

[1] **Kajian Desain Cerobong Asap Terhadap Emisi PM₁₀ dan SO₂ Akibat Pembakaran Batubara di PLTU PT. X**

WINONA MAHESWARI RAMADHAN, JULI SOEMIRAT, DYAH ASRI HANDAYANI.

Jurusan Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, ITENAS Bandung

Email: maheswariwinona@gmail.com

ABSTRAK

PLTU berbahan bakar batubara PT. X direncanakan untuk memenuhi kebutuhan listrik pada proses produksi pelet plastik, kemasan gelas plastik air minum dan karung plastik. Kapasitas PLTU yang akan dibangun adalah 2 x 6 MW. Polutan utama akibat kegiatan ini yaitu PM₁₀ yang dapat menyebabkan penurunan fungsi paru-paru dan gas SO₂ yang dapat menyebabkan penyakit pernapasan. PT. X menggunakan ESP dengan efektifitas 95% untuk mengendalikan emisi PM₁₀. Penelitian ini dilakukan untuk mengkaji desain cerobong dan mengkaji kesesuaian penggunaan electrostatic precipitator (ESP) pada parameter PM₁₀. Prediksi laju emisi PM₁₀ dan SO₂ setelah PLTU beroperasi dilakukan menggunakan faktor emisi. Pemodelan dispersi udara menggunakan Model Gaussian. Desain cerobong PLTU memiliki tinggi 40,5 m, diameter 1,8 m, kecepatan alir gas buang 10 m/dtk dengan konsumsi batubara 280 ton/h. Hasil penelitian menunjukkan bahwa desain cerobong PLTU sudah optimal. Dengan desain demikian, konsentrasi emisi SO₂ (557,3) memenuhi baku mutu PERMEN LH No. 21 Tahun 2008 (750) dan konsentrasi udara ambien PM₁₀ dan SO₂ memenuhi baku mutu PP No. 41 Tahun 1999 di lokasi uji sekitar PLTU. Oleh sebab itu tidak diperlukan alat pengendali polutan SO₂. Parameter PM₁₀ tidak diatur dalam baku mutu udara emisi. Penggunaan cyclone jauh lebih efisien dan ekonomis dibandingkan dengan ESP sebagai alat pengendali partikulat.

Kata kunci: Model Gaussian, Faktor Emisi, Pembakaran Batubara, Pemodelan Udara

ABSTRACT

The coal-fired power plant PT. X is planned to meet the electric requirements for the production process of plastic pellets, plastic drinking glass and plastic bags. The power plant capacity to be built is 2 x 6 MW. The main pollutants as a result of this activity are PM₁₀ which can lead to decreased lung function and SO₂ gas that can cause respiratory, skin irritation. PT. X uses electrostatic precipitator (ESP) with 95% efficiency for controlling PM₁₀ emissions. This study was started with a review of the design of the chimney and to assess the suitability of the use of an electrostatic precipitator (ESP) on controlling PM₁₀ emissions. To predict the emission rates of PM₁₀ and SO₂ after the power-plant operates is done using emission factors. Pollutant dispersion modeling is done by using the Gaussian Model. The design of the chimney has a height of 40,5 m, 1,8 m in diameter, 10 m/s exhaust gas flow rate with 280 ton/day of coal consumption. The results showed that the power plant chimney design is optimum. With this design, the emission of SO₂ (557,3) complies to the emission standards PERMEN LH No. 21 2008 (750) and ambient concentrations of PM₁₀ and SO₂ complies to air

Penulis Pertama dan Penulis Kedua

quality standards PP No. 41 1999 at sampling point around the power plant area. Therefore it is not necessary to use SO₂ pollutant control equipment. The air quality standards do not regulate PM₁₀. In this study, the use of cyclones is much more efficient and economical than the ESP as a particulate control device.

Keywords: *Gaussian Model, Emission Factor, Coal Combustion, Air Pollution Model*

1. PENDAHULUAN

Perkembangan sektor industri yang terus meningkat memegang peranan penting dalam peningkatan pertumbuhan ekonomi di Indonesia. Seiring dengan perkembangan industri tersebut, manusia berupaya untuk memanfaatkan sumberdaya alam yang tersedia dan meningkatkan sumberdaya manusia yang dimiliki untuk dapat memenuhi kebutuhan hidupnya melalui teknologi. Untuk mendukung aktifitas industri, maka dibutuhkan energi yang cukup besar terutama untuk mendukung kegiatan produksi industri-industri besar.

PT. X merupakan salah satu industri yang membutuhkan energi listrik dalam kegiatan produksinya. PT. X merupakan industri daur ulang kertas yang akan mengembangkan sektor industrinya dalam bidang produksi pelet plastik, kemasan gelas plastik untuk air minum dan karung plastik. Untuk mempertahankan kehandalan proses produksi, PT. X akan membangun Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) dengan menggunakan bahan bakar batubara. Pemanfaatan energi listrik setelah PLTU terbangun digunakan untuk proses produksi plastik.

Proses operasi PLTU akan menghasilkan polutan berupa SO₂, NO₂, CO dan PM₁₀. Polutan utama dari kegiatan pembakaran batubara adalah SO₂ dan PM₁₀. Timbulnya gas SO₂ bersumber dari kandungan senyawa sulfur (S) dalam batubara. Sedangkan PM₁₀ timbul akibat abu sisa pembakaran batubara yang ikut terbawa ke luar melalui cerobong. PM₁₀ dan gas SO₂ yang diemisikan akan menyebar ke udara ambien sehingga akan menyebabkan terjadinya penurunan kualitas udara ambien.

Dampak akibat pencemaran SO₂ adalah meningkatnya tingkat morbiditas, insidensi penyakit pernapasan seperti *bronchitis*, *emphyesma* dan penurunan kesehatan umum (Soedomo, 2001). PM₁₀ merupakan partikulat tersuspensi yang mudah terhirup. PM₁₀ dapat masuk jauh ke dalam paru-paru dan menyebabkan penurunan fungsi paru-paru, batuk-batuk atau sulit bernapas, perkembangan *bronchitis* kronis dan kematian dini pada pengidap penyakit jantung atau paru-paru (Vallius & Marko, 2005).

Maksud dari penelitian ini yaitu:

- Mengetahui konsentrasi PM₁₀ dan SO₂ di lokasi rencana cerobong PLTU PT. X terbangun dan di tiga lokasi searah dengan arah angin dominan,
- Mengetahui perbedaan konsentrasi PM₁₀ dan SO₂ di lokasi uji sebelum dan setelah PLTU terbangun.

Sedangkan tujuan penelitian yaitu:

- Mengkaji desain cerobong asap PLTU PT. X terhadap parameter PM₁₀ dan SO₂,
- Mengkaji kesesuaian penggunaan *electrostatic precipitator* pada parameter PM₁₀ di PLTU berkapasitas 2 x 6 MW,

- Mencari alat pengendali pencemaran udara yang memiliki efektifitas optimal dan harga ekonomis dengan menghitung perkiraan biaya modal dan biaya tahunan yang dibutuhkan.

2. METODOLOGI

2.1 Metoda Penelitian

Terdapat beberapa parameter yang harus diperhatikan dalam memprediksi besarnya polutan yang dikeluarkan oleh cerobong. Besarnya nilai parameter ini dapat diambil dari data sekunder yang didapat dari literatur atau dari sumber lain serta diambil dari data primer dengan pengukuran dan perhitungan secara langsung.

Pengumpulan Data Sekunder

Pengumpulan data sekunder meliputi data klimatologi seperti kecepatan dan arah angin. Data tersebut berasal dari Stasiun Geofisika Bandung di Jalan Cemara. Data sekunder lainnya didapatkan dari studi literatur serta data dari informasi lain yang dianggap valid.

Pengumpulan Data Primer

Pengumpulan data primer meliputi pengambilan sampel kualitas udara di lapangan. Parameter yang diambil adalah partikulat dan SO_2 sebagai data awal (*ambient air quality*). *Sampling* kualitas udara ambien dilakukan pada radius 368 m, 930 m dan 2.278 m dari lokasi rencana cerobong PLTU. Hasil uji kemudian dibandingkan dengan PP No. 41 Tahun 1999 Tentang Pengendalian Pencemaran Udara dan PERMEN LH No. 21 Tahun 2008 Tentang Baku Mutu Emisi Sumber Tidak Bergerak Bagi Usaha Dan/Atau Kegiatan Pembangkit Tenaga Listrik Termal.

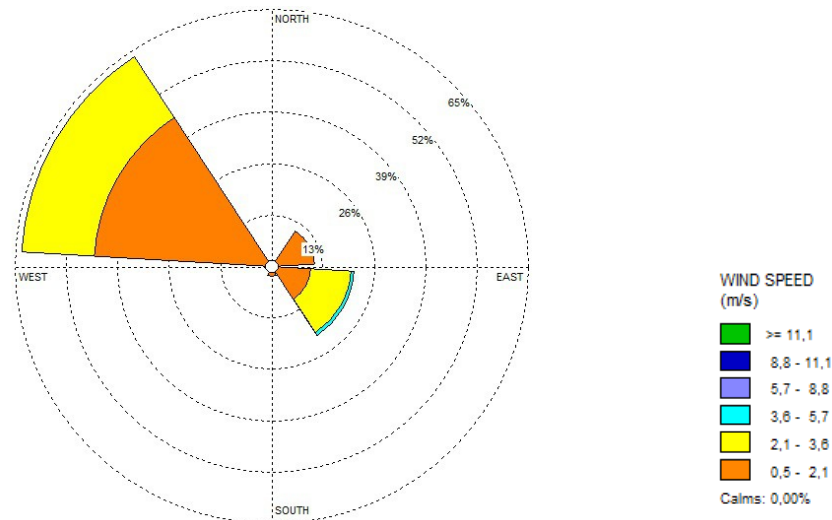
2.2 Metoda Pengukuran PM_{10} dan SO_2

Pengukuran PM_{10} dilakukan menggunakan alat *High Volume Air Sampler* (HVAS) dengan metoda gravimetri sesuai dengan ketentuan SNI 19-7119.3-2005 dengan waktu pengukuran selama 1 jam. Sedangkan pengukuran gas SO_2 dilakukan menggunakan alat spektrofotometer dengan metoda pararosanilin sesuai dengan ketentuan SNI 19-7119.7-2005 dengan waktu pengukuran selama 1 jam.

3. ISI

3.1 Data Meteorologi Kecepatan dan arah angin

*Kajian Desain Cerobong Asap Terhadap Emisi PM₁₀ dan SO₂
Akibat Pembakaran Batubara di PLTU PT. X*



Sumber: Hasil pengolahan data sekunder, 2015.

Gambar 1. Wind Rose Tahun 2004 - 2013

Wind rose didapatkan berdasarkan hasil pengolahan data arah dan kecepatan angin yang didapatkan dari Stasiun Geofisika Kota Bandung menggunakan *software WRPLOT VIEW™ – Wind Rose Plots for Meteorological Data*, versi 7.0.0. Penentuan arah transportasi polutan dari sumbernya ditentukan dengan arah angin pada sumber emisi. Arah angin dominan Kota Bandung bertiup dari arah Barat dan Barat Laut menuju Timur dan Tenggara. Persentase kecepatan angin yang bertiup sekitar 45% angin dengan kecepatan 0,5 - 2,1 m/detik dan sekitar 64% angin dengan kecepatan 2,1 - 3,6 m/detik.

3.2 Data Desain Cerobong PLTU PT. X

Pengoperasian PLTU batubara dan cemaran emisi gas buangnya tergantung pada jenis batubara yang digunakan untuk bahan bakar. Spesifikasi batubara yang akan digunakan PT. X dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Karakteristik Batubara

No.	Uraian	Satuan	Nilai
1.	Kebutuhan bahan bakar batubara	ton/hari	280
2.	Kandungan abu dalam batubara	%	2,58
3.	Total sulfur dalam batubara	%	0,23
4.	Kandungan Nitrogen	%	0,91
5.	Kadar air total	%	34,36
6.	Materi organik	%	43,04
7.	Kandungan hidrogen	%	4,01
8.	Kandungan karbon	%	60,88
9.	Jenis batubara	-	Bitumen

Sumber: PT. X, 2015.

Rencana PLTU PT. X ini hanya menggunakan 1 buah cerobong dengan 2 (dua) buah *inlet* gas buang yang berasal dari *boiler* satu dan *boiler* dua. Salah satu *boiler* beroperasi sedangkan yang satu sebagai lagi cadangan. Jalur masuk (*inlet*) tersebut dilengkapi dengan dua buah alat pengendali udara jenis *Electrostatic Precipitator* (ESP). Spesifikasi cerobong PT. X dapat di lihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Spesifikasi Alat Pengendali Pencemaran Udara dan Cerobong

No.	Uraian	Satuan	Nilai
1.	Effisiensi alat pengendali udara (ESP)	%	95
2.	Tinggi cerobong	m	40,5
3.	Diameter cerobong bagian atas	m	1,8
4.	Temperatur <i>flue gas</i>	°C	140
5.	Kecepatan alir <i>flue gas</i>	m/detik	10
6.	Volume <i>flue gas</i>	m ³ /detik	25,4
7.	Jenis tungku pembakaran (<i>furnace</i>)	-	<i>Tangential fired, dry bottom</i>

Sumber: PT. X, 2015.

3.3 Kualitas Udara Ambien

Pengujian kualitas udara ambien parameter PM₁₀ dan SO₂ dilakukan untuk dapat memprediksikan konsentrasi PM₁₀ dan SO₂ sebelum dan setelah PLTU beroperasi. Peta lokasi pengukuran kualitas udara ambien dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Peta Lokasi Pengukuran Kualitas Udara Ambien

Konsentrasi PM₁₀ yang diperoleh berdasarkan hasil pengukuran di lapangan selama 1 jam perlu dikonversi untuk mendapatkan konsentrasi dengan waktu pengukuran 24 jam, sesuai dengan baku mutu PP No. 41 Tahun 1999. Konversi berdasarkan pada model konversi Canter sebagai berikut (Gindo S & Hari H, 2007):

$$C_1 = C_2$$

Keterangan: C_1 = konsentrasi udara rata-rata dengan lama pencuplikan contoh t_1 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

C_2 = konsentrasi udara rata-rata dengan lama pencuplikan contoh t_2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

t_1 = lama pencuplikan contoh 1 (24 jam)

t_2 = lama pencuplikan contoh 2 dari hasil pengukuran contoh udara (jam)

p = faktor konversi dengan nilai antara 0,17 dan 0,2

Contoh perhitungan di lokasi tapak proyek cerobong PLTU:

$$= 27,87 \mu\text{g}/\text{Nm}^3 = 16,24 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$$

Tabel 3 - Tabel 6 merupakan hasil uji kualitas udara ambien di lokasi rencana cerobong PLTU PT. X dan di tiga lokasi uji yang telah dikonversi untuk waktu pengukuran selama 24 jam.

Tabel 3. Kualitas Udara Ambien di Tapak Proyek Cerobong PLTU

No.	Parameter	Satuan	Hasil Uji	Baku Mutu	Metoda
1.	Sulfur Dioksida (SO ₂)	µg/Nm ³	38,93	900	SNI 19-7119.7-2005
2.	PM ₁₀	µg/Nm ³	16,24	150	SNI 19-7119.3-2005
Keterangan pengambilan contoh uji:					
1.	Temperatur Udara	°C	30,2	-	Termometer
2.	Kelembaban	%	51,5	-	Higrometer
3.	Angin dari Arah	°	50	-	Kompas
4.	Kecepatan Angin	m/detik	0,0 – 2,5	-	Anemometer
5.	Kondisi Cuaca	-	Cerah	-	-
6.	Tekanan Udara	mBar	924,86	-	Barometer

Sumber: Data Primer (Pengukuran di Lapangan), 2015.

Keterangan:

- Lokasi *sampling* di area *power plant* (PLTU) direncanakan. Pada koordinat 06°58'25.4"LS 107°41'26.7"BT dan elevasi 663 m
- Baku mutu berdasarkan Peraturan Pemerintah No. 41 Tahun 1999, Tentang Pengendalian Pencemaran Udara.

Tabel 4. Lokasi uji 1 – Jarak 368 m

No.	Parameter	Satuan	Hasil Uji	Baku Mutu	Metoda
1.	Sulfur Dioksida (SO ₂)	µg/Nm ³	19,10	900	SNI 19-7119.7-2005
2.	PM ₁₀	µg/Nm ³	2,04	150	SNI 19-7119.3-2005
Keterangan pengambilan contoh uji:					
1.	Temperatur udara	°C	33,2	-	Termometer
2.	Kelembaban	%	49,9	-	Higrometer
3.	Angin dari Arah	°	40	-	Kompas
4.	Kecepatan Angin	m/detik	0,0 – 2,5	-	Anemometer
5.	Kondisi Cuaca	-	Cerah	-	-
6.	Tekanan Udara	mBar	924,72	-	Barometer

Sumber: Data Primer (Pengukuran di Lapangan), 2015.

Keterangan:

- Lokasi uji di Desa Tegal Luar, Kec. Bojong Soang. Pada koordinat 06°58'58.2"LS 107°41'10.3"BT dan elevasi 664 m
- Baku mutu berdasarkan Peraturan Pemerintah No. 41 Tahun 1999, Tentang Pengendalian Pencemaran Udara.

Tabel 5. Lokasi uji 2 – Jarak 930 m

No.	Parameter	Satuan	Hasil Uji	Baku Mutu	Metoda
1.	Sulfur Dioksida (SO ₂)	µg/Nm ³	38,81	900	SNI 19-7119.7-2005
2.	PM ₁₀	µg/Nm ³	12,23	150	SNI 19-7119.3-2005
Keterangan pengambilan contoh uji:					
1.	Temperatur udara	°C	32,9	-	Termometer
2.	Kelembaban	%	53,1	-	Higrometer
3.	Angin dari Arah	°	100	-	Kompas
4.	Kecepatan Angin	m/detik	0,0 – 1,5	-	Anemometer
5.	Kondisi Cuaca	-	Cerah	-	-
6.	Tekanan Udara	mBar	925,12	-	Barometer

Sumber: Data Primer (Pengukuran di Lapangan), 2015.

Keterangan:

- Lokasi uji di Desa Tegal Luar, Kec. Bojong Soang. Pada koordinat 06°58'58.2"LS 107°41'36,0"BT dan elevasi 661 m

- Baku mutu berdasarkan Peraturan Pemerintah No. 41 Tahun 1999, Tentang Pengendalian Pencemaran Udara.

Tabel 6. Lokasi uji 3 – Jarak 2.278 m

No.	Parameter	Satuan	Hasil Uji	Baku Mutu	Metoda
1.	Sulfur Dioksida (SO ₂)	µg/Nm ³	43,11	900	SNI 19-7119.7-2005
2.	PM ₁₀	µg/Nm ³	4,04	150	SNI 19-7119.3-2005
Keterangan pengambilan contoh uji:					
1.	Temperatur udara	°C	27,1	-	Termometer
2.	Kelembaban	%	61,3	-	Higrometer
3.	Angin dari Arah	°	340	-	Kompas
4.	Kecepatan Angin	m/detik	0,0 – 1,0	-	Anemometer
5.	Kondisi Cuaca	-	Cerah	-	-
6.	Tekanan Udara	mBar	924,46	-	Barometer

Sumber: Data Primer (Pengukuran di Lapangan), 2015.

Keterangan:

- Lokasi uji di Desa Tegal Luar, Kec. Bojong Soang. Pada koordinat 06°59'17.8"LS 107°42'19.1"BT dan elevasi 666 m
- Baku mutu berdasarkan Peraturan Pemerintah No. 41 Tahun 1999, Tentang Pengendalian Pencemaran Udara.

Konsentrasi PM₁₀ dan SO₂ di seluruh lokasi uji sebelum PLTU terbangun memenuhi baku mutu kualitas udara ambien PP No.41 Tahun 1999 tentang Pengendalian Pencemaran Udara. Nilai konsentrasi yang terukur merupakan rona lingkungan awal ketiga lokasi tersebut tanpa ada sumber emisi lain.

3.4 Perhitungan

A. Laju Emisi

Faktor emisi ditentukan berdasarkan jenis tungku pembakaran yang digunakan pada proses pembakaran batubara untuk didapatkan nilai laju emisi yang dapat dilihat pada Tabel 7. Rumus yang digunakan untuk memprediksi nilai laju emisi dengan menggunakan faktor emisi adalah sebagai berikut (de Nevers, 2000):

$$(\text{Laju Emisi}) = (\text{Faktor emisi}) \times (\text{flow rate batubara})$$

Berdasarkan hasil perhitungan, laju emisi PM₁₀ dengan kandungan abu dalam batubara sebesar 2,58% adalah $8,73 \times 10^3$ mg/dtk dan laju emisi SO₂ dengan kandungan sulfur dalam batubara 0,23% adalah $12,74 \times 10^3$ mg/dtk.

Tabel 7. Faktor Emisi Pembakaran Batubara Bituminous dan Subbituminous Tanpa Alat Pengendali

No.	Jenis Tungku Pembakaran ^a	Faktor Emisi Pembakaran Batubara (lb/ton)	
1.	PC, wall-fired, dry bottom	2,3A	38S
2.	PC, wall-fired, wet bottom	2,6A	38S
3.	PC, tangential fired, dry bottom	2,3A	38S
4.	Spreader stoker	13,2	38S
5.	Hand fired	6,2	31S

Sumber: U.S. Environmental Protection Agency, 1995.

Keterangan: Tabel 1.1-3 dan 1.1-4. Bab 1.1 Bituminous And Subbituminous Coal Combustion.

^aJenis tungku pembakaran dijelaskan dalam EPA *Emission Factors Book*. PC adalah *pulverized coal*.

*Kajian Desain Cerobong Asap Terhadap Emisi PM₁₀ dan SO₂
Akibat Pembakaran Batubara di PLTU PT. X*

^b Nilai A pada kolom Seluruh Partikulat dan PM₁₀ merupakan persentase berat abu dalam batubara yang harus dikalikan dengan angka yang diberikan.

^c S = % Kandungan sulfur, fungsinya sama dengan A.

^d SO_x sebagai SO₂, termasuk SO₃ dan gas sulfat lainnya.

Setelah didapatkan laju emisi kedua parameter, kemudian dilakukan perhitungan konsentrasi PM₁₀ dan SO₂ yang diemisikan, sebagai berikut:

$$C_{PM_{10}} = \text{Laju emisi} \div \text{volume alir} = 8,73 \times 10^3 \div 25,4 = 343,7$$

$$C_{SO_2} = 12,74 \times 10^3 \div 25,4 = 501,57$$

Perhitungan pada kondisi standar (STP) Berdasarkan Hukum Boyle:

$$\begin{aligned} &= \\ \rightarrow &= \quad \rightarrow V_{\text{standar}} = \\ &= = 0,9 \text{ Nm}^3 \end{aligned}$$

Konsentrasi Emisi Polutan pada Kondisi standar (STP):

$$C_{PM_{10} (368,1.072,1,5)} = = = 381,89$$

$$C_{SO_2 (368,1.072,1,5)} = = = 557,3$$

Berdasarkan perhitungan, konsentrasi emisi gas buang PLTU parameter SO₂ memenuhi baku mutu kualitas udara emisi sebesar 750 . Standar baku mutu yang digunakan sebagai acuan yaitu PERMEN LH No. 21 Tahun 2008 Tentang Baku Mutu Emisi Sumber Tidak Bergerak Bagi Usaha Dan/Atau Kegiatan Pembangkit Tenaga Listrik Termal. Maka dari itu tidak diperlukan alat pengendali pencemaran udara untuk parameter SO₂. Sedangkan baku mutu emisi gas buang PM₁₀ tidak tercantum pada peraturan perundangan tersebut.

Sebagai upaya untuk mengurangi dampak negatif emisi PM₁₀ kegiatan operasional PLTU terhadap lingkungan hidup akibat emisi PM₁₀, PT. X menggunakan *electrostatic precipitator* atau ESP dengan efisiensi 95%. Konsentrasi emisi PM₁₀ yang semula 381,89 µg/Nm³ menjadi 19,09 µg/Nm³.

B. Penentuan Stabilitas Atmosfer

Berdasarkan data hasil pengukuran di lapangan dan Tabel 8, maka kelas stabilitas atmosfer di seluruh lokasi uji termasuk kelas A.

Tabel 8. Kelas Stabilitas Atmosfer

Kecepatan Angin (m/dtk)	Siang Hari			Malam Hari Tertutup Awan	
	Tinggi	Sedang	Rendah	Sebagian Besar Tertutup Awan	Sebagian besar Terang
Kelas	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
<2	A	A-B	B	E	F
2-3	A-B	B	C	E	F
3-5	B	B-C	C	D	E
5-6	C	C-D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D

Sumber: D. B. Turner, 1999.

C. Konstanta Parameter Dispersi dan Rumus yang Digunakan

Tabel 9. Nilai Konstanta Persamaan Penyebaran σ_y dan σ_z

Stabilitas	a	X < 1 km			X > 1 km		
		c	d	f	c	d	f
A	213	440,8	1,941	9,27	459,7	2,094	-9,6

Sumber: D. B. Turner, 1999.

Keterangan: b = 0,894 untuk semua kelas stabilitas.

D. Konsentrasi Polutan PM₁₀ dan SO₂

Konsentrasi PM₁₀ dan SO₂ dihitung berdasarkan rumus persamaan model gaussian pada kondisi temperatur dan tekanan standar atau *Standard Temperature and Pressure* (STP). Contoh perhitungan konsentrasi PM₁₀ dan SO₂ pada lokasi uji 1 adalah sebagai berikut.

Besarnya Nilai σ_y dan σ_z dengan x = 368 m dan y = 1.072 m (Cooper dan Alley, 1986):

$$\sigma_y = ax^b = 213 (0,368)^{0,894} = 87,15 \text{ m}$$

$$\sigma_z = cx^d + f = 440,8 (0,368)^{1,941} + 9,27 = 72,59 \text{ m}$$

Tinggi Kepulan (Δh) (Cooper dan Alley, 1986):

$$\Delta h = .$$

$$\Delta h = .$$

$$= 19,11 \text{ m}$$

Tinggi Cerobong Efektif (H) (Cooper dan Alley, 1986):

$$H = \Delta h + h = 19,11 \text{ m} + 40,5 \text{ m} = 59,61 \text{ m}$$

Koreksi Kecepatan Angin (Cooper dan Alley, 1986):

Berdasarkan Cooper dan Alley (1986), nilai eksponen P yang digunakan untuk kelas stabilitas A adalah 0,15. Maka koreksi kecepatan angin pada ketinggian cerobong adalah:

$$U_H = U_a = 2,5 = 4,16$$

Konsentrasi Polutan Berdasarkan Persamaan Gaussian Model Tiga Dimensi (x,y,z) (Cooper dan Alley, 1986):

$$C_{(x,y,z)} = \exp$$

Keterangan:

C = konsentrasi polutan pada koordinat x,y,z ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Q = laju emisi polutan (mg/m^3)

U_H = kecepatan angin rata-rata pada tinggi cerobong efektif (m/detik)

σ_y = koefisien dispersi horizontal (m)

σ_z = koefisien dispersi vertikal (m)

y = jarak horizontal terhadap sumbu x (m)

z = ketinggian atau jarak vertikal rata-rata orang dari permukaan tanah (m)

H = tinggi cerobong efektif (m)

$$C_{PM_{10}(368,1.072,1,5)} = x \exp x$$

$$= 9,94 \times 10^{-35} = 9,94 \times 10^{-32}$$

$$C_{SO_2 (368,1.072,1,5)} = x \exp x$$

$$= 1,59 \times 10^{-34} = 1,59 \times 10^{-31}$$

Perhitungan volume udara pada kondisi standar (STP) Berdasarkan Hukum Boyle:

=

$$\rightarrow V_{\text{standar}} = = = 0,89 \text{ Nm}^3$$

Konsentrasi Polutan pada Kondisi standar (STP):

$$C_{PM_{10} (368,1.072,1,5)} = = = 1,12 \times 10^{-31}$$

$$C_{SO_2 (368,1.072,1,5)} = = = 1,79 \times 10^{-31}$$

Perbandingan konsentrasi PM₁₀ dan SO₂ pada kondisi STP berdasarkan hasil perhitungan dengan kondisi aktual sebelum PLTU beroperasi dapat dilihat pada Tabel 10 berikut.

Tabel 10. Hasil Perhitungan Konsentrasi PM₁₀ dan SO₂ pada Kondisi STP

Lokasi Uji	Konsentrasi Sebelum PLTU Beroperasi		Kontribusi Tambahan Konsentrasi Setelah PLTU beroperasi	
	PM ₁₀	SO ₂	PM ₁₀	SO ₂
	Lokasi uji 1	2,04	19,10	1,12 x 10 ⁻³¹
Lokasi uji 2	12,23	38,81	0,46	0,66
Lokasi uji 3	4,04	43,11	0,82	1,2

Sumber: Perhitungan dan hasil uji lapangan, 2015.

Berdasarkan Tabel 10. kontribusi konsentrasi PM₁₀ pada ketinggian 1,5 m di atas permukaan tanah setelah PLTU terbangun di lokasi uji 1, lokasi uji 2 dan lokasi uji 3 memenuhi baku mutu kualitas udara ambien PP No. 41 Tahun 1999 tentang Pengendalian Pencemaran Udara yaitu 150 µg/Nm³. Begitu juga dengan SO₂ di seluruh lokasi uji memenuhi baku mutu PP No. 41 Tahun 1999 yaitu sebesar 900 µg/Nm³.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin jauh jarak suatu lokasi terhadap sumber emisi, semakin tinggi konsentrasi polutannya. Hal ini terjadi karena kecepatan angin yang kecil menyebabkan tingginya kenaikan *plume* yang berdampak pada semakin jauhnya daerah konsentrasi maksimum dari sumber polutan. Sebaliknya angin yang makin cepat menyebabkan kenaikan *plume* yang semakin kecil sehingga daerah terbentuknya konsentrasi maksimum berada semakin dekat dengan sumber dan pada kondisi tertentu konsentrasi maksimumnya akan semakin menurun karena proses pencampuran dengan udara yang semakin tinggi.

Konsentrasi emisi gas buang parameter PM₁₀ dan SO₂ yang rendah dan memenuhi baku mutu emisi diperkirakan karena kapasitas PLTU yang direncanakan PT. X rendah yaitu sebesar 2 x 6 MW. Di samping itu, batubara yang digunakan sebagai bahan bakar mengandung kandungan sulfur (0,23%), kandungan abu (2,58%) yang rendah dan kandungan karbon yang tinggi (60,88%). Di samping itu, kecepatan angin pada

ketinggian cerobong (40,5 m) cukup tinggi yaitu 4,16 m/dtk sehingga polutan akan segera terencerkan dalam volume udara yang besar. Akibatnya konsentrasi polutan menjadi rendah.

3.5 Estimasi Perhitungan Biaya dan Penggunaan Alat Pengendali Partikulat

A. *Electrostatic Precipitator*

Penggunaan ESP sebagai alat pengendali partikulat pada PLTU berkapasitas 2 x 6 MW kurang tepat karena emisi partikulat yang dihasilkan sangat kecil konsentrasinya. Penggunaan ESP juga bertujuan untuk kontrol partikulat toksik. Sedangkan partikulat hasil pembakaran batubara bukan merupakan partikulat toksik. Di samping itu, biaya modal dan biaya tahunan yang diperlukan sangat tinggi.

Berdasarkan hasil perhitungan, total modal biaya/*capital cost* alat ESP adalah sebesar Rp 14.000.000.000,00 dan total biaya tahunan/*annual cost* sebesar Rp 2.650.000.000,00 per tahun. Referensi cara perhitungan biaya modal berdasarkan Rikhter, L.A. et. al. (1991) dan perhitungan biaya tahunan berdasarkan Vatavuk dalam *Control Cost Spreadsheets* oleh U.S. EPA (1996).

3.6 *Cyclone*

Sebagai alternatif, kontrol PM₁₀ dapat menggunakan *cyclone*. Pemilihan *cyclone* sebagai alat pengendali partikulat dapat menekan pengeluaran biaya jika dibandingkan dengan menggunakan ESP. Estimasi harga 1 set unit *cyclone* adalah Rp 544.600.000,00 berdasarkan Henan Sunshings Import & Export Co., Ltd yang mampu menangani volume alir gas buang berkapasitas 25,4 m³/detik dan kecepatan alir gas buang sebesar 10 m/dtk. Berdasarkan perhitungan yang mengacu pada dokumen U.S. EPA (1998) dalam *Stationary Source Control Techniques Document for Fine Particulate Matter*, biaya modal *cyclone* termasuk biaya pemasangan alat, teknisi dan lainnya adalah sebesar Rp 680.750.000,00 dan biaya tahunan *cyclone* adalah sebesar Rp 158.029.000,00 per tahun.

Pemilihan unit *cyclone* memperhitungkan konsentrasi emisi PM₁₀ yang cukup tinggi yaitu 381,89 µg/Nm³. Di samping itu, menurut Miller (2015), efektifitas *cyclone* dalam menghilangkan PM₁₀ juga tinggi yaitu 95%. Kelebihan lainnya menurut literatur (Davis, Bounicore, & Theodore, 2000) *cyclone* tidak membutuhkan lahan yang luas, dapat beroperasi pada suhu tinggi, pemeliharaan mudah dan limbah yang dihasilkan kering. Hal tersebut sangat sesuai dengan rencana PT. X yang akan memanfaatkan limbah debu partikulat sebagai bahan baku batako, di mana limbah yang dibutuhkan berupa limbah partikulat kering.

4. KESIMPULAN

Konsentrasi PM₁₀ dan SO₂ berdasarkan hasil uji kualitas udara ambien di lapangan sebelum PLTU beroperasi di lokasi cerobong PLTU, lokasi uji 1, lokasi uji 2 dan lokasi uji 3 memenuhi baku mutu PP No. 41 Tahun 1999 Tentang Pengendalian Pencemaran Udara. Kontribusi konsentrasi PM₁₀ dan SO₂ setelah PLTU terbangun berdasarkan Model Gaussian sangat kecil, sehingga kualitas udara ambien pada seluruh titik uji masih memenuhi baku mutu PP No. 41 Tahun 1999 setelah PLTU beroperasi. Dapat disimpulkan bahwa desain cerobong asap PLTU PT. X sudah optimal. Berdasarkan hasil penelitian, kebutuhan batubara sebagai bahan bakar untuk operasional PLTU PT. X sebanyak 280 ton/hari menghasilkan konsentrasi emisi SO₂ yang memenuhi standar baku mutu. Sehingga dengan menggunakan desain cerobong tersebut dampak negatif dari emisi SO₂ dapat diminimalkan dan tidak dibutuhkan alat pengendali emisi SO₂. Penerapan ESP dengan efektifitas 95% merupakan pilihan yang kurang tepat untuk mengurangi emisi PM₁₀ pada operasional PLTU PT.X dikarenakan biaya modal dan biaya tahunan yang sangat tinggi. ESP juga digunakan untuk mengendalikan partikulat yang toksik, sedangkan emisi partikulat PLTU PT. X tidak bersifat toksik. Berdasarkan hal tersebut, alat pengendali partikulat pada PLTU PT. X yang lebih tepat adalah menggunakan *cyclone*. Biaya modal awal dan biaya tahunan yang dibutuhkan jauh lebih rendah dibandingkan dengan menggunakan ESP dengan efektifitas yang sama, yaitu 95%.

DAFTAR RUJUKAN¹

- Agus Gindo, S., Budi Hari H., (2007), Pengukuran Partikel Udara Ambien (TSP, PM₁₀, PM_{2,5}) di Sekitar Calon Lokasi PLTN Semenanjung Lemah Abang, Pusat Teknologi Limbah Radioaktif-Batan.
- Cooper, C. David, and Alley, F.C. 1986. "Air Pollution Control A Design Approach. Waveland Press, Inc., Long Grove, Illinois, USA.
- Badan Standardisasi Nasional. 2005. SNI 19-7119.3-2005. Udara ambien - Bagian 3: Cara uji partikel tersuspensi total menggunakan peralatan *high volume air sampler* (HVAS) dengan metoda gravimetri.
- Badan Standardisasi Nasional. 2005. SNI 19-7119.7-2005. Udara ambien - Bagian 7: Cara uji kadar sulfur dioksida (SO₂) dengan metoda pararosanilin menggunakan spektrofotometer.
- Boubel, R. W., Fox, D. L., Turner, D. B., & Stern, A. C. (1973). *Fundamentals of Air Pollution*. San Diego: Academic Press.
- Davis, W. T., Bounicore, A. J., & Theodore, L. (2000). Air Pollution Control Engineering Manual. In W. T. Davis, & W. T. Davis (Ed.), *Air Pollution Engineering Manual* (Second Edition ed., pp. 1-8). Canada: John Wiley & Sons, Inc.
- de Nevers, Noel. (2000). *Air Pollution Control Engineering* (International Editions ed., Vol. Second Edition). Singapore: McGraw-Hill Companies, Inc.
- Henan Sunsungs Import & Export Co., Ltd. (2014). *Sunsungs en Alibaba*. Retrieved 12 6, 2015, from Alibaba Group Website:
http://sunsungs.en.alibaba.com/product/60193785274801776759/Factory_Price_Industrial_Electrostatic_Precipitator_ESP_Dust_Collector_Electric_Dust_Catcher.html?

- biz_type=Notifications_MC&crm_mtn_tracelog_task_id=b1a41113-cdfe-45c5-969b-91fe470f61&crm_mtn_
- Miller, B. G. (2015). *Fossil Fuel Emissions Control Technologies - Stationary Heat and Power Systems*. Waltham, USA: Elsevier Inc.
- Peraturan Menteri Negara Lingkungan Hidup No. 21 Tahun 2008 Tentang Baku Mutu Emisi Sumber Tidak Bergerak Bagi Usaha Dan/Atau Kegiatan Pembangkit Tenaga Listrik Termal. Lampiran
- Peraturan Pemerintah No. 41 Tahun 1999 Tentang Pengendalian Pencemaran Udara.
- Rikhter, L.A. et. al. Improving the Efficiency of Removal of High-resistance Ash in Electrostatic Precipitators by Chemical Conditioning of Flue Gases. *Thermal Engineering*. 38:3. March 1991.
- Soedomo, Moestikahadi. 2001. *Pencemaran Udara (Kumpulan Karya Ilmiah)*. Bandung : Penerbit ITB.
- Turner, D. B. 1999. *Work Book of Atmospheric Dispersion Estimates*. Washington, D. C.: HEW
- U.S. Environmental Protection Agency. 1995. *Compilation of Air Pollutant Emission Factors Volume I: Stationary Point and Area Sources* (5th Edition ed., Vol. I). Office of Air Quality Planning and Standards, Office of Air and Radiation, U.S. EPA, Research Triangle Park, NC.
- U.S. Environmental Protection Agency. 1998. *Stationary Source Control Techniques Document for Fine Particulate Matter*. EC/R Incorporated, Timberlyne Center, Chapel Hill, North Carolina.
- Vallius, Marko. 2005. Characteristics and Sources of Fine Particulate Matter in Urban Air. National Public Health Institute, Department of Environmental Health, Kuopio, Finland.
- Vatavuk, W.M. "COST-AIR" Control Cost Spreadsheets. Provided by the Innovative Strategies and Economics Group of the Office of Air Quality Planning and Standards, U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, North Carolina. February 1996.

