m/s dan 0.0263 m/s. Kenaikan kecepatan migrasi dapat ditingkatkan dengan menormalkan resistivitas alat menjadi 10⁷ – 10¹⁰ Ω.cm yang awalnya adalah 2.32×10¹⁰ Ω.cm dan 1.26×10¹⁰ Ω.cm. Kenaikan resistivitas dapat disebabkan oleh komponen-komponen yang bersifat insulator seperti SiO₂, Al₂O₃ dan CaO.

Kata kunci : Electrostatic Precipitator, *Fly Ash*, Efisiensi, Biaya Maintenance

| | |
|--|---|
|  GUGUS PENJAMINAN MUTU (GPM) SEKOLAH PASCASARJANA UNHAS | |
| Abstrak ini telah diperiksa. Tanggal: <u>16/8/21</u> | Paraf Ketua / Sekretaris,  |

ABSTRACT

AMALIA ARSI. *Analysis Of The Effect Of Electrostatic Precipitator Performance On Particulate Air Pollution (Case Study PT. Semen Tonasa Electric Power Plant)* (supervised by Alimuddin Hamzah Assegaf and Sri Suryani).

Electrostatic Precipitator is a tool that can be used to capture particulates resulting from coal combustion. This tool can achieve 99.9% efficiency if the performance of the tool is in optimum conditions. This study aims to analysis the performance of the Electrostatic Precipitator to maintain the performance of this tool.

This research is located at PLTU PT. Semen Tonasa, Pangkajene Islands Regency. This type of research is a survey using quantitative descriptive methods in the form of field data collection, as well as field data processing.

The results showed the performance of the tool with real efficiency of 65.86% and 87.85% with flow rates of 15 m³/s and 20 m³/s and migration velocity of 0.0027 m/s and 0.0085m/s. This efficiency can be increased by reducing the flow rate by 2.45 m³/s and 6.48 m³/s so that the optimum efficiency is 99.86% and 99.85%. Efficiency can also be increased by increasing the migration velocity from 0.0027 m/s and 0.0085 m/s to 0.0164 m/s and 0.0263 m/s. The increase in migration velocity can be increased by normalizing the resistivity of the tool to 10⁷ – 10¹⁰ Ω.cm which was initially 2.32×10¹⁰ Ω.cm and 1.26×10¹⁰ Ω.cm. The increase in resistivity can be caused by insulating components such as SiO₂, Al₂O₃ and CaO.

Keywords : Electrostatic Precipitator, *Fly Ash*, Efficiency, Maintenance Cost

| | |
|--|---|
|  GUGUS PENJAMINAN MUTU (GPM) SEKOLAH PASCASARJANA UNHAS | |
| Abstrak ini telah diperiksa. Tanggal : <u>6/8/21</u> | Paraf Ketua / Sekretaris,  |

DAFTAR ISI

| nomor | halaman |
|---|----------------|
| HALAMAN SAMPUL..... | i |
| LEMBAR PENGAJUAN TESIS..... | ii |
| LEMBAR PENGESAHAN | iii |
| LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN | iv |
| PRAKATA | v |
| ABSTRAK | vii |
| ABSTRACT | viii |
| DAFTAR ISI..... | ix |
| DAFTAR TABEL | xii |
| DAFTAR GAMBAR | xiii |
| BAB I | 1 |
| PENDAHULUAN | 1 |
| A. Latar Belakang | 1 |
| B. Rumusan Masalah | 4 |
| C. Tujuan Penelitian | 5 |

| | | |
|---|---|--|
| D. | Manfaat Penelitian..... | 5 |
| BAB II TINJAUAN PUSTAKA..... | | 6 |
| A. | Pencemaran Udara | 6 |
| B. | Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU)..... | 7 |
| C. | Limbah Padat Pembangkit Listrik Tenaga Uap | 9 |
| D. | <i>Fly Ash</i> | Error! Bookmark not defined. 11 |
| E. | Electrostatic Precipitator..... | 13 |
| F. | Kinerja Elektrostatic Precipitator | 16 |
| G. | Kinerja Electrostatic Precipitator dalam Aspek Ekonomi..... | 22 |
| H. | Kerangka Pikir..... | 32 |
| BAB III METODOLOGI PENELITIAN | | 35 |
| A. | Rancangan Penelitian | 35 |
| B. | Waktu dan Lokasi Penelitian | 35 |
| C. | Alat dan Bahan..... | 36 |
| D. | Teknik Pengumpulan Data | 37 |
| E. | Prosedur Penelitian | 38 |
| BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN PENELITIAN | | 39 |
| A. | Gambaran Umum Lokasi Penelitian..... | 39 |

| | | |
|---|--|-----------|
| B. | Proses Pengendalian <i>Fly Ash</i> PLTU PT. Semen Tonasa | 42 |
| C. | Electrostatic Precipitator PT. Semen Tonasa..... | 45 |
| D. | Evaluasi Kinerja Electrostatic Precipitator | 48 |
| E. | Evaluasi Aspek Ekonomi | 68 |
| BAB IV KESIMPULAN DAN SARAN..... | | 74 |
| A. | Kesimpulan | 74 |
| B. | Saran..... | 75 |
| DAFTAR PUSTAKA..... | | 76 |
| LAMPIRAN | | |

DAFTAR TABEL

| nomor | halaman |
|--|----------------|
| 1. Komposisi (%) <i>Fly Ash</i> batubara | 13 |
| 2. Matriks Penelitian Terdahulu | 26 |
| 3. Jumlah Penduduk menurut Jenis Kelamin per Desa di Kecamatan Bungoro Tahun 2017 | 38 |
| 4. Daftar Sumber Daya Alam | 40 |
| 5. Spesifikasi Electrostatic Precipitator PLTU PT. Semen Tonasa | 44 |
| 6. Kondisi Operasi Electrostatic Precipitator | 45 |
| 7. Konsentrasi Emisi <i>Fly Ash</i> | 46 |
| 8. Nilai Efisiensi Riil dari Electrostatic Precipitator | 47 |
| 9. Kecepatan Migrasi Riil Electrostatic Precipitator | 48 |
| 10. Hasil Perhitungan Evaluasi Laju Alir Gas Unit 2x25 MW | 49 |
| 11. Hasil Perhitungan Evaluasi Laju Alir Gas Unit 2x35 MW | 49 |
| 12. Hasil Perhitungan Evaluasi Kecepatan Migrasi Unit 2x25 MW | 50 |
| 13. Hasil Perhitungan Evaluasi Kecepatan Migrasi Unit 2x35 MW | 50 |
| 14. Perhitungan Tahanan Partikel | 57 |
| 15. Perhitungan Nilai Resistivitas Partikel | 57 |
| 16. Komponen <i>Fly Ash</i> | 58 |
| 17. Data Perhitungan Frekuensi <i>Breakdown</i> Electrostatic Precipitator | 59 |

DAFTAR GAMBAR

| nomor | | halaman |
|-------|--|---------|
| 1. | Electrostatic Precipitator | 15 |
| 2. | Mekanisme Electrostatic Precipitator | 16 |
| 3. | Plate-Wire | 17 |
| 4. | Kerangka Pikir | 29 |
| 5. | Peta Lokasi Penelitian | 31 |
| 6. | Diagram Alir Penelitian | 36 |
| 7. | <i>Process Flow Diagram</i> PLTU PT. Semen Tonasa | 42 |
| 8. | Unit Electrostatic Precipitator 2x25 MW | 43 |
| 9. | Unit Electrostatic Precipitator 2x35 MW | 44 |
| 10. | Grafik Hubungan antara Laju Alir dan Efisiensi unit 2x25 MW | 51 |
| 11. | Grafik Hubungan Laju Alir dan Efisiensi unit 2x35 MW | 51 |
| 12. | Grafik Hubungan Kecepatan Migrasi dan Efisiensi unit 2x25 MW | 53 |
| 13. | Grafik Hubungan Kecepatan Migrasi dan Efisiensi unit 2x35 MW | 53 |
| 14. | Kecepatan Migrasi untuk <i>Fly Ash</i> | 55 |
| 15. | Resistivitas Partikel untuk Electrostatic Precipitator | 56 |
| 16. | Efek Komponen <i>Fly Ash</i> terhadap Resistivitas Partikel | 58 |

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Meningkatnya kebutuhan masyarakat diikuti meningkatnya kebutuhan listrik sehingga menyebabkan cadangan minyak bumi menipis dan krisis bahan bakar minyak. Maka dari itu bentuk usaha untuk mengatasi permasalahan ini dengan membangun instalasi pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) yang bahan bakarnya adalah batubara. Pembangunan instalasi pembangkit listrik menghasilkan limbah padat hasil pembakaran berupa abu terbang (*Fly Ash*), slag (bottom ash) dan lumpur flue gas desulfurization. Dengan peningkatan jumlah pembangunan PLTU berbahan bakar batubara di Indonesia, jumlah limbah juga akan meningkat. Jumlah limbah PLTU pada tahun 2000 telah mencapai 1,66 juta ton dan pada tahun 2006 mencapai 2 juta ton. Di Indonesia, produksi limbah abu dasar dan abu layang dari tahun ke tahun meningkat sebanding dengan konsumsi penggunaan batubara sebagai bahan baku untuk proses pembakaran di industri (Harijono, 2006). Maka dari itu kelestarian lingkungan sekitarnya harus tetap dijaga karena PLTU dengan bahan bakar batubara dapat menjadi sumber polusi udara jika sisa pembakaran batubara tidak ditangani dengan baik (Afrian, dkk., 2015).

Abu terbang (fly ash) batubara adalah produk limbah yang dihasilkan dari pembakaran material anorganik yang terkandung dalam batubara dan menjadi salah satu faktor yang dapat mencemari udara. Apabila tidak dilakukan pengolahan lebih lanjut, abu terbang dapat menimbulkan dampak negatif untuk lingkungan. *Fly Ash* batubara dapat mengkontaminasi air tanah dengan kandungan pengotor seperti arsenik, barium, berillium, boron, kadmium, kromium, talium, selenium, molibdenum dan merkuri. Umumnya *Fly Ash* batubara dibuang di *landfill* atau ditumpuk begitu saja di dalam area industri. Penumpukkan abu terbang batubara ini pun dapat menimbulkan pencemaran (Yunita, 2017).

Demi mengatasi masalah terhadap pencemaran lingkungan, digunakan salah satu sistem penanggulangan kadar pencemaran udara yang dilakukan dengan metode penyaringan udara hasil pembakaran (Pasaribu, 2008). Metode yang digunakan adalah dengan cara penggunaan alat Electrostatic Precipitator (Afrian, dkk., 2015). Electrostatic Precipitator merupakan salah satu metode penangkapan debu alternatif berefisiensi tinggi (mencapai diatas 90%) dengan rentang partikel yang didapat cukup besar. Menggunakan Electrostatic precipitator ini, jumlah limbah debu yang keluar dari cerobong diharapkan hanya sekitar 0,16 % (efektifitas penangkapan debu mencapai 99,84%) (Fitrianto, 2018).

Menyadari pentingnya alat tersebut sebagai salah satu pengontrol emisi gas buang, kinerja dari Electrosatic Precipitator perlu dijaga dan

diwujudkan karena berhubungan dengan faktor lingkungan (Sangadi, dkk., 2015). Kinerja dari suatu alat dapat diukur melalui nilai efisiensi alat tersebut. Semakin tinggi nilai efisiensi alat maka kinerja alat semakin optimal.

Efisiensi dapat dihitung menggunakan persamaan Deutsch-Anderson. Berdasarkan persamaan Deutsch-Anderson variabel yang mempengaruhi efisiensi Electrostatic Precipitator adalah laju alir dan kecepatan migrasi. Xiang, et.all (2020) menyatakan bahwa salah satu cara untuk menaikkan efisiensi dari Electrostatic Precipitator adalah dengan menurunkan laju air gas masuk. Dengan menurunkan laju alir gas masuk akan diikuti oleh penurunan kecepatan gas pada medan listrik. Menurut US EPA (1979) kecepatan migrasi yang optimal untuk *Fly Ash* hasil pembakaran batu bara adalah sebesar 1.5 cm/s – 20.4 cm/s. Nilai kecepatan migrasi yang optimal dapat mempengaruhi mobilitas partikel menyebabkan partikel lebih mudah untuk menempel pada pelat pengumpul Electrostatic Precipitator sehingga menaikkan efisiensi alat. Dengan gagasan di atas, maka dilakukan penelitian untuk menganalisis kinerja alat dengan menggunakan faktor-faktor yang dapat mempengaruhi nilai efisiensi Electrostatic Precipitator.

Kinerja alat juga dapat dijaga dengan kegiatan penjadwalan dan tindakan perawatan yang tepat (Fauziyyah dan Sriyanto, 2015). Menurut Nurfaizah, dkk (2014), Perawatan atau *maintenance* merupakan suatu kegiatan untuk merawat suatu sistem/komponen dan kegiatan untuk mengembalikan atau memperbaiki suatu kondisi tertentu pada periode tertentu. Pelaksanaan kegiatan pemeliharaan memerlukan sejumlah biaya yang disebut sebagai biaya pemeliharaan. Biaya pemeliharaan/*maintenance* merupakan biaya yang dibutuhkan guna menjaga dan mempertahankan umur teknis dan fungsi barang investasi, agar barang tersebut dapat memproduksi sesuai dengan kapasitasnya (RSUP Fatmawati, 2008).

Dampak dari pencemaran udara berupa paparan fly ash juga dapat berdampak terhadap kesehatan dan pada akhirnya akan menimbulkan beban ekonomi (economic burden) yang harus ditanggung oleh masyarakat. Perkiraan biaya yang dikeluarkan kemudian dimasukkan kedalam penelitian ini untuk dijadikan sebagai aspek social secara eksternal.

B. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang dikemukakan maka pokok permasalahan yang dikaji dalam penelitian ini sebagai berikut:

1. Bagaimana analisis pengaruh kinerja alat Electrostatic Precipitator

pada PT. Semen Tonasa

2. Berapa jumlah perkiraan biaya maintenance Electrostatic Precipitator dan beban biaya kesehatan akibat paparan fly ash

C. Tujuan Penelitian

Sesuai dengan rumusan permasalahan yang telah dijelaskan, maka tujuan penelitian ini adalah:

1. Menganalisis pengaruh kinerja Electrostatic Precipitator pada PT. Semen Tonasa
2. Menghitung perkiraan biaya maintenance Electrostatic Precipitator dan dan beban biaya kesehatan akibat paparan fly ash

D. Manfaat Penelitian

1. Memberikan informasi tentang kinerja alat Electrostatic Precipitator pada PLTU PT. Semen Tonasa sebagai bahan pertimbangan untuk melakukan perawatan rutin
2. Memberikan informasi kepada PLTU PT. Semen Tonasa mengenai beberapa parameter yang dapat mempengaruhi kinerja alat Electrostatic Precipitator

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

A. Pencemaran Udara

Menurut Peraturan Pemerintah No.41 Tahun 1999, pencemaran udara adalah masuknya atau dimasukkannya zat, energy dan atau komponen lain ke dalam udara ambien oleh kegiatan manusia, sehingga mutu udara ambien turun sampai ke tingkat tertentu yang menyebabkan udara ambien tidak memenuhi fungsinya

Pencemaran udara merupakan pencemaran yang termasuk dalam kategori pencemaran yang sangat berbahaya dan juga dapat memberikan dampak yang cukup besar (Molek, dkk., 2020).

Menurut Keputusan Menteri Negara Kependudukan dan Lingkungan Hidup No. KEP-03/MENKLH/II /1991 yang dimaksud dengan pencemaran udara ialah “masuk atau dimasukkannya makhluk hidup, zat, energi, dan atau komponen lain ke udara oleh kegiatan manusia atau proses alam, sehingga kualitas udara turun sampai ke tingkat tertentu yang menyebabkan udara menjadi kurang atau tidak dapat berfungsi lagi sesuai dengan peruntukannya. Pencemaran terjadi karena terdapat beberapa elemen atau faktor yang mendukung terjadinya proses

pencemaran. Elemen-elemen pendukung yang menyebabkan terjadinya proses pencemaran udara adalah sumber bahan pencemar yang dapat menghasilkan polutan, adanya interaksi faktor pencemar di atmosfer yang dapat mengakibatkan turunnya kualitas udara dan menimbulkan dampak negatif pada manusia dan lingkungan (Prabowo dan Muslim, 2018).

Menurut *Greenpeace* dalam artikel mongabay.co.id penyumbang polusi udara terbesar di Indonesia berasal dari instansi Pembangkit Tenaga Listrik Uap (PLTU). Pernyataan ini juga didukung oleh laporan Dinas Lingkungan Hidup DKI Jakarta pada tahun 2019 bahwa sebesar 75% sumber pencemaran udara berasal dari pembangkit listrik.

B. Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU)

Mengingat kebutuhan akan listrik cenderung meningkat dari tahun ke tahun, pemerintah Indonesia mulai mengembangkan dan membangun instalasi Pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) sebagai penyuplai energi listrik untuk masyarakat (Yunita, 2017).

Prinsip kerja dari PLTU yaitu dimulai dari batubara yang dihaluskan oleh pulverizer, kemudian akan dihembuskan oleh Primary Air Fan (PA Fan). Dengan tekanan udara yang tinggi, campuran batubara halus ini akan dihembuskan oleh PA Fan menuju ke ruang bakar dan dibakar oleh

semburan api dari oil burner dan udara sehingga terjadi proses pembakaran batubara. Disisi lain, fluida akan mengalir melewati *low pressure heater*, *economizer*, boiler, dan superheater. Superheater akan mengubah fluida menjadi uap kering yang akan dilanjutkan ke *high pressure turbine* dan digunakan untuk memutar turbin. Saat uap berada pada *high pressure turbine*, beberapa uap akan dikembalikan ke ruang bakar untuk dipanaskan kembali oleh preheater. Dan beberapa uap yang lainnya akan tetap digunakan untuk memutar turbin pada *intermediate pressure turbine* dan *low pressure turbine* yang dikopel dengan poros yang sama dengan generator sehingga dapat menghasilkan listrik (Rohmanda, 2020).

Instalasi Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) merupakan instalasi penghasil energi dengan menggunakan bahan bakar dari batubara. Dikarenakan Indonesia memiliki sumberdaya batubara yang melimpah, sehingga instalasi ini menjadi pilihan utama penghasil energy yang digunakan dan didukung dengan biaya operasional yang murah apabila dibandingkan dengan sistem pembangkit listrik lainnya. Batubara adalah sumberdaya tambang yang berasal dari fosil makhluk hidup jutaan tahun yang lalu, yang berarti bahwa batubara ini bersifat organik. Terdapat dua jenis batubara, yaitu yang berkualitas baik yang akan menghasilkan sedikit bahan pencemar sehingga tidak tidak berbahaya bagi lingkungan dan batubara yang berkualitas rendah yang akan menghasilkan berbagai macam unsur berbahaya yang dapat mencemari lingkungan, seperti gas

Sulfur, Nitrogen dan Sodium (Yunita, 2017)

Permasalahan pencemaran udara inilah yang banyak terjadi di Indonesia akibat dari pemanfaatan batubara. Pembakaran batubara yang tidak sempurna, akan menghasilkan gas beracun CO (karbon monoksida). Batubara digunakan dengan cara dibakar dalam suatu ruang pembakaran boiler. Dari proses pembakaran ini akan menghasilkan produk buang berupa gas yaitu gas SO_x (sulphur oksida), NO_x (nitrogen oksida), CO₂ (karbon dioksida), dan CO (karbon monoksida), serta limbah padat berupa debu (bottom ash) dan partikulat logam berat seperti SiO₂ (silikat) (Yunita, 2017).

C. Limbah Padat Pembangkit Listrik Tenaga Uap

Batubara dan minyak merupakan bahan bakar utama untuk menghasilkan tenaga listrik. Biaya yang relatif murah dan sumber yang melimpah menjadi keuntungan penggunaan batubara. Tetapi dilain sisi, batubara dapat menimbulkan masalah serius untuk lingkungan (Yunita, 2017)

Batubara adalah salah satu sumber bahan bakar energi listrik yang digunakan pembangkit listrik untuk menghasilkan listrik hampir 40% di seluruh dunia. Batubara berasal dari sisa tumbuhan dari zaman prasejarah yang berubah bentuk dan awalnya berakumulasi di rawa dan lahan gambut. Penimbunan material tumbuhan tersebut akan terkena suhu dan tekanan

yang tinggi. Suhu dan tekanan yang tinggi menyebabkan proses perubahan fisika dan kimiawi dan kemudian terbentuk batubara (World Coal Institute, 2005).

Proses pembakaran batubara menghasilkan produk sisa atau yang dikenal dengan limbah batubara. Abu terbang (*Fly Ash*) adalah salah satu limbah yang dihasilkan dari pembakaran batubara. *Fly Ash* merupakan limbah padat yang dihasilkan dari pembakaran batubara pada pembangkit tenaga listrik. Limbah padat ini terdapat dalam jumlah yang cukup besar. Sekitar 15% -17 % *Fly Ash* dihasilkan dari tiap satu ton pembakaran batubara (Safitri dan Djumari, 2009).

Fly ash adalah limbah padat yang berasal dari abu yang terbawa oleh gas buang dari pembakaran batubara yang digunakan untuk pembangkit listrik tenaga batubara, proses pembakaran klinker di rotary kiln pabrik semen, gasifikasi batubara, dan pencairan batubara. Gas buang mengandung partikel abu terbang yang sangat lembut. Abu terbang akan tertahan pada pengendapan elektrostatis sebelum habis dengan gas buang

Fly ash yang dihasilkan PLTU batubara di Indonesia memiliki analisis granulometri sebesar 85%(wt) dengan ukuran butir 0,5-50. Asosiasi pengembangan fly ash di Australia telah melakukan analisis agranulometri terhadap fly ash dengan hasil 86,7%% (wt) dengan ukuran butir sekitar 45 μ m (Poernomo, 2011).

D. Fly Ash

Fly ash merupakan produk sisa yang dihasilkan dari proses pembakaran batubara pada boiler, sehingga karakteristik ditentukan oleh komposisi dan sifat-sifat mineral pengotor dalam batubara serta proses pembakarannya (Wardani, 2018). Fly ash terdiri dari partikel halus dan tepung yang dominan berbentuk bulat, padat atau berongga, dan sebagian besar seperti kaca (amorf) di alam (Ahmaruzzaman, 2010). Fly ash adalah sisa pembakaran padat yang terbawa bersama dengan gas buang dan ditangkap oleh pengontrol udara. Fly ash mengandung Al_2O_3 , SiO_2 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , Na_2 , dan SO (Silmi, et al., 2017).

Sifat kimia fly ash sangat dipengaruhi oleh sifat-sifat batubara yang dibakar dan teknik yang digunakan untuk penanganan dan penyimpanan. Pada dasarnya ada empat jenis, atau peringkat, batubara, masing-masing bervariasi dalam nilai kalor, komposisi kimia, kadar abu, dan asal geologi. Empat jenis (peringkat) batubara adalah antrasit, bituminus, sub-bituminus, dan lignit. Selain ditangani dalam bentuk kering, terkondisi, atau basah, fly ash juga terkadang diklasifikasikan menurut jenis batubara dari mana abu itu berasal. Komponen utama dari abu terbang batubara bituminous adalah silika, alumina, oksida besi, dan kalsium, dengan jumlah karbon yang bervariasi, diukur dengan loss on ignition (LOI). Abu layang batubara lignit dan sub-bituminus dicirikan oleh konsentrasi kalsium dan magnesium

oksida dan persentase silika yang berkurang dan oksida besi, serta kandungan karbon yang lebih rendah, dibandingkan dengan abu terbang batubara bituminus. Sangat sedikit batubara antrasit yang dibakar di boiler utilitas (Ahmaruzzaman, 2010).

Berdasarkan komponen *Fly Ash* tersebut terdapat PP No. 85 Tahun 1999 tentang Perubahan atas Peraturan Pemerintah No. 18 Tahun 1999 tentang Pengelolaan Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun, *Fly Ash* dikategorikan sebagai limbah B3 karena terdapat kandungan oksida logam berat yang akan mencemari lingkungan (Wardani, 2018).

Tabel 1. Komposisi (%) *Fly Ash* batubara

| Komposisi | Jenis Batubara | | |
|------------------------------------|----------------|---------------|---------|
| | Bituminus | Sub-bituminus | Lignite |
| SiO₂ | 20-60 | 40-60 | 15-45 |
| Al₂O₃ | 5-35 | 20-30 | 10-25 |
| Fe₂O₃ | 10-40 | 4-10 | 4-15 |
| CaO | 1-12 | 5-30 | 14-40 |
| MgO | 0-5 | 5-30 | 14-40 |
| K₂O | 0-3 | 0-4 | 0-4 |
| Na₂O | 0-4 | 0-2 | 0-10 |
| SO₃ | 0-4 | 0-2 | 0-10 |
| LOI | 0-15 | 0-3 | 0-5 |

Sumber : Yunita, 2017

Teknologi pembakaran boiler yang diterapkan akan berpengaruh terhadap karakteristik abu batubara yang dihasilkan (Yunita, 2017).

Berat jenis fly ash biasanya berkisar antara 2,1 hingga 3,0, sedangkan luas permukaan spesifiknya dapat bervariasi dari 170 hingga 1000 m²/kg (Ahmaruzzaman, 2010). Kandungan Sulfur dalam bahan induk batubara akan menentukan nilai pH abu terbang. Selain hara esensial, abu terbang memiliki komposisi logam toksik seperti Cr, Pb, Hg, As dan Cd yang berbahaya bagi lingkungan maupun kesehatan manusia (Hayati, 2010).

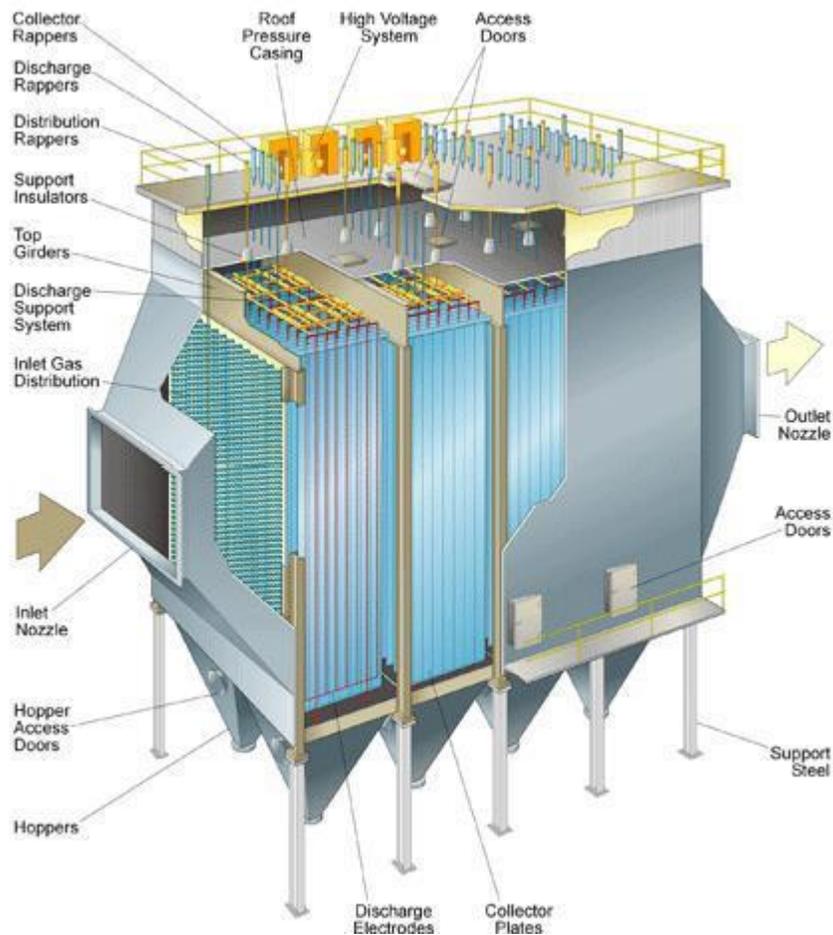
Fly Ash sangat berpotensi dalam mencemari lingkungan, sehingga diperlukan suatu sistem untuk mengurangi atau mengontrol *Fly Ash*. Metode yang paling efektif saat ini adalah dengan menggunakan alat Electrostatic Precipitator (Afrian, dkk., 2015).

E. Electrostatic Precipitator

Electrostatic precipitator adalah alat penunjang PLTU yang digunakan untuk menangkap *Fly Ash* hasil pembakaran batubara di ruang bakar PLTU. Gas buang hasil pembakaran batubara terlebih dahulu akan diumpun melewati Electrostatic Precipitator untuk dikurangi semaksimal mungkin partikel-partikelnya agar tidak membahayakan lingkungan ketika dilepaskan ke atmosfer (Rohmanda, 2020).

Electrostatic precipitator adalah alat penting dalam proses pembersihan gas buang. 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

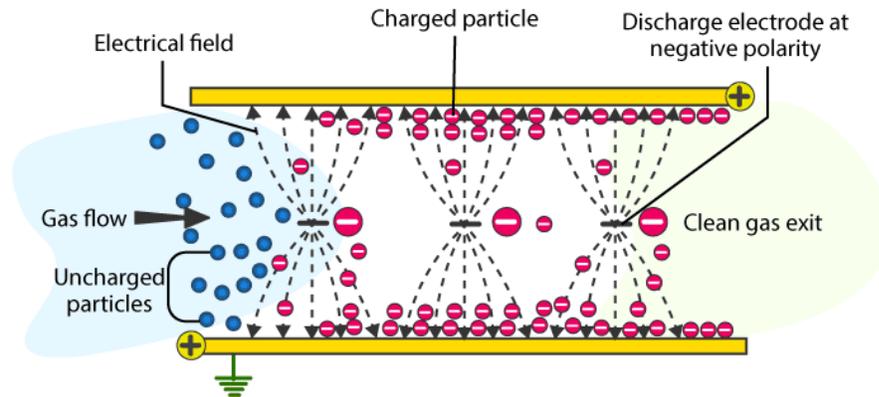
Pembangkit listrik yang sangat besar mungkin memiliki beberapa presipitator untuk setiap unit, sedangkan tempat tinggal mungkin memiliki presipitator tunggal, yang seringkali hanya sedikit lebih besar dari penyedot debu rumah tangga. Beberapa presipitator dapat mengumpulkan 99,9 persen atau lebih debu (yang dapat mengandung arsenik, asam, dan bahan kimia lainnya) dari gas buang, tergantung pada suhu dan laju aliran gas, ukuran dan komposisi kimia partikel, dan desain presipitator dan tegangan itu berlaku untuk gas (Hosansky, 2021)



Gambar 1. Electrostatic Precipitator (Rohmanda, 2020).

Electrostatic Precipitator bekerja dengan cara mengontrol emisi gas buang dari cerobong untuk dilewatkan pada ruangan yang pelat elektrodanya bermuatan negatif dengan memberikan kutub negatif arus searah (DC) yang bertegangan tinggi sekitar 20-50 KV. Partikulat atau asap atau emisi gas hasil pembakaran akan bermuatan negatif ketika melewati elektroda/pelat yang bermuatan negatif. Selanjutnya gas emisi yang bermuatan negatif dilewatkan melalui pelat logam yang bermuatan positif sehingga gas emisi akan tertarik dan menempel pada pelat logam. Proses

pengumpulan debu dengan metode ini menggunakan listrik statis, sehingga disebut Electrostatic Precipitator (Lusiandri, et al., 2019).

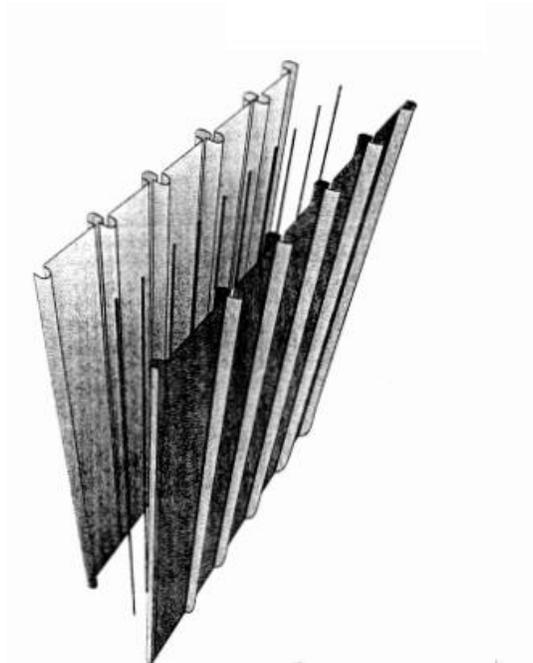


Gambar 2. Mekanisme Electrostatic Precipitator

Electrostatic Precipitator dapat dikelompokkan dalam beberapa klasifikasi, yaitu :

a. Desain elektroda, terbagi menjadi tipe *rigid-frame* dan *wire-plate*

Electrostatic Precipitator tipe *wire-plate* adalah yang paling sering digunakan dalam industri. Dalam Electrostatic ini gas mengalir diantara pelat-pelat parallel dan elektroda tegangan tinggi. Elektroda ini berupa kabel-kabel panjang yang diberi pemberat dan digantungkan diantara pelat. Dalam setiap jalur aliran, gas harus melewati setiap kawat secara berurutan. Tipe ini sangat cocok untuk sejumlah gas dengan aliran yang besar (Turner, et.al., 1999).



Gambar 3. Plate-Wire

b. Metode *charging*, terbagi menjadi *single-stage* dan *two-stage*

Sebuah Electrostatic Precipitator satu tahap menggunakan tegangan tinggi untuk mengisi partikel, yang kemudian dikumpulkan dalam ruang yang sama pada permukaan pengumpulan muatan yang berlawanan. Karena partikel pengisian dan pengumpulan terjadi di tahap atau bidang yang sama, presipitator disebut *Single-Stage Electrostatic Precipitators*. Prosesnya satu tahap menggunakan tegangan sangat tinggi (50 hingga 70 kV) untuk mengisi partikel.

Dalam presipitator dua tahap, partikel diisi oleh tegangan rendah dalam satu ruang, dan kemudian dikumpulkan oleh permukaan bermuatan berlawanan di ruang kedua. Tegangan arus searah diterapkan untuk

pengisian partikel sekitar 12 hingga 13 kV. Alat pengendap dua tahap awalnya dirancang untuk pemurnian udara dalam hubungannya dengan sistem pendingin udara

c. Suhu operasi, terbagi menjadi *hot-side* dan *cold-side*

Electrostatic Precipitator juga dikelompokkan menurut suhu gas buang. Electrostatic Precipitator sisi dingin digunakan untuk gas buang yang memiliki suhu kira-kira 204 °C (400 °F). Electrostatic Precipitator sisi panas digunakan untuk gas buang yang memiliki suhu lebih dari 300 °C (572 °F). Electrostatic Precipitator sisi panas memiliki beberapa kelemahan karena suhu gas buang lebih tinggi, volume gas yang diolah di Electrostatic Precipitator lebih besar. Akibatnya, ukuran keseluruhan dari alat pengendap menjadi lebih besar sehingga lebih mahal. Kerugiannya meliputi masalah struktural dan mekanik yang terjadi pada cangkang pengendap dan struktur pendukung sebagai akibat dari perbedaan ekspansi termal.

d. Metode penghilangan partikel, terbagi menjadi kering dan basah.

Electrostatic Precipitator basah digunakan untuk aplikasi industri di mana potensi ledakannya tinggi atau saat debu sangat lengket, korosif, atau memiliki resistivitas sangat tinggi. Aliran air dapat diterapkan terus menerus untuk mencuci partikel yang terkumpul dari elektroda pengumpul. Sebagian besar Electrostatic Precipitator dioperasikan dalam keadaan kering dan menggunakan rapper untuk menghilangkan materi

partikulat yang terkumpul. Itu istilah kering digunakan karena partikel yang dikumpulkan dalam keadaan kering dan dihilangkan dengan cara memukul pelat untuk menjatuhkan debu (Shah, 2017).

F. Kinerja Electrostatic Precipitator

Jika sebuah Elektrostatic Precipitator didesain dengan tepat, operasi yang benar, maintenance yang teratur dan berkelanjutan maka unit tersebut akan mencapai kinerja yang optimal.

Terdapat faktor–faktor yang mempengaruhi kinerja Electrostatic Precipitator dalam sistem pengendapan debu gas buang adalah sebagai berikut :

- a. 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.
- b. 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.
- c. 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 Electrosatic Precipitator, Untuk kondisi tekanan atmosferis, suhu dijaga antara 100 – 120 °C, dimana kondisi paling baik dicapai pada suhu 110 °C. Apabila tekanan gas bertambah maka efisiensi akan bertambah, karena dapat mengurangi mobilitas ion sehingga proses pemisahan material dapat lebih baik.

- d. Jarak antar elektroda juga sangat berpengaruh terhadap efisiensi Electrosatic Precipitator. Jarak yang terlalu jauh akan menurunkan efisiensi, sedangkan jarak yang terlalu dekat bisa menimbulkan spark yang tinggi dan berakibat pada deformasi collecting plate
- e. Tegangan dan arus yang diberikan akan mempengaruhi kuat medan elektrostatik dalam separating area. Apabila tegangan rendah maka kuat medan elektrostatik (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.
- f. Luas bidang penangkapan/pengendapan sangat berpengaruh terhadap

efisiensi (Prayitno dan Indrati, 2007).

g. Resistifitas Partikel. Resistifitas partikel adalah suatu ukuran resistansi/tahanan partikel terhadap listrik. Resistifitas sangat penting dalam mempengaruhi efisiensi Electrostatic Precipitator. Satuan untuk resistifitas adalah $\Omega \cdot \text{cm}$. Adapun persamaan resistifitas partikel, yaitu:

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

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

R = Tahanan (Ω)

A = luas penampang (cm^2)

l = Panjang penghantar (cm)

Nilai resistifitas material umumnya berada di rentang 10^{-3} sampai 10^{14} $\Omega \cdot \text{cm}$, sedangkan nilai resistivitas partikel yang baik untuk Electrostatic Precipitator adalah 107 - 1010 $\Omega \cdot \text{cm}$ (Afrian, dkk., 2015).

Menyadari pentingnya alat Electrostatic Precipitator, diperlukan adanya analisis kinerja untuk mengetahui efisiensi dan faktor-faktor yang dapat mempengaruhi sistem tersebut agar kinerja alat tetap optimal.

Penentuan nilai efisiensi Electrostatic Precipitator dikemukakan oleh Evald Anderson pada tahun 1919 dan Walther Deutsch pada tahun 1922, yang dikenal sebagai persamaan Deutsch-Anderson yaitu :

$$\eta_i = 1 - \exp\left(-\frac{A \cdot \omega_i}{Q}\right) = 1 - \exp\left(-\frac{L_{NE} \cdot \omega_i}{v_0 \cdot s}\right) \dots \dots \dots (2)$$

Jika disederhanakan menjadi :

$$\eta = 1 - e^{-\frac{A}{Q} \times \omega} \dots \dots \dots (3)$$

η = Efisiensi penangkapan Electrostatic Precipitator

A = Luas efektif collecting plate dalam Electrostatic Precipitator (m^2)

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

e = Bilangan natural 2,718

ω = Kecepatan migrasi (m/s)

Persamaan lain untuk mencari kecepatan migrasi yaitu :

$$\omega = -\frac{Q}{A} \times \ln(1 - \eta) \dots \dots \dots (4)$$

ω = Kecepatan migrasi partikel (m/s)

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

A = Luas media penangkap (m^2)

η = Efisiensi Electrostatic Precipitator

(Sepfitrah dan Rizal, 2015).

G. Aspek Ekonomi Electrostatic Precipitator

Suatu alat akan menghasilkan kemampuan serta performa terbaik dalam keadaan masih baru. Untuk menjaga kinerja dari suatu mesin diperlukan kebijakan penjadwalan dan tindakan perawatan yang tepat. Kebijakan tersebut diputuskan dengan dasar bahwa tindakan serta

penjadwalan perawatan dilakukan dengan total biaya yang paling optimal. Biaya tersebut selain dapat memenuhi untuk perawatan mesin namun juga tidak merugikan perusahaan. Perawatan pada suatu alat dilaksanakan sebagai upaya untuk mengurangi percepatan kerusakan mesin yang kemudian berakibat pada hasil output yang tidak optimal. Pada setiap alat pastilah memiliki efisiensi. Hal tersebut menunjukkan bahwa efisiensi pada alat tersebut akan meminimasi biaya perawatan (Fauziyyah dan Sriyanto, 2015).

Perawatan atau *maintenance* adalah aktivitas yang dilaksanakan agar suatu komponen atau sistem yang rusak dapat dikembalikan atau diperbaiki dalam suatu kondisi tertentu pada periode tertentu (Nurfaizah, 2014). *Maintenance* adalah aktivitas pendukung bagi kegiatan komersil, maka seperti kegiatan lainnya, *maintenance* harus efektif dengan biaya rendah. Dengan adanya kegiatan *maintenance* ini, maka mesin atau peralatan dapat digunakan sesuai dengan rencana dan tidak mengalami kerusakan selama jangka waktu tertentu yang telah direncanakan tercapai (Hutagaol, 2009).

Biaya perawatan dapat dihitung dengan metode *repair policy* dengan menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$TCr = B \times Cr \dots\dots\dots (5)$$

$$B = \frac{N}{Tb} \dots\dots\dots (6)$$

$$Tb = P_i \times T_i \dots\dots\dots(7)$$

TCr : expected cost of repair/bulan.

B : Jumlah rata-rata breakdown tiap bulan

N : Jumlah mesin

Cr : Biaya perbaikan.

Tb : Rata-rata runtime per mesin sebelum rusak.

(Fauziyyah dan Sriyanto, 2015).

H. Dampak Ekonomi Paparan Fly Ash Terhadap Kesehatan

Masyarakat

Menurut Mukono (2010), baik gas maupun partikel yang berada di atmosfer dapat menyebabkan kelainan pada tubuh manusia. Secara umum baik gas maupun partikel yang berada di atmosfer dapat menyebabkan kelainan pada tubuh manusia. Secara umum efek pencemaran udara terhadap individu atau masyarakat dapat berupa penyakit baik yang akut maupun kronis.

Secara umum efek pencemaran udara terhadap saluran pernafasan dapat menyebabkan terjadinya :

1. Iritasi pada saluran pernafasan. Hal ini dapat menyebabkan pergerakan silia menjadi lambat, bahkan dapat terhenti, sehingga tidak dapat membersihkan saluran pernafasan.
2. Peningkatan produksi lendir akibat iritasi oleh bahan pencemar.
3. Produksi lendir dapat menyebabkan penyempitan saluran pernafasan.

4. Rusaknya sel pembunuh bakteri di saluran pernapasan
5. Pembengkakan saluran pernapasan dan merangsang pertumbuhan sel, sehingga saluran pernapasan menjadi menyempit.
6. Lepasnya silia dan lapisan sel selaput lendir.
7. Akibat dari hal tersebut di atas, akan menyebabkan terjadinya kesulitan bernapas sehingga benda asing termasuk bakteri/mikroorganisme lain tidak dapat dikeluarkan dari saluran pernapasan dan hal ini akan memudahkan terjadinya infeksi saluran pernapasan.

Dampak dari pencemaran udara terhadap kesehatan pada akhirnya akan menimbulkan beban ekonomi (economic burden) yang harus ditanggung oleh masyarakat. Beban ekonomi dari suatu penyakit meliputi tiga komponen biaya, yaitu: biaya langsung (direct cost), biaya tidak langsung (indirect cost), dan biaya yang bersifat tidak nyata (intangibile cost). Biaya langsung berupa penggunaan sumberdaya untuk merawat dan mengobati sakit, yang dibedakan ke dalam dua jenis, yaitu biaya kesehatan (medical cost), seperti biaya berobat dan jasa konsultasi medis serta biaya non-kesehatan (non-medical cost) seperti transportasi menuju dan akomodasi selama di tempat berobat. Biaya tidak langsung merupakan nilai sumber daya yang hilang, yang meliputi biaya morbiditas dan mortalitas, biaya pengobatan informal, dan biaya kehilangan akibat tindakan kriminal. Sementara itu, intangibile cost merupakan jenis biaya yang sulit diukur karena terkait dengan perasaan, baik fisik dan psikologi,

seperti sakit, menderita, dan tidak nyaman (Mursinto dan Kusumawardani, 2016).

Tabel 2. Matriks Penelitian Terdahulu

| No | Nama Pengarang | Judul | Sumber | Tahun Terbit | Tujuan Penelitian | Hasil Penelitian |
|----|---|--|---|--------------|--|--|
| 1 | Nur H. T. Molek, Saputri A. Ranelda, S. Syaiful | Performa cyclone dan Electrostatic Precipitator Sebagai Penangkap Debu pada Pabrik Semen | Jurnal Teknik Kimia NO.1 Vol. 26 | 2020 | Untuk mengetahui efisiensi cyclone dan Electrostatic Precipitator pada industry semen | Hasil evaluasi menunjukkan efisiensi cyclone sebesar 95.5% dan Electrostatic Precipitator sebesar 98.72%. |
| 2 | Viviek Singh, Dr. A.C. Tiwari | Performance Analysis of Electrostatic Precipitator in Thermal Power Plant | International Journal of Mechanical Engineering And Technology Volume 3 pp. 431-436 | 2012 | Untuk mengetahui pengaruh ; 1. Resistivitas <i>Fly Ash</i> 2. Tegangan DC 3. Insulator 4. Suhu gas inlet 5. Kecepatan gas inlet 6. Kandungan sodium dalam ash Terhadap | 1. Semakin tinggi resistivitas maka efisiensi performa Electrostatic Precipitator semakin menurun 2. Semakin tinggi tegangan maka efisiensi semakin naik 3. Penggunaan material keramik seperti porcelain alumina, alumina silicon nitride, dan silica dapat digunakan sebagai insulator tegangan tinggi yang baik |

- | | | | | | | |
|----------|--|---|---|---|--|---|
| | | | | efisiensi Electrosatic Precipitator | <p>4. Suhu optimum yang didapatkan dari percobaan adalah 100 °C dengan efisiensi Electrosatic Precipitator 96%</p> <p>5. Menurunkan kecepatan gas masuk akan meningkatkan Efisiensi penangkapan dalam Electrosatic Precipitator</p> <p>6. Semakin tinggi kandungan sodium dalam ash akan menghasilkan emisi yang paling kecil, dan semakin kecil emisi maka kerja Electrosatic Precipitator tidak terlalu besar maka efisiensi akan semakin naik</p> | |
| 3 | V. Arrondel, G. Bacchiega, and M. Hamlil | The Electrostatic Precipitator External Parameters at The Heart of Dust Collection Efficiency | Internation al Journal of Plasma Environm etal Science & Technolog y, Vol. 6, No. 1 | 2012 | Untuk mengetahui pengaruh <ol style="list-style-type: none"> 1. Karakteristik batu bara 2. Kualitas pembakaran 3. Proses SCR (Selective Catalytic | <p>1. Untuk mengontrol emisi partikulat maka diperlukan komposisi campuran batu bara yang baik. Kandungan sodium dan besi yang rendah dan kandungan kalsium yang tinggi menaikkan resistivitas dari ash</p> |

Performance

Reduction

2. Kandungan sodium dan besi yang tinggi dengan kandungan kalsium yang rendah menurunkan resistivitas dari ash

Kualitas Pembakaran

Kualitas pembakaran sangat berpengaruh terhadap efisiensi Electrostatic Precipitator. Jika pembakaran tidak sempurna, maka ash akan mengandung banyak unburnt carbon. Banyaknya carbon yang terkandung dalam ash akan menurunkan resistivitas partikel dari ash sehingga akan menurunkan efisiensi penangkapan. Kondisi ini dapat dicegah dengan cara menggiling batu bara sampai memiliki ukuran $>150 \mu$. Kondisi operasi dan desain dari burner dan boiler juga harus dioptimalkan untuk mencegah hal-hal yang dapat membuat pembakaran menjadi tidak

- sempurna.
Proses SCR (Selective Catalytic Reduction)
Dengan melakukan proses SCR maka akan dihasilkan partikel submicron, molekul SO₃, dan perubahan kohesi partikel sehingga dapat menaikkan efisiensi dari Electrosatic Precipitator
- 4** Madhab Chandra Jena, Sarat Kumar Mishra, Himinshu Sekhar Maoharana
Effect of Particle Size on Collection Efficiency of Electrosatic Precipitator and RABH
Springer 2019
Untuk mengetahui Ukuran partikel optimum terhadap efisiensi Electrosatic Precipitator
- 5** Prayitno dan Tunjung Indrati
Kajian Sistem Electrostatic Precipitator untuk Pengendalian Debu Gas Buang
Prosiding Pertemuan dan Persentasi Ilmiah Teknologi Akselerator dan
2007
Mengetahui desain Electrosatic Precipitator serta factor-faktor yang berpengaruh terhadap efisiensi Electrosatic Precipitator
- Efisiensi pengumpulan pada Electrosatic Precipitator lebih tinggi pada ukuran partikel dengan ukuran lebih kecil dari 2 µm (PM 0.2) dan lebih besar dari 1 µm. Efisiensi menurun apabila ukuran partikel berada diantara ukuran 0.2 – 1 µm.
1. Kinerja Electrostatic precipitator sangat tergantung terhadap kecepatan udara masuk, suhu, tekanan operai, jarak antar elektroda, tegangan dan arus listrik yang masuk serta luas bidang penangkapan
 2. Dimensi alat Electrosatic

| | | | | | | |
|---|--|---|--|------|---|--|
| | | | Aplikasi a Vol. 9, p.68-75 | | | Precipitator : panjang plat elektroda : 4 m, jumlah plat : 8, tegangan listrik : 70.000 Kv, energy listrik : 140 kW |
| 6 | Changhang Zheng, Zhiyang Shen, Qianyun Chang, Qiufeng Shu, Xinbo Zhu, Xiang Gao. | Experimental Study on Electrostatic Precipitation of Low-Resisvity High-Carbon <i>Fly Ash</i> at High Temperature | ACS Publication | 2017 | <ol style="list-style-type: none"> 1. Mengetahui pengaruh suhu terhadap efisiensi EP 2. Mengetahui pengaruh kandungan karbon terhadap resistivitas <i>Fly Ash</i> | <ol style="list-style-type: none"> 1. Efisiensi menurun diiringi dengan kenaikan suhu. Rentang suhu 363 K – 523 K efisiensi EP berada di 95% 2. Semakin rendah kadar carbon dalam ash maka resistivitas menjadi $1.01 \times 10^8 \Omega\text{-cm}$ dimana rentang resistivitas paling optimum $10^7 - 10^{10} \Omega\text{-cm}$ |
| 7 | C R Mohanty, A K Swar, B C Meikap, and J N Sahu | Studies on Factors Influencing <i>Fly Ash</i> Resisvity From Electrostatic Precipitator – with reference to India | Journal of Scientific & Industrial Research Vol 70, September 2011, pp 785-803 | 2011 | Mengetahui efek resistivitas <i>Fly Ash</i> terhadap performa dari EP | Efisiensi EP paling tinggi berada pada flyash dengan resistivitas $1. \times 10^{10}$ yaitu efisiensi 98%. Efisiensi menurun saat resistivitas $> 1. \times 10^{11}$ karena resistivitas yang tinggi akan memicu penurunan voltase. |

I. Kerangka Pikir

Instalasi Pembangkit Listrik Tenaga Uap merupakan salah satu contoh industri yang berpotensi besar terhadap pencemaran lingkungan terutama disebabkan oleh emisi debu yang dikeluarkan. Hal ini dapat dipahami karena PLTU umumnya menggunakan batu bara sebagai bahan bakar. Kebijakan pengelolaan lingkungan hidup pada kegiatan industri listrik ditetapkan melalui Undang-Undang RI No. 23 tahun 1997 tentang Pengelolaan Lingkungan Hidup. Peraturan Pemerintah Republik Indonesia No.27 Tahun 1999 tentang Analisis Mengenai Dampak Lingkungan dan Pedoman tentang pelaksanaannya yang dikeluarkan oleh Menteri Negara Lingkungan Hidup serta peraturan-peraturan lain yang berkenaan dengan kebijakannya pengelolaan lingkungan hidup. Salah satu adalah peraturan baku emisi tahun 2000 atau BME 2000. Debu yang emisinya melebihi ambang batas yang telah ditetapkan dapat mengakibatkan berlebihan polusi udara disekitar areal.

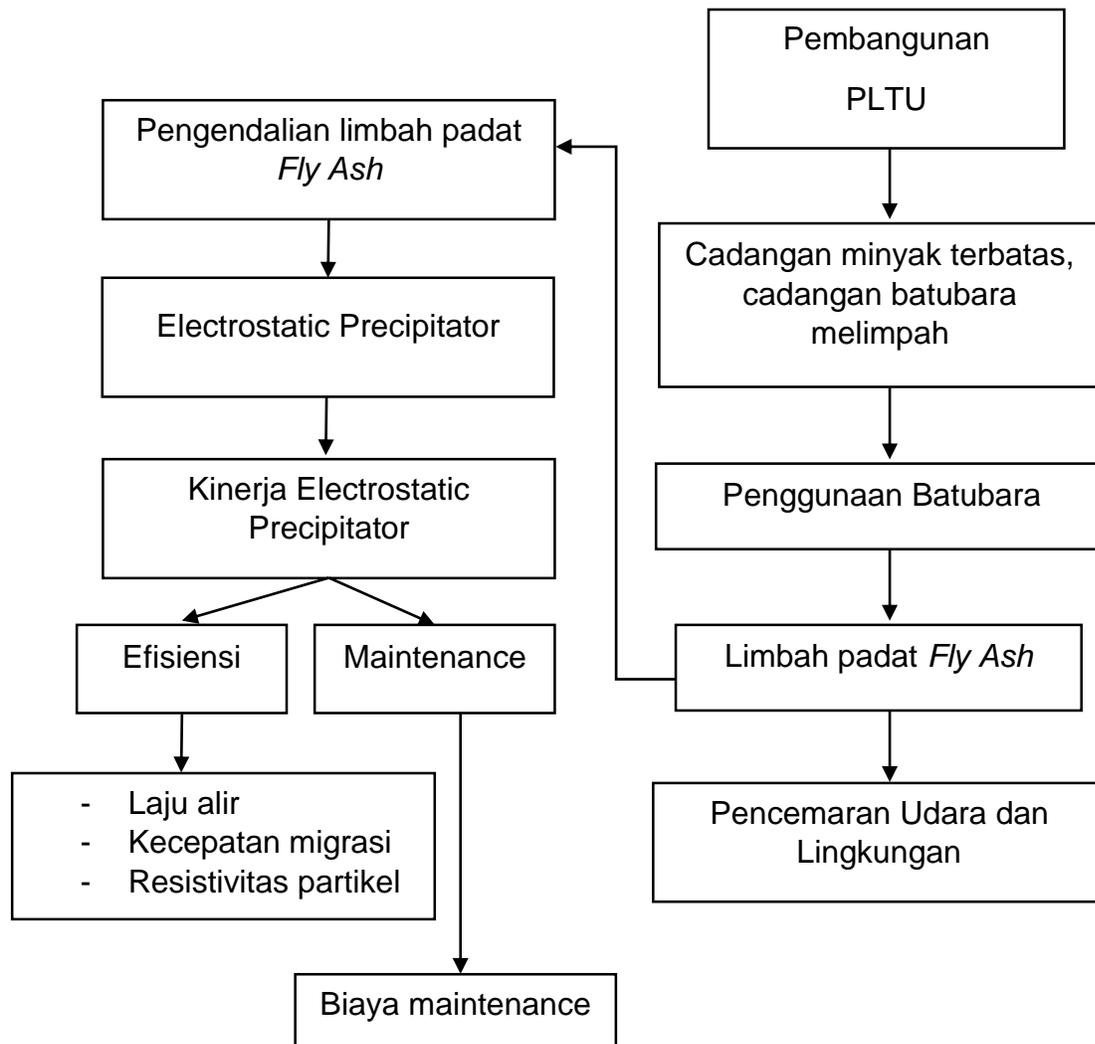
Debu yang emisinya melebihi ambang batas yang telah ditetapkan dapat mengakibatkan berlebihan polusi udara disekitar areal pabrik. Untuk mengurangi kadar debu yang keluar bersama gas, maka debu tersebut harus ditangkap/diendapkan terlebih dahulu sebelum gas dilepaskan ke udara. Seiring dengan perkembangan teknologi dan kesadaran manusia akan kesehatan lingkungannya, maka teknologi pemeliharaan lingkungan semakin dikembangkan, misalnya dengan menciptakan alat penangkap debu pada gas

emisi pabrik. Contoh industri dalam kemajuan tersebut juga dialami oleh PLTU, yang menggunakan sistem penangkap debu yaitu Electrostatic Precipitator.

Banyaknya debu yang dapat ditangkap tergantung pada efisiensi Electrostatic Precipitator. Efisiensi tinggi menghasilkan kinerja alat yang optimal. Berdasarkan persamaan Deutsch-Anderson efisiensi Electrostatic Precipitator secara langsung berkaitan dengan laju alir gas masuk dan kecepatan migrasi.

Laju alir yang besar dan tidak didukung oleh spesifikasi tertentu, akan menyebabkan beban alat semakin besar sehingga menurunkan efisiensi alat dan dapat memperpendek umur alat. Kecepatan migrasi adalah kecepatan gerak partikel untuk mencapai area pengumpul saat partikel diionisasikan sehingga faktor ini menjadi sangat krusial dalam proses penengendapan *Fly Ash* dalam Electrostatic Precipitator.

Aspek ekonomi pun harus diperhitungkan dalam penelitian ini. Salah satu aspek ekonomi adalah biaya yang dikeluarkan perusahaan untuk melakukan perawatan. Jika kegiatan perawatan dilaksanakan secara rutin, kinerja alat dapat dipertahankan dalam kondisi yang optimal. Pencemaran udara berupa paparan fly ash berdampak terhadap kesehatan dan pada akhirnya akan menimbulkan beban ekonomi (*economic burden*) yang harus ditanggung oleh masyarakat. Perkiraan biaya yang dikeluarkan kemudian dimasukkan kedalam penelitian ini untuk dijadikan sebagai aspek social secara eksternal.



Gambar 4. Kerangka Pikir