

Kajian Beban Emisi SO₂, NO₂ dan Partikulat dari Cerobong Boiler dengan Bahan Bakar Kayu pada PT X

Nabila Indah Wibisono¹, Novirina Hendrasarie^{2*}

^{1,2}Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, UPN "Veteran" Jawa Timur, Surabaya Indonesia

*Koresponden email: novirina@upnjatim.ac.id

Diterima: 8 Mei 2024

Disetujui: 7 Juni 2024

Abstract

The industrial revolution has led to an increase in the number of industries around the world, including Indonesia. PT X is one of the industries that produces emissions from wood-fired boiler stacks that have the potential to cause air pollution such as sulphur dioxide (SO₂), nitrogen dioxide (NO₂) and particulate matter. In this study, the emission load generated by PT X and the efficiency of the use of emission control devices were carried out. The high content of SO₂, NO₂ and particulates is 955.91 mg/Nm³, 1,744.92 mg/Nm³ and 1,354.21 mg/Nm³ produced from the boiler is above the quality standard. Therefore, emission control tools are needed to reduce the emission burden. The emission control tool used is cyclone dust collector. The cyclone dust collector acts as an air pollution control equipment and helps to remove large dust particles from the disposal of industrial processes. The efficiency of this mechanical dust collector increases with particle size. For larger particle sizes, this tool has a high efficiency. It is able to reduce SO₂, NO₂ and particulate emissions by 16%, 43% and 74% respectively. At this concentration it is already below the quality standard.

Keywords: *emission, dust collector cyclone, SO₂, NO₂, particulates*

Abstrak

Revolusi industri telah menyebabkan peningkatan jumlah industri di seluruh dunia, termasuk Indonesia. PT X merupakan salah satu industri yang menghasilkan emisi dari cerobong boiler dengan bahan bakar kayu yang berpotensi menimbulkan pencemaran udara, seperti partikulat, nitrogen dioksida (NO₂) dan sulfur dioksida (SO₂). Pada penelitian ini dilakukan perhitungan beban emisi yang dihasilkan oleh PT X dan efisiensi penggunaan alat pengendalian emisi. Tingginya kandungan SO₂, NO₂ dan partikulat sejumlah 955,91 mg/Nm³, 1.744,92 mg/Nm³ dan 1.354,21 mg/Nm³ yang dihasilkan dari boiler masih di atas baku mutu. Oleh karena itu diperlukan alat pengendalian emisi untuk menurunkan beban emisi tersebut. Alat pengendali emisi yang digunakan yaitu *dust collector cyclone*. *Dust Collector Cyclone* bertindak sebagai peralatan pengontrol polusi udara dan membantu menghilangkan partikel debu besar dari pembuangan proses industri. Efisiensi pengumpul debu mekanis ini terus meningkat seiring dengan ukuran partikel. Untuk ukuran partikel yang lebih tinggi, alat ini memiliki efisiensi yang tinggi. Sehingga, mampu mengelola emisi SO₂, NO₂, dan partikulat sebesar 16%, 43%, dan 74%. Sehingga dengan konsentrasi tersebut sudah berada di bawah baku mutu.

Kata kunci: *emisi, siklon pengumpul debu, SO₂, NO₂, partikulat*

1. Pendahuluan

Revolusi industri telah menyebabkan peningkatan jumlah industri di seluruh dunia, termasuk Indonesia. Hal ini bertujuan untuk meningkatkan kehidupan manusia [1]. Di sisi lain, pertumbuhan industri menyebabkan penurunan kualitas lingkungan akibat emisi yang dikeluarkan oleh kegiatan industri tersebut [2]. PT X merupakan usaha yang bergerak pada pengolahan kayu, yang proses produksinya menimbulkan emisi dari cerobong boiler yang dapat menyebabkan polusi udara. PT X menggunakan boiler dengan bahan bakar kayu untuk mendapatkan uap panas yang maksimal.

Bahan bakar kayu memiliki kandungan komposisi berupa 43,43% karbon (C), 6,58% hidrogen (H), 0,36% sulfur (S), 48,21% oksigen (O), 0,4% nitrogen (N) [3] serta komponen lain. Sehingga emisi yang dihasilkan adalah CO₂, CO, Unburn-C, NO₂, SO₂, H₂O, Partikulat (Ash), N₂ dan O₂. Menurut Menteri Lingkungan Hidup (2007) Baku mutu emisi sumber tidak bergerak bagi ketel uap yang menggunakan bahan bakar kayu telah ditetapkan kadarnya yakni sulfur dioksida (SO₂), nitrogen dioksida (NO₂), dan partikulat (*ash*) [4].

Sulfur dioksida (SO_2) merupakan salah satu dari polutan udara dengan jumlah tertinggi mencapai 18% di udara. Gas ini tidak berwarna dan berbau menyengat. Jika bereaksi dengan uap air di udara akan berubah menjadi H_2SO_4 yang disebut juga dengan hujan asam sehingga dapat menyebabkan kerusakan pada material, benda, dan tanaman [5]. Sementara NO_2 berperan dalam polusi partikulat, pengendapan asam dan prekursor ozon dan merupakan komponen utama kabut fotokimia [6]. Partikulat adalah campuran bahan organik dan anorganik yang ada di atmosfer dalam bentuk cair atau padat. Partikel dapat berupa debu, abu, kabut, atau aerosol [7].

Tingginya kandungan SO_2 , NO_2 dan partikulat sejumlah 955,91 mg/Nm^3 , 1.744,92 mg/Nm^3 dan 1.354,21 mg/Nm^3 yang dihasilkan dari boiler masih di atas baku mutu. Hal tersebut menunjukkan bahwa dalam proses pembakaran kayu diperkirakan dapat menyebabkan emisi polutan udara yang berbahaya.

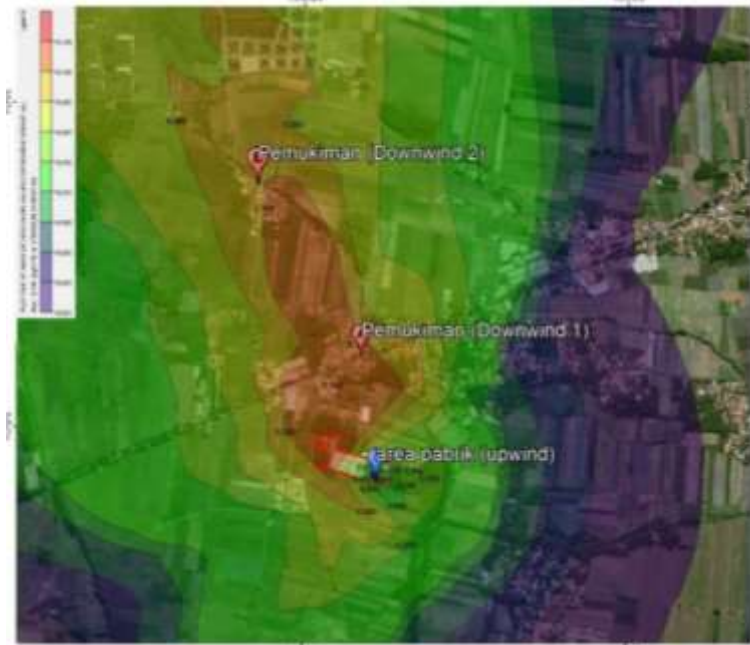
Cerobong boiler merupakan alat ventilasi yang terbuat dari besi baja atau stainless yang dirakit untuk mengeluarkan gas buang beracun ke udara ambien [8]. Emisi yang dikeluarkan dari cerobong asap, terutama dalam bentuk gas akan larut di udara dan dapat langsung masuk ke paru-paru manusia, kemudian diserap ke dalam sistem peredaran darah [9]. Hal ini menyebabkan gangguan fungsi paru-paru dan dapat mempengaruhi kesehatan masyarakat, terutama anak-anak dan orang tua [10]. Hal ini dapat menimbulkan keluhan dan keresahan masyarakat sekitar industri. Oleh karena itu, diperlukan adanya alat pengendalian emisi untuk mengurangi beban emisi. Alat pengendalian emisi yang digunakan PT X adalah *dust collector cyclone*.

Pada penelitian ini dilakukan perhitungan beban emisi yang dihasilkan PT X dan perhitungan efisiensi penggunaan alat pengendalian emisi. Emisi adalah kuantitas (massa) suatu polutan yang berasal dari suatu sumber, baik titik, linier, maupun permukaan [11]. Penelitian ini bertujuan untuk memperoleh konsentrasi beban emisi SO_2 , NO_2 dan partikulat dari gas buang boiler pada PT X, serta efisiensi penggunaan alat pengendalian emisi terhadap penurunan konsentrasi emisi yang dihasilkan oleh PT X. Penelitian ini mengacu pada Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 07 Tahun 2007 Tentang Baku Mutu Emisi Sumber Tidak Bergerak Bagi Ketel Uap. Lampiran III bagi Ketel Uap yang menggunakan Bahan Bakar Biomassa lainnya yang meliputi: (a) Biomassa berupa serabut dan/atau cangkang; (b) Biomassa berupa ampas dan/atau tebu kering; (c) Biomassa selain yang disebutkan dalam huruf a dan huruf b; (d) Batu Bara; (e) Minyak; (f) Gas; dan (h) Gabungan.

2. Metode Penelitian

2.1 Lokasi Penelitian

Lokasi penentuan titik pemantauan udara ambien didasarkan pada SNI 19- 7119.6-2005 tentang Penentuan Lokasi Pengambilan Contoh Uji Pemantauan Kualitas Udara Ambien. Kriteria yang digunakan dalam penentuan lokasi pemantauan kualitas udara ambien adalah di daerah sekitar lokasi industri dan area dengan kepadatan penduduk tinggi. Penentuan lokasi pemantauan udara ambien di area permukiman didasarkan pada data arah angin di lokasi kegiatan [12]. Pada penelitian ini menggunakan 2 titik pengamatan yang didasarkan pada data arah angin di lokasi kegiatan.



Gambar 1. Peta Pemantauan Udara Ambien
Sumber: Google Earth (2024)

Tabel 1. Titik Lokasi Pemantauan

Keterangan	Lokasi Pemantauan	Titik Koordinat
Titik 1	Tanah lapang dekat area produksi PT X	07°47'23.37"S dan 113°20'37.62" E (<i>Upwind 1</i>)
Titik 2	Tanah lapang dekat dengan permukiman warga sekitar PT X	07°47'9.67"S dan 113°20'35.39" E (<i>Downwind 1</i>) 07°46'50.90"S dan 113°20'22.86"E (<i>Downwind 2</i>)

Sumber: Hasil Pengamatan (2024)

2.2 Waktu Penelitian

Waktu penelitian dilaksanakan pada hari Kamis, 14 Maret 2024 pukul 13,00 yang berlokasi di Dusun Rowojati, Kelurahan Jatiadi, Kecamatan Gending, Kabupaten Probolinggo. Dengan durasi pengukuran yaitu 1 jam.

2.3 Metode Penelitian

Penelitian dilakukan menggunakan data kuantitatif. Data kuantitatif yang digunakan antara lain konsentrasi beban emisi yang dikeluarkan dari boiler dan nilai efisiensi alat pengendali terhadap parameter baku mutu emisi. Parameter pencemar udara pada penelitian ini adalah gas SO₂, NO₂ dan partikulat. Prinsip perhitungan beban emisi SO₂, NO₂ dan partikulat adalah dengan metode stoikiometri.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Perhitungan Konsentrasi Emisi

PT X merupakan salah satu industri yang proses produksinya menghasilkan emisi yang berasal dari cerobong boiler. Bahan bakar yang digunakan yaitu kayu. Berikut merupakan **Tabel 2** yang menjelaskan karakteristik sumber emisi.

Tabel 2. Karakteristik Sumber Emisi Kegiatan Pembakaran

Koordinat	Sumber Emisi	Kapasitas	Konsumsi Bahan Bakar	Jam Operasi	Parameter Pantau
Cerobong S: 07°47'22.29" E: 113°20'37.71"	Boiler	8 Ton/hari	Kayu: 44,16 m ² /hari	24 Jam	- Partikel: 350 mg/m ³ - Sulfur Dioksida (SO ₂): 800 mg/m ³ - Nitrogen Oksida (NO ₂): 1.000 mg/m ³

Sumber: Penelitian (2024)

Bahan bakar kayu memiliki kandungan komposisi berupa 43,43% karbon (C), 6,58% hidrogen (H), 0,36% sulfur (S), 48,21% oksigen (O), 0,4% nitrogen (N), serta komponen lain. Spesifikasi kayu yang lebih spesifik dijabarkan pada **Tabel 3** berikut ini:

Tabel 3. Spesifikasi Kayu

No.	Parameter	Persentase
1.	Kadar Air	12,78%
2.	Kadar Abu	1,02%
3.	Karbon (C)	43,43%
4.	Hidrogen (H)	6,58%
5.	Sulfur (S)	0,36%
6.	Oksigen (O)	48,21%
7.	Nitrogen (N)	0,4%

Sumber: Pane E Lesmana (2022)

Perhitungan setiap komponen neraca massa pada kayu boiler dengan jumlah bahan bakar sebesar 16.200 m³/tahun atau 1,840 m³/jam adalah sebagai berikut:

a. Perhitungan Proses Pembakaran Kayu pada Boiler

Perhitungan setiap komponen neraca massa pada kegiatan produksi dengan jumlah bahan bakar kayu pada boiler sebesar 16.200 m³/tahun atau sekitar 1,840 m³/jam dengan perhitungan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{Konsumsi Kayu} &= 1,840 \text{ m}^3/\text{jam} \\ \text{Densitas Kayu} &= 320 \text{ kg/m}^3 \text{ [13]} \\ \text{Kebutuhan Bahan Bakar} &= 1,840 \text{ m}^3/\text{jam} \times 320 \text{ kg/m}^3 = 588,80 \text{ kg/jam} \end{aligned}$$

Komposisi Kayu:

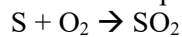
$$\begin{aligned} \text{Kadar Air} &= 12,78\% \\ \text{Kadar Kering} &= 87,22\% \\ \text{Berat kayu kering yang masuk} &= 87,22\% \times 588,80 \text{ kg/jam} = 513,55 \text{ kg/jam} \end{aligned}$$

Berikut detail perhitungan dari massa masuk dan emisi yang dikeluarkan dari boiler pada proses pembakaran kayu.

Perhitungan Bahan Bakar dan Emisi Dihasilkan untuk Gas Sulfur

1. Massa Masuk (Kebutuhan Oksigen)

Kebutuhan bahan bakar kayu sebesar 588,80 kg/jam yang memiliki komposisi 0,36% S. Reaksi stoikiometri pembakaran sempurna adalah:



Jumlah mol: S = 1; O₂ = 1; SO₂ = 1

(a) Menghitung massa S pada bahan bakar, diketahui konsentrasi S digunakan sebesar 0,36%, maka:

$$\begin{aligned} \text{(b) Weight Loading S} &= \text{Berat kayu kering} \times 0,36\% \\ &= 513,55 \text{ kg/jam} \times 0,36\% \\ &= 1,85 \text{ kg/jam} \end{aligned}$$

$$\text{(c) Berat molekul S} = 32 \text{ kg/kmol}$$

$$\begin{aligned} \text{(d) Kecepatan aliran molar S} &= \frac{\text{Loading S}}{\text{Berat molekul S}} \\ &= \frac{1,85 \text{ kg/jam}}{32 \text{ kg/kmol}} \\ &= 0,06 \text{ kmol/jam} \end{aligned}$$

$$\text{Air Add (Operational)} = 20\%$$

$$\text{O-content in Fuel} = 28\%$$

Stioch. Air Excess ditentukan dari total *Air Add (Operational)* dan *O-content in Fuel* sebesar 48%

$$\begin{aligned} \text{(e) Jumlah O}_2 &= \text{Kecepatan Aliran Molar S} \times \text{Koefisien O}_2 \\ &= 0,06 \times 1 \\ &= 0,06 \text{ kmol/jam} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{(f) Excess O}_2 &= (\text{Stioch. Air Excess} - \text{O-content in Fuel}) \times \text{Jumlah O}_2 \\ &= (48\% - 28\%) \times 0,06 \text{ kmol/jam} \\ &= 0,012 \text{ kmol/jam} \end{aligned}$$

- (g) Total kecepatan aliran molar $O_2 = \text{Jumlah } O_2 + \text{Excess } O_2$
 $= 0,06 \text{ kmol/jam} + 0,012 \text{ kmol/jam}$
 $= 0,07 \text{ kmol/jam}$
- (h) Kecepatan Aliran Molar $N_2 = \text{Total Kecepatan Aliran Molar } O_2 \times 3,76$
 $= 0,07 \text{ kmol/jam} \times 3,76$
 $= 0,26 \text{ kmol/jam}$

Total debit emisi pada keadaan STP = 3.936,68 Nm³/s

Total debit emisi pada keadaan normal (25°C) = 4.297,01 Nm³/s

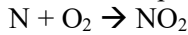
2) Massa Keluar (Emisi yang Dihasilkan)

- (i) $CO_2 = - \text{ kmol/jam}$
(j) $CO = - \text{ kmol/jam}$
(k) $C\text{-unburn} = - \text{ kmol/jam}$
(l) $H_2O = - \text{ kmol/jam}$
(m) Emisi $SO_2 = \frac{\text{Jumlah } O_2}{\text{jumlah Mol } CO_2} = \frac{0,06 \text{ kmol/jam}}{1} = 18,54 \text{ kmol/jam}$
(n) $NO_2 = - \text{ kmol/jam}$
(o) Emisi $O_2 = \text{Excess } O_2 = 0,012 \text{ kmol/Jam}$
(p) Emisi $N_2 = \text{Kecepatan Aliran Molar } N_2 = 0,26 \text{ kmol/jam}$

Perhitungan Bahan Bakar dan Emisi Dihasilkan untuk Gas Nitrogen

1. Massa Masuk (Kebutuhan Oksigen)

Kebutuhan bahan bakar kayu sebesar 588,80 kg/jam yang memiliki komposisi 0,40% N. Reaksi stoikiometri pembakaran sempurna adalah:



Jumlah mol: $N = 1$; $O_2 = 1$; $NO_2 = 1$

- (a) Menghitung massa N pada bahan bakar, diketahui konsentrasi N digunakan sebesar 0,40%, maka:

(b) *Weight Loading S* = Berat kayu kering $\times 0,40\%$
 $= 513,55 \text{ kg/jam} \times 0,40\%$
 $= 2,05 \text{ kg/jam}$

(c) Berat molekul N = 14 kg/kmol

(d) Kecepatan aliran molar N = $\frac{\text{Loading N}}{\text{Berat molekul N}}$
 $= \frac{2,05 \text{ kg/jam}}{14 \text{ kg/kmol}}$
 $= 0,15 \text{ kmol/jam}$

Air Add (Operational) = 20%

O-content in Fuel = 28%

Stioch. Air Excess ditentukan dari total *Air Add (Operational)* dan *O-content in Fuel* sebesar 48%

(e) Jumlah $O_2 = \text{Kecepatan Aliran Molar N} \times \text{Koefisien } O_2$
 $= 0,15 \times 1$
 $= 0,15 \text{ kmol/jam}$

(f) *Excess O₂* = (*Stioch. Air Excess* – *O-content in Fuel*) \times Jumlah O_2
 $= (48\% - 28\%) \times 0,06 \text{ kmol/jam}$
 $= 0,03 \text{ kmol/jam}$

(g) Total kecepatan aliran molar $O_2 = \text{Jumlah } O_2 + \text{Excess } O_2$
 $= 0,15 \text{ kmol/jam} + 0,03 \text{ kmol/jam}$
 $= 0,18 \text{ kmol/jam}$

(h) Kecepatan Aliran Molar $N_2 = \text{Total Kecepatan Aliran Molar } O_2 \times 3,76$
 $= 0,18 \text{ kmol/jam} \times 3,76$
 $= 0,66 \text{ kmol/jam}$

Total debit emisi pada keadaan STP = 3.936,68 Nm³/s

Total debit emisi pada keadaan normal (25°C) = 4.297,01 Nm³/s

2) Massa Keluar (Emisi yang Dihasilkan)

- (i) $CO_2 = - \text{ kmol/jam}$
(j) $CO = - \text{ kmol/jam}$
(k) $C\text{-Unburn} = - \text{ kmol/jam}$

- (l) H₂O = - kmol/jam
 (m) SO = - kmol/jam
 (n) Emisi NO₂ = $\frac{\text{Jumlah } O_2}{\text{Jumlah Mol } CO_2} = \frac{0,15 \text{ kmol/jam}}{1} = 0,15 \text{ kmol/jam}$
 (o) Emisi O₂ = Excess O₂ = 0,03 kmol/Jam
 (p) Emisi N₂ = Kecepatan Aliran Molar N₂ = 0,66 kmol/jam

Perhitungan Bahan Bakar dan Emisi Dihasilkan untuk Partikulat

- (a) Content Analysis (%wt) = Persentase karbon + persentase hidrogen + persentase nitrogen + persentase sulfur + persentase oksigen – 100
 = 43,43 + 6,58 + 0,40 + 0,36 + 48,21 – 100
 = 1,02 % wt
 (b) Weight Loading (kg/h) = $\frac{513,55 \times 1,02}{100} = 5,24 \text{ kg/jam}$
 (c) Ash (Partikulat) = 5,24 kg/jam

Berikut merupakan Tabel 4 perhitungan stoikiometri secara lengkap.

Tabel 4. Hasil Perhitungan Stoikiometri Boiler

Komposisi Kayu	Content Analysis (%wt)	Weight Loading (kg/h)	BA (kg/mol)	Fuel (kmol/jam)	Massa Masuk (Kebutuhan Oksigen) (kmol/jam)			
					O ₂	O ₂ Excess	Total O ₂	N ₂
	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)	(h)
Karbon (C)	43,43%	223,04	12	18,59	18,54 0,001	3,71	22,25 0,001	83,66 0,004
Hidrogen (H)	6,58%	33,79	1	33,79	8,45	1,69	10,14	38,12
Nitrogen (N)	0,40%	2,05	14	0,15	0,15	0,03	0,18	0,66
Sulfur (S)	0,36%	1,85	32	0,06	0,06	0,012	0,07	0,26
Oksigen (O)	48,21%	247,58	16	15,47		7,74		
Ash	1,02%	5,24						
Total	100,00%	513,55		68,06	27,19	13,18	32,63	122,70
Moisture	12,78%	75,25	18	4,18				
Total (kmol/h)				72,24	27,19	13,18	32,63	122,70
BA/BM; (kg/kmol)					16	16	32	28
Input – output (emisi); (kg/jam)				588,80			1.044,27	3.435,66
						5.068,73		

Komposisi Kayu	Massa Keluar (Emisi yang Dihasilkan) (kmol/jam)								Total	Ash (kg/jam)
	CO ₂	CO	C- Unburn	H ₂ O	SO ₂	NO ₂	O ₂	N ₂		
	(i)	(j)	(k)	(l)	(m)	(n)	(o)	(p)		
Karbon (C)	18,54	0,002	0,04				3,71	83,66		
Hidrogen (H)				16,90			1,69	38,12		
Nitrogen (N)						0,15	0,03	0,66		
Sulfur (S)					0,06		0,012	0,26		
Oksigen (O)							7,74	-		
Ash								0		5,24
Total	18,54	0,002	0,04	16,90	0,06	0,15	13,18	122,70	171,56	
Moisture				4,18						
Total (kmol/h)	18,54	0,002	0,04	21,08	0,06	0,15	13,18	122,70	175,74	
BA/BM; (kg/kmol)	44	28	12	18	64	46	32	28		
815,81 0,07 0,51 379,37 3,70 6,75 421,62 3.435,66 5.063,49 5,24										

Input-Output (emisi); (kg/jam)	5.068,73	Balance
Total Debit Emisi (m ³ /jam) pada STP (0°C, 1 atm) → Menggunakan rumus PV = nRT		3.936,68
Total Debit Emisi (Nm ³ /jam) pada kondisi operasi (25°C, 1 atm) → Menggunakan rumus PV = nRT		4.297,01

Sumber: Hasil Perhitungan (2024)

3) Berat Emisi

Berikut detail perhitungan dari berat emisi yang dikeluarkan dari boiler pada proses pembakaran kayu:

Berat Emisi Sulfur Dioksida

- (a) Berat Molekul (SO₂) = 64 kg/kmol
 (b) Emisi Hasil Reaksi = 0,06 kmol/jam
 (c) Berat Emisi SO₂ = Berat Molekul (SO₂) × Emisi Hasil Reaksi
 = 64 kg/kmol × 0,06 kmol/jam
 = 3,70 kg/jam
 (d) Flowrate (25 °S) = 24,45 × Emisi Hasil Reaksi SO₂
 = 24,5 × 0,06 kmol/jam
 = 1,41 Nm³/jam
 (e) Konsentrasi Emisi pada Suhu Normal = $\frac{\text{Berat Emisi } CO_2 \times 10^6}{\text{Total Flowrate}}$
 = $\frac{3,70 \text{ kg/jam} \times 10^6}{4.296,96 \text{ Nm}^3/\text{jam}}$
 = 860,51 mg/Nm³
 (f) Konsentrasi Emisi (O₂ terkoreksi 6%) = $\frac{\text{Konsentrasi Emisi pada Suhu Normal} \times (21-6)}{(21-6\%)}$
 = $\frac{860,51 \text{ mg/Nm}^3 \times (21-6)}{(21-6\%)}$
 = 955,91 mg/Nm³

Berat Emisi Nitrogen Dioksida

- (a) Berat Molekul (NO₂) = 28 kg/kmol
 (b) Emisi Hasil Reaksi = 0,15 kmol/jam
 (c) Berat Emisi NO₂ = Berat Molekul (NO₂) × Emisi Hasil Reaksi
 = 28 kg/kmol × 0,15 kmol/jam
 = 6,75 kg/jam
 (d) Flowrate (25 °N) = 24,45 × Emisi Hasil Reaksi NO₂
 = 24,5 × 0,15 kmol/jam
 = 3,59 Nm³/jam
 (e) Konsentrasi Emisi pada Suhu Normal = $\frac{\text{Berat Emisi } NO_2 \times 10^6}{\text{Total Flowrate}}$
 = $\frac{6,75 \text{ kg/jam} \times 10^6}{4.296,96 \text{ Nm}^3/\text{jam}}$
 = 1.570,77 mg/Nm³
 (f) Konsentrasi Emisi (O₂ terkoreksi 6%) = $\frac{\text{Konsentrasi Emisi pada Suhu Normal} \times (21-6)}{(21-6\%)}$
 = $\frac{1.570,77 \text{ mg/Nm}^3 \times (21-6)}{(21-6\%)}$
 = 1.744,92 mg/Nm³

Berat Emisi Partikulat

1. Emisi = 5,24 kg/jam
 2. Berat Emisi NO₂ = $\frac{\text{Emisi kg/jam} \times 1000}{3600}$
 = $\frac{5,24 \text{ kg/jam} \times 1000}{3600}$
 = 1,46 g/s
 3. Konsentrasi Emisi pada Suhu Normal = $\frac{\text{Berat Emisi } NO_2 \times 10^6}{\text{Total Flowrate}}$
 = $\frac{5,24 \text{ kg/jam} \times 10^6}{4.296,96 \text{ Nm}^3/\text{jam}}$

$$\begin{aligned}
 &= 1.219,05 \text{ mg/Nm}^3 \\
 4. \text{ Konsentrasi Emisi (O}_2 \text{ terkoreksi 6\%)} &= \frac{\text{Konsentrasi Emisi pada Suhu Normal} \times (21-6)}{(21-6\%)} \\
 &= \frac{1.219,05 \text{ mg/Nm}^3 \times (21-6)}{(21-6\%)} \\
 &= 1.354,21 \text{ mg/Nm}^3
 \end{aligned}$$

Berikut merupakan **Tabel 5** perhitungan secara lengkap:

Tabel 5. Perhitungan Berat dan Konsentrasi Emisi pada Boiler

Parameter Emisi	Berat Molekul (kg/kmol)	Emisi Hasil Reaksi (kmol/jam)	Berat Emisi (kg/jam)	Flowrate	Konsentrasi Emisi (mg/Nm ³)	Konsentrasi Emisi Koreksi Oksigen (mg/Nm ³)	Baku Mutu*
				(25°C 1 atm) (Nm ³ /jam)			
	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	
CO ₂	44	18,54	815,81	453,33	189.858,16	210.907,61	
CO	28	0,002	0,07	0,06	15,14	16,82	
Unburn-C	12	0,04	0,51	1,05	119,38	132,62	
NO ₂	46	0,15	6,75	3,59	1.570,77	1.744,92	1.000
SO ₂	64	0,06	3,70	1,41	860,51	955,91	800
H ₂ O	18	21,08	379,37	515,32	88.228,85	98.077,37	
Ash (Partikulat)			5,24	-	1.219,05	1.354,21	350
N ₂		122,70	3.435,66	3.000,06	799.555,02	888.201,15	
O ₂		13,18	421,62	322,15	98.121,05	108.999,67	

Sumber: Hasil Perhitungan (2024)

3.2 Baku Mutu Emisi

Baku mutu emisi adalah batasan atau nilai maksimum dan/atau beban emisi maksimum yang boleh masuk atau dikeluarkan ke udara ambien. Dalam konteks ini, emisi mengacu pada zat, energi, dan/atau komponen lain yang dihasilkan selama kegiatan dan dilepaskan ke udara sekitar, baik yang berpotensi menjadi pencemar maupun tidak [14]. Untuk parameter yang digunakan pada usulan baku mutu boiler bahan bakar kayu ini terdiri dari SO₂, NO₂, dan partikulat. Sementara itu, untuk parameter lain seperti CO₂, CO, H₂O, N₂ dan O₂ tidak dimasukkan dalam usulan baku mutu karena tidak ada batasan baku mutu dalam parameter tersebut, dikarenakan dianggap tidak secara langsung mempengaruhi kualitas udara dan kesehatan manusia. Jadi, baku mutu emisi lebih berfokus pada gas dan partikel yang secara langsung mempengaruhi kualitas udara dan kesehatan manusia.

Berdasarkan **Tabel 5** dapat dilihat bahwa parameter SO₂, NO₂ dan partikulat melebihi baku mutu yaitu pada parameter SO₂ yaitu sebesar 955,91 mg/Nm³, NO₂ sebesar 1.744,92 dan partikulat (Ash) sebesar 1.354,21 mg/Nm³. Oleh karena itu, diperlukan alat pengendalian emisi untuk menurunkan kadar konsentrasi emisi yang dikeluarkan agar sesuai dengan baku mutu. PT X menggunakan *Dust Collector Cyclone* sebagai alat pengendalian emisinya.

3.3 Efisiensi Alat Pengendalian Emisi

Dust Collector Cyclone atau pengumpul debu siklon adalah jenis peralatan khusus yang dirancang untuk digunakan dalam aplikasi industri untuk memisahkan partikel debu besar dari partikel berguna. Ini adalah pemisah mekanis, yang menggunakan gaya sentrifugal dan efek inersia untuk pemisah partikel [15]. Pengumpul debu siklon bertindak sebagai peralatan pengontrol polusi udara dan membantu menghilangkan partikel debu besar dari pembuangan proses industri [16]. Efisiensi pengumpul debu mekanis ini terus meningkat seiring dengan ukuran partikel. Ini berarti bahwa untuk ukuran partikel yang lebih tinggi, mereka memiliki efisiensi yang tinggi. Ini membuatnya cocok untuk digunakan terutama dalam aplikasi filtrasi multistage sebagai pengumpul debu primer. PT X memiliki 1 boiler yang berkapasitas 8 ton. Perhitungan efisiensi ini diperlukan untuk melihat seberapa besar efisiensi kinerja operasional *dust collector cyclone* dalam pengelolaan emisi. Pada alat pengendali emisi dengan *dust collector cyclone* memiliki nilai efisiensi saat kondisi minimum sebesar 70%. Sehingga, direncanakan untuk perhitungan nilai outlet loading pada setiap parameter sebagai berikut.

Rumus Perhitungan Nilai Outlet Loading

$$E = \frac{\text{Konsentrasi Emisi} - \text{Baku Mutu}}{\text{Konsentrasi Emisi}} \dots\dots\dots(1)$$

Maka, perhitungan nilai efisiensi *dust collector cyclone* sebagai berikut:

- Efisiensi (η) SO₂:

$$E = \frac{\text{Konsentrasi Emisi} - \text{Baku Mutu}}{\text{Konsentrasi Emisi}}$$

$$E = \frac{955,91 \text{ mg/Nm}^3 - 800 \text{ mg/Nm}^3}{955,91 \text{ mg/Nm}^3}$$

$$E = 16\%$$

Cyclone separator efficiency SO₂ = 16%
- Efisiensi (η) NO₂:

$$E = \frac{\text{Konsentrasi Emisi} - \text{Baku Mutu}}{\text{Konsentrasi Emisi}}$$

$$E = \frac{1.744,92 \text{ mg/Nm}^3 - 1.000 \text{ mg/Nm}^3}{1.000 \text{ mg/Nm}^3}$$

$$E = 43\%$$

Cyclone separator efficiency NO₂ = 43%
- Efisiensi (η) Partikulat:

$$E = \frac{\text{Konsentrasi Emisi} - \text{Baku Mutu}}{\text{Konsentrasi Emisi}}$$

$$E = \frac{1.354,21 \text{ mg/Nm}^3 - 350 \text{ mg/Nm}^3}{350 \text{ mg/Nm}^3}$$

$$E = 74\%$$

Cyclone separator efficiency Partikulat = 74%

Berdasarkan perhitungan persentase efisiensi alat pengendali emisi *dust collector cyclone* mampu mengelola emisi SO₂, NO₂, dan partikulat sebesar 16%, 43%, dan 74%. Sehingga dengan konsentrasi tersebut sudah berada di bawah baku mutu. Berikut **Tabel 6** input dan output emisi yang direduksi.

Tabel 6. Input dan Output Parameter Emisi yang Direduksi

No.	Sumber Emisi	Parameter	Laju Alir	Input	Emisi Setelah	Baku Mutu*	Memenuhi Baku Mutu
					Alat Pengendali		
			m ³ /s	mg/m ³	mg/m ³	mg/m ³	
1	Boiler	SO ₂	2,49	955,91	33,4	800	Ya
2		NO ₂		1.744,92	340,7	1.000	Ya

Sumber: Hasil Uji PT X (2024)

Jumlah padatan partikulat dari alat pengendali *dust collector cyclone* tidak dapat ditentukan nilai massa/jumlahnya karena output padatan dari *dust collector cyclone* berupa produk samping yang akan langsung masuk ke dalam jalur proses produksi untuk diproses ke tahapan selanjutnya. Sehingga tidak ada pengukuran jumlah yang bisa ditentukan. PT X memanfaatkan hasil samping tersebut sebagai bahan baku pembuatan papan kayu. Papan ini terbuat dari serbuk kayu yang dipadatkan dengan lem dan digunakan sebagai bahan dasar dalam pembuatan *furniture*, pintu, jendela, dan lain sebagainya.

4. Kesimpulan

PT X merupakan salah satu industri yang menghasilkan emisi dari cerobong boiler dengan bahan bakar kayu yang berpotensi menimbulkan pencemaran udara, seperti partikulat, nitrogen dioksida (NO₂) dan sulfur dioksida (SO₂). Berdasarkan **Tabel 5**, konsentrasi emisi yang dihasilkan SO₂, NO₂ dan partikulat masih di atas baku mutu yaitu pada parameter SO₂ sebesar 955,91 mg/Nm³, NO₂ sebesar 1.744,92 mg/Nm³ dan partikulat (Ash) sebesar 1.354,21 mg/Nm³. Oleh karena itu, diperlukan alat pengendalian emisi untuk

menurunkan kadar konsentrasi emisi yang dikeluarkan agar sesuai dengan baku mutu. PT X menggunakan *Dust Collector Cyclone* sebagai alat pengendalian emisinya.

Berdasarkan perhitungan persentase efisiensi alat pengendali emisi, *dust collector cyclone* mampu mengelola emisi SO₂, NO₂, dan partikulat sebesar 16%, 43%, dan 74%. Oleh karena itu, konsentrasi emisi setelah menggunakan alat *dust collector cyclone* mencapai 33,4 mg/m³ untuk SO₂ dan 340,7 mg/m³ untuk NO₂. Berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 07 Tahun 2007 Tentang Baku Mutu Emisi Sumber Tidak Bergerak Bagi Ketel Uap Lampiran III bagi Ketel Uap yang menggunakan Bahan Bakar Biomassa Lainnya yang meliputi: (a) Biomassa berupa serabut dan/atau cangkang; (b) Biomassa berupa ampas dan/atau tebu kering; (c) Biomassa selain yang disebutkan dalam huruf a dan huruf b; (d) Batu Bara; (e) Minyak; (f) Gas; dan (h) Gabungan. Nilai tersebut telah berada di bawah mutu yang artinya aman untuk dikeluarkan di udara ambien.

Sedangkan untuk jumlah padatan partikulat dari alat pengendali *dust collector cyclone* tidak dapat ditentukan nilai massa/jumlahnya karena output padatan dari *dust collector cyclone* berupa produk samping yang akan langsung masuk ke dalam jalur proses produksi untuk diproses ke tahapan selanjutnya. Sehingga tidak ada pengukuran jumlah yang bisa ditentukan. PT X memanfaatkan hasil samping tersebut sebagai bahan baku pembuatan papan kayu. Papan ini terbuat dari serbuk kayu yang dipadatkan dengan lem dan digunakan sebagai bahan dasar dalam pembuatan *furniture*, pintu, jendela, dan lain sebagainya.

5. Referensi

- [1] Ismahani, R., & Anurogo, D. W., "Pemodelan AERMOD Untuk Proyeksi Pola Penyebaran Emisi Heat Recovery Steam Generator PT X dan PT Y," *Indonesian Journal of Conservation*, vol. 11, no. 2, pp. 51-63, Juli 2022. <https://doi.org/10.15294/ijc.v11i2.37953>
- [2] Sari, P. H., & Supriyanto, "Pemodelan Gauss Dispersion Gas Sulfur Dioksida D. I Yogyakarta *Ambient Air Quality Monitoring and Gauss Dispersion Modelling for Gaseous Sulphur Dioxide (SO₂) From The Plywood Industry In Dusun Kalimati*," pp. 1-21
- [3] Pane, E., Ismail, Lesmana, I. G. E., Hartantrie, R., & Rifki, D., "Pengaruh Proses Terofaksi terhadap Kualitas Serbuk Kayu:," *Jurnal Keteknikan Pertanian*, vol. 10, no. 1, pp. 11-20, April 2022. <https://doi.org/10.19028/jtep.010.1.11-20>
- [4] Peraturan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 07 Tahun 2007. (2007). Tentang Baku Mutu Emisi Sumber Tidak Bergerak Bagi Ketel Uap.
- [5] Suhardo, S., Septiariva, I. Y., & Sari, M. M., "Analisa Perbedaan Kualitas Udara berdasarkan Parameter Nitrogen Dioksida dan Sulfur Dioksida Sebelum dan Saat Pandemi COVID-19 di Kota Surakarta, Indonesia," *Journal of Sustainable Infrastructure*, vol. 1, no. 2, pp. 49-55, Desember 2022. <https://doi.org/10.61078/jsi.v1i2.8>
- [6] Lestari S, "Analisis Kualitas Udara Ambien Sulfur Dioksida (SO₂) dan Nitrogen Dioksida (NO₂) Pada Distrik Muara Tami Kota Jayapura", *Jurnal Pendidikan dan Konseling*, vol. 4, no. 6, hal 1349-1358, April 2019.
- [7] Setyono, P., Himawan, W., & Nancy, N, " Estimasi Emisi Partikulat (PM₁₀) akibat Ragam Aktivitas Urban di Kota Surakarta," *Jurnal Ilmu Lingkungan*, vol. 18, no. 3, pp. 556-564, Desember 2020.
- [8] Kurniawati, H, "Pemodelan Pola Penyebaran Pencemar Udara Pltu PT Kaltim Prima Coal Menggunakan Aermod," pp. 1-148, Juni 2019.
- [9] Aprilia, A, "Analisis Sebaran Emisi SO₂ dan NO₂ dari Cerobong Boiler Industri Pengolahan Kelapa Sawit dengan Model AERMOD di PT Perkebunan Nusantara VI Unit Usaha Pinang Tinggi Kabupaten Muaro Jambi," pp.1-5, Februari 2023.
- [10] Nurfadillah, A. R., & Petasule, S, " Enviromental Health Risk Analysis (SO₂, NO₂, CO and TSP) In The Bone Bolango Area Road Segment," *Journal Health & Science : Gorontalo Journal Health and Science Community*, vol. 6, no. 2, pp.76-89, April 2022. <https://doi.org/10.35971/gojhes.v5i3.13544>
- [11] Sugiarto, S., Herawati, P., & Riyanti, A, "Analisi Konsentrasi SO₂, NO₂ dan Partikulat pada Sumber Emisi Tidak Bergerak (Cerobong) Berbahan Bakar Batubara dan Cangkang (Studi Kasus di Kabupaten Muaro Jambi)," *Jurnal Daur Lingkungan*, vol. 2, no. 1, pp. 21-28, Februari 2019. <https://doi.org/10.33087/daurling.v2i1.20>
- [12] Badan Standarisasi Nasional, "Udara Ambien - Bagian 6: Penentuan Lokasi Pengambilan Contoh Uji Pemantauan Kualitas Udara Ambien," 2005. SNI 19-7119.6-2005
- [13] Perhutani, "Perhutani Kayu Sengon", Perhutani, [online]. Tersedia: <https://www.perhutani.co.id/product/kayu-sengon>

-
- [14] Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor 11 Tahun 2021. (2021). Tentang Baku Mutu Emisi Mesin Dengan Pembakaran Dalam.
 - [15] Rudy Irwanto Sihotang, M., & Asral, "Kaji Eksperimental Cyclone Separator Pada System Pneumatic Conveying Dengan Variasi Partikel Padat," *Jom FTEKNIK*, vol. 6, no. 1, pp. 1-3, Januari s/d Juni 2019.
 - [16] Ramadhan, W. M., Soemirat, J., & Handayani, D. A, "Kajian Desain Cerobong Asap Terhadap Emisi PM10 dan SO2 Akibat Pembakaran Batubara di PLTU PT. X," *Jurnal Rekayasa Lingkungan Dan Jurnal Online Institut Teknologi Nasional*, vol. 5, no. 1, pp. 1-15, April 2017.