

Analisis Sebaran Emisi SO_2 dan NO_2 dari Cerobong Boiler Industri Pengolahan Kelapa Sawit dengan Model AERMOD di PT Perkebunan Nusantara VI Unit Usaha Pinang Tinggi, Kabupaten Muaro Jambi

Arifa Aprilia^{1*)}, Febri Juita Anggraini¹⁾, Yasdi¹⁾

¹⁾ Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Jambi, Muaro Jambi, Indonesia

*Korespondensi: arifaaprilia3@gmail.com

Abstrak

PT Perkebunan Nusantara VI Unit Usaha Pinang Tinggi menggunakan bahan bakar biomassa sehingga dapat menghasilkan polutan utama SO_2 dan NO_2 yang terdispersi ke sekitar industri sehingga berpotensi menyebabkan pencemaran udara. Penelitian menggunakan model AERMOD ini bertujuan mengetahui sebaran konsentrasi SO_2 dan NO_2 pada reseptor, validasi model AERMOD dengan RMSPE, kontribusi emisi cerobong boiler ke reseptor, dan mengetahui sebaran konsentrasi reseptor tidak terukur aktual dibandingkan dengan baku mutu udara ambien. Hasil penelitian menunjukkan sebaran SO_2 tertinggi dan terendah pada 1 jam di Kantin Karyawan PKS sebesar $35,85 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dan Kantor & Gudang sebesar $26,84 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sedangkan pada 24 jam di Halaman Kantor PKS sebesar $25,72 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dan Perumahan Karyawan PKS (pondok 5) sebesar $23,99 \mu\text{g}/\text{m}^3$. NO_2 tertinggi dan terendah pada 1 jam di Kantin Karyawan PKS sebesar $115,64 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dan Kantor & Gudang sebesar $38,77 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sedangkan pada 24 jam di Kantin Karyawan PKS sebesar $36,36 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dan Perumahan Karyawan PKS (pondok 5) sebesar $24,36 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Validasi model AERMOD untuk SO_2 $19,94\% < 25\%$ (valid) dan $\text{NO}_2 > 25\%$ (tidak valid). Kontribusi emisi cerobong SO_2 tertinggi dan terendah periode 1 jam di Halaman Kantor PKS sebesar $10,35\%$ dan Halaman Toko Bu Sakti sebesar 0% sedangkan 24 jam di Halaman Kantor PKS sebesar $6,77\%$ dan Perumahan Karyawan PKS (pondok 5) sebesar $0,62\%$. Kontribusi emisi cerobong NO_2 tertinggi dan terendah pada 1 jam di Halaman Kantor PKS sebesar $18,46\%$ dan Halaman Toko Bu Sakti sebesar 0% sedangkan 24 jam di Halaman Kantor PKS sebesar $30,12\%$ dan Perumahan Karyawan PKS sebesar $0,92\%$. Konsentrasi reseptor tidak terukur aktual lebih kecil dari baku mutu udara ambien.

Kata kunci: Cerobong Boiler, Emisi SO_2 dan NO_2 , Industri Kelapa Sawit, Model AERMOD, Pemodelan Dispersi Udara

Abstract

PT Perkebunan Nusantara VI Unit Usaha Pinang Tinggi uses biomass fuel that can produce the main pollutants, SO_2 and NO_2 , dispersed around industry and have the potential to cause air pollution. The study using the AERMOD model aims to determine dispersion of SO_2 and NO_2 concentrations at receptors, validation of the AERMOD model with RMSPE, contribution of boiler chimney emission to the receptors, and dispersion of actual unmeasured receptor concentration compared to air quality standards. The results showed that the highest and lowest dispersion of SO_2 at 1-hour in Kantin Karyawan PKS was $35,85 \mu\text{g}/\text{m}^3$ and Kantor & Gudang was $26,85 \mu\text{g}/\text{m}^3$, while at 24-hours in Halaman Kantor PKS was $25,72 \mu\text{g}/\text{m}^3$ and Perumahan Karyawan PKS (Pondok 5) was $23,99 \mu\text{g}/\text{m}^3$. The highest and lowest dispersion of NO_2 at 1-hour in Kantin Karyawan PKS was $115,64 \mu\text{g}/\text{m}^3$ and Kantor & Gudang was $38,77 \mu\text{g}/\text{m}^3$, while at 24-hours in Kantin Karyawan PKS was $36,36 \mu\text{g}/\text{m}^3$ and Perumahan Karyawan PKS (Pondok 5) was $24,36 \mu\text{g}/\text{m}^3$. AERMOD model validation for SO_2 $19,94\% < 25\%$ (valid) and $\text{NO}_2 > 25\%$ (invalid). The highest and lowest chimney emission contribution of SO_2 at 1-hour in Halaman Kantor PKS was $10,35\%$ and Halaman Toko Bu Sakti was 0% , while at 24-hours in Halaman Kantor PKS was $6,77\%$ and Perumahan Karyawan PKS (Pondok 5) was $0,62\%$. The highest and lowest contribution of NO_2 at 1-hour in Halaman Kantor PKS was $18,46\%$ and Halaman Toko Bu Sakti was 0% , while at 24-hours in Halaman Kantor PKS was $30,12\%$ and Perumahan Karyawan PKS was $0,92\%$. The actual unmeasured receptors are smaller than the ambient air quality standards.

Keywords: Boiler Chimneys, SO_2 and NO_2 Emissions, Palm Oil Industry, AERMOD Model, Air Dispersion Modelling

1. PENDAHULUAN

Pada kegiatan operasional *boiler* pabrik kelapa sawit selain menghasilkan uap (*steam*) juga menghasilkan emisi gas buang (polutan pencemar udara). *Boiler* dengan bahan bakar cangkang dan *fiber* kelapa sawit umumnya menghasilkan emisi partikulat, SO₂, dan NO₂ (Sugiarto *et al.*, 2019). Cerobong *boiler* digunakan sebagai sarana untuk menyalurkan gas buang ke udara ambien dan merupakan emisi sumber titik (*point source*) dari industri pengolahan kelapa sawit (PKS). Emisi yang keluar dari cerobong khususnya yang berbentuk gas akan terlarut dalam udara dan dapat langsung masuk ke dalam paru-paru yang selanjutnya akan diserap oleh sistem peredaran darah (Peraturan Menteri Negara Lingkungan Hidup RI, 2010). Oleh karena itu, sebaran gas SO₂ dan NO₂ sulit untuk diketahui dan dilihat oleh mata secara langsung sehingga dalam jangka panjang dapat berdampak serius terhadap kesehatan manusia. Hasil penelitian terdahulu Masito (2018) menunjukkan bahwa seseorang yang terpapar oleh polutan gas SO₂ dan NO₂ di udara ambien dapat mengakibatkan terjadinya penurunan fungsi paru. Selain itu, ketika terpapar secara terus menerus dalam jangka waktu lama, kemungkinan adanya keluhan gangguan pernafasan juga semakin besar.

Kualitas udara di lingkungan industri sangat ditentukan oleh emisi yang dikeluarkan dari cerobong pabrik (Sugiarto *et al.*, 2019). Gas SO₂ dan NO₂ yang diemisikan melalui cerobong akan terdispersi ke udara ambien menuju area sekitar pabrik sehingga kualitas udara harus terus dilakukan pemantauan untuk memastikan udara ambien memenuhi baku mutu yang telah ditetapkan. Namun, pemantauan kualitas udara yang dilakukan oleh pabrik terbatas karena membutuhkan biaya besar, waktu yang lama serta teknologi canggih sehingga dibutuhkan pemodelan kualitas udara sebagai alternatif yang dapat membantu memperkirakan sebaran dan dampak pencemaran dari sumber emisi yang sebelumnya tidak terpantau oleh kegiatan *sampling* terjadwal di industri PKS. Salah satu pemodelan kualitas udara yang digunakan ialah dengan model AERMOD karena mampu memodelkan sebaran dan dampak pencemaran dari beberapa sumber pencemar sekaligus.

Dalam prakteknya, kinerja model AERMOD harus dievaluasi untuk memastikan bahwa pemodelan yang dilakukan akurat (Venkatram, 1981). Agar dapat memperoleh hasil akurat antara pengukuran aktual dengan model AERMOD, maka selain *input* emisi dari sumber titik (cerobong) juga diperlukan *input* dari sumber lain seperti sumber bergerak yang berpotensi menambah peningkatan konsentrasi pencemar di sekitar titik *sampling* udara ambien. Peneliti terdahulu Zou *et al.*, (2010) telah mengevaluasi kinerja model AERMOD dengan menggunakan 3 (tiga) skenario yaitu *input* sumber titik, sumber bergerak, dan gabungan sumber titik dan

bergerak sehingga diperoleh hasil yang menunjukkan bahwa model AERMOD dapat bekerja dengan baik (data *output* mendekati data aktual) ketika sumber titik dan sumber bergerak digunakan sebagai data *input* ke model. Penelitian dilakukan dengan memodelkan sebaran emisi gas buang industri pengolahan kelapa sawit PTPN VI Unit Usaha Pinang Tinggi, di mana pada kegiatan operasionalnya menggunakan bahan bakar cangkang dan *fiber* kelapa sawit sehingga berpotensi menyumbangkan emisi SO₂ dan NO₂ ke udara ambien sekaligus untuk menguji tingkat validitas model AERMOD.

2. METODOLOGI

2.1 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian dilakukan di PTPN VI Unit Usaha Pinang Tinggi yang terletak di Kabupaten Muaro Jambi, Provinsi Jambi. Waktu pengambilan sampel dilakukan pada 29 Juni 2022 sesuai jadwal pemantauan emisi dan udara ambien Semester I. Titik *sampling* udara emisi berasal dari cerobong *boiler* PKS (Pabrik Kelapa Sawit) dan 5 (lima) titik di lokasi udara ambien sekitar industri.

2.2 Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan pada penelitian, terdiri dari WRPLOT *View* untuk membuat *windrose*, AERMET *View* untuk mengolah data meteorologi, AERMOD *View* untuk pemodelan sebaran dan konsentrasi SO₂ dan NO₂, Google Earth Pro untuk *overlay* sebaran emisi SO₂ dan NO₂, serta meteran untuk mengukur lebar jalan sekitar titik sampling udara ambien.

2.3 Metode Penelitian

Metode penelitian yang digunakan adalah metode kuantitatif. Pengukuran udara ambien dilakukan dengan menggunakan *impinger*, di mana konsentrasi SO₂ dihitung dengan spektrofotometer metode Pararosanilin yang mengacu pada SNI 19-7119.7-2005 dan konsentrasi gas NO₂ menggunakan metode Griess Saltzman yang mengacu pada SNI 19-7119.2-2005. Selain itu, dilakukan juga inventarisasi emisi dengan mengestimasi emisi dari *line source*.

2.4 Pengumpulan Data

2.4.1 Data Primer

Data primer diperoleh dari pengukuran udara ambien secara aktual yang bekerja sama dengan PT Jambi Lestari Internasional selaku pihak ke-3. Data primer yang dibutuhkan dalam penelitian ini adalah 4 titik data konsentrasi SO₂ dan NO₂ sebagai *upwind* dan *downwind* di

mana *upwind* merupakan data *input* ke AERMOD. Selain itu, dilakukan perhitungan secara manual jumlah kendaraan truk, mobil, dan sepeda motor yang melintas dalam 1 jam selama *sampling*.

2.4.2 Data Sekunder

Data sekunder terdiri dari data meteorologi per jam bulan Juni tahun 2017-2022, data emisi dan spesifikasi cerobong *boiler*, data titik reseptor pada Halaman Kantor PKS, emisi lalu lintas kendaraan bermotor, dan kontur penelitian berupa DEM.

2.5 Analisis Data

2.5.1 Sebaran konsentrasi SO_2 dan NO_2 di Udara Ambien

Pengolahan data awal sebelum di *input* ke AERMOD, terdiri dari:

- Pengolahan Data Arah dan Kecepatan Angin dengan WRPLOT *View*
- Perhitungan Estimasi Intensitas Emisi dari Gas Buang Kendaraan Bermotor di Jalan (*Line Source*)

Estimasi emisi gas buang kendaraan dihitung dengan metode *Tier 2* berdasarkan faktor emisi berbasis *Vehicle Kilometer Traveled* (VKT) sesuai kategori kendaraan. Faktor emisi yang digunakan untuk SO_2 mengacu pada Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 12 Tahun 2010 sedangkan NO_2 sebagai NOx mengacu pada faktor emisi EEA. Menurut Kementerian Lingkungan Hidup (2013), persamaan yang digunakan untuk menghitung estimasi emisi *line source* berbasis VKT adalah sebagai berikut.

$$VKT_{j.line} = \left[\sum_{i=1}^n Q_{ji} \times I_i \right] \quad (1.1)$$

$$E_{cji} = VKT_{ji} \times EF_{cj} \times (100 - C) / 100 \quad (1.2)$$

Keterangan:

$VKT_{j.line}$ = VKT kendaraan j di ruas jalan i dihitung sebagai *line source* (km/tahun)

Q_{ji} = volume kendaraan dalam kategori j pada ruas jalan i (kendaraan/tahun)

I_i = panjang ruas jalan i (km)

E_{cji} = emisi pencemar c untuk kendaraan kategori j pada ruas jalan i

EF_{cj} = faktor emisi pencemar c untuk kendaraan kategori j (g/km)

C = efisiensi peralatan pengendali emisi (%), jika tidak terpasang alat pengendali maka nilai 0.

- Pengolahan Data Meteorologi dengan AERMET *View*

- Pemodelan SO_2 dan NO_2 dengan AERMOD *View*

2.5.2 *Validasi Model*

Validasi model dilakukan dengan menggunakan metode *Root Mean Square Percent Error* (RMSPE) untuk melihat besar dan sifat *error* yang terjadi. Tingkat akurasi model dapat terpenuhi jika nilai RMSPE <25% yang memiliki arti bahwa model dapat diterima (*acceptable*) dan <10% memiliki arti bahwa model dalam kategori baik (*good*) (Reed *et al.*, 2015). Menurut Marlina *et al.*, (2015), RMSPE dapat mengukur rata-rata persentase perbedaan antara data aktual dan hasil simulasi dengan menggunakan persamaan berikut.

$$\text{RMSPE} = \sqrt{\frac{1}{n} \left[\sum_{n=1}^n \left(\frac{St-At}{At} \right)^2 \right]} \times 100 \quad (1.3)$$

Keterangan:

St = nilai konsentrasi simulasi pada waktu t

At = nilai konsentrasi aktual pada waktu t

n = jumlah titik pengukuran ($t = 1, 2, \dots, n$)

2.5.3 *Kontribusi SO₂ dan NO₂ dari Sebaran Emisi Cerobong Boiler*

Dalam memperoleh kontribusi emisi SO₂ dan NO₂ dari sebaran emisi cerobong *boiler*, dilakukan dengan perhitungan dimana konsentrasi titik reseptor yang telah di *running* dengan *input Background Concentration* (BC), *Point Source* (PS), dan *Line Source* (LS) dikurangi dengan konsentrasi titik reseptor yang di *running* dengan *input BC* dan *LS* sehingga dapat diperoleh selisih antara keduanya yang merupakan kontribusi emisi cerobong *boiler*.

2.5.4 *Sebaran Konsentrasi pada Titik Reseptor (Tidak Terukur Aktual) Dibandingkan dengan Baku Mutu Udara Ambien*

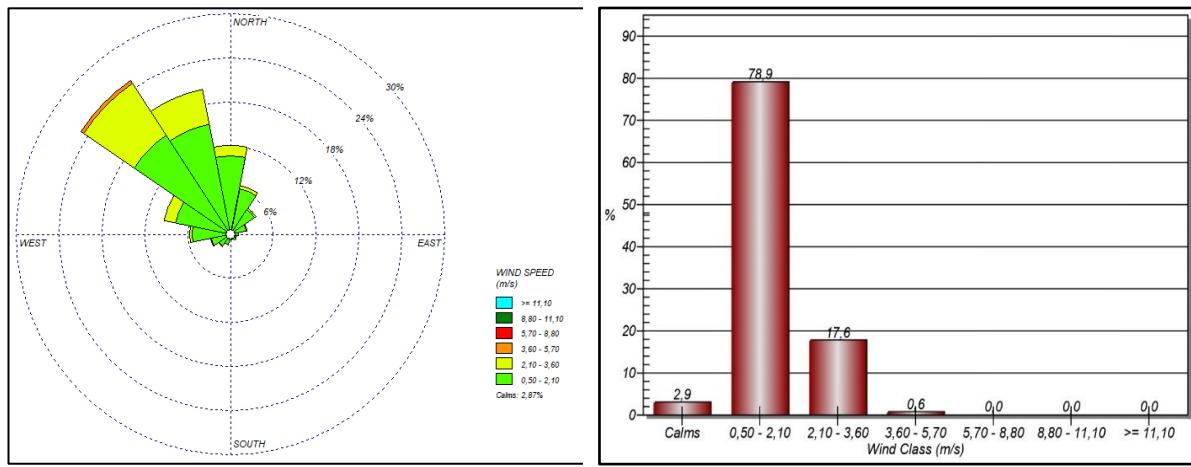
Sebaran konsentrasi emisi gas SO₂ dan NO₂ pada titik reseptor tidak terukur aktual di udara ambien dari hasil pengolahan data *input BC*, *PS*, dan *LS* yang di *running* menggunakan model *AERMOD* dibandingkan dengan baku mutu udara ambien pada periode 1 jam dan 24 jam berdasarkan Lampiran VII Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 *Data Meteorologi Arah dan Kecepatan Angin*

Data meteorologi arah dan kecepatan angin yang digunakan adalah data per jam selama 24 jam pada bulan Juni tahun 2017-2022 yang diperoleh dari <https://cds.climate.copernicus.eu/> sesuai lokasi penelitian. Pengolahan data angin menggunakan WRPLOT *View* menghasilkan *windrose*

yang menunjukkan arah angin dominan (*blowing to*) ke Barat Laut dan frekuensi ditribusi kelas angin terbanyak pada rentang 0,5-2,1 m/s sebesar 78,9% seperti terdapat pada Gambar 1.

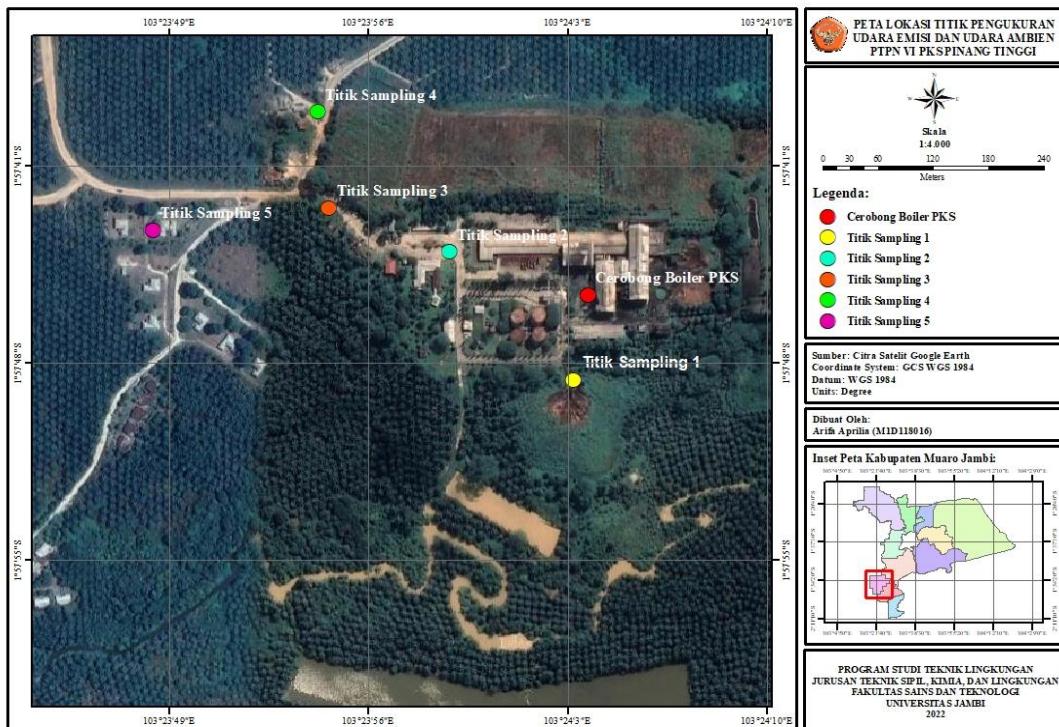


(a)

(b)

Gambar 1. (a) *Windrose (blowing to)* area PKS Pinang Tinggi and (b) Frekuensi distribusi kelas angin area PKS Pinang Tinggi

Berdasarkan *windrose* pada Gambar 1 (a), terlihat bahwa arah angin dominan berhembus dari Tenggara ke Barat Laut sehingga titik *sampling* SO₂ dan NO₂ ditentukan seperti pada Gambar 2.



Gambar 2. Lokasi Titik *Sampling*

3.2 Data Pengukuran SO₂ dan NO₂ Aktual

3.2.1 Data Emisi Cerobong Boiler

Spesifikasi cerobong *boiler* yang digunakan dalam *input* model AERMOD diperoleh dari data perusahaan berdasarkan hasil pemantauan emisi Semester I tahun 2022 dengan kondisi pengukuran saat pabrik beroperasi dengan kapasitas 30-ton TBS/jam seperti yang terdapat pada Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi Cerobong *Boiler* PKS Pinang Tinggi

Koordinat Cerobong		Tinggi	Diameter	Suhu	Laju	Kecepatan
X	Y	Cerobong	Cerobong	Gas	Alir	Gas
			Buang	Gas	Buang	Buang
		*			*	Buang
UTM		m	m	°C	m^3/s	m/s
322154,92	9782980,50	26	1,4	305	38,63	25,08

Sumber: Data Perusahaan, 2022

Keterangan: *Sasmita *et al.*, (2019)

Satuan laju emisi yang diperoleh dari perusahaan ialah mg/Nm³ (milligram per normal meter kubik udara) atau sama dengan mg/m³ (milligram per meter kubik udara). Satuan tersebut harus dikonversi ke g/s agar dapat di *input* ke model AERMOD. Data laju emisi terdapat pada Tabel 2 berikut.

Tabel 2. Laju Emisi Cerobong *Boiler* PKS Pinang Tinggi

Parameter	Jam	Laju Emisi	Laju emisi (g/s)
	Pengukuran	(mg/Nm ³)	
SO ₂	15.00 WIB	25,97	1,0032211
NO ₂	15.00 WIB	145,91	5,6365033

Sumber: Data perusahaan, 2022

3.2.2 Data Pengukuran SO₂ dan NO₂ di Udara Ambien

Data hasil *sampling* udara ambien berjumlah 5 titik dimana titik ke-1 sebagai *upwind* dan titik 2,3,4,5 sebagai *downwind*. Data konsentrasi SO₂ dan NO₂ hasil *sampling* ditunjukkan pada Tabel 3 berikut.

Tabel 3. Data konsentrasi SO₂ dan NO₂ di Udara Ambien

Titik ke-	Keterangan Titik	Titik Koordinat		Jam Pengukuran (WIB)	SO ₂	NO ₂
		X	Y			
UTM						
1	Upwind area PKS**	322139,55	9782888,34	15.35	<23,15	18,01
2	Halaman Kantor PKS*	322004,06	9783027,35	12.10	<23,15	<17,63
Titik ke-	Keterangan Titik	Titik Koordinat		Jam Pengukuran (WIB)	SO ₂	NO ₂
		X	Y			
UTM						
3	Kantin Karyawan PKS**	321873,60	9783075,45	16.42	32,49	<17,63
4	Halaman Toko Bu Sakti**	321861,14	9783179,87	17.58	<23,15	<17,63
5	Perumahan Karyawan PKS**	321682,02	9783050,70	19.05	34,88	<17,63

Sumber: *Data sekunder **Data primer

Keterangan: Tanda kecil pada konsentrasi emisi (<) merupakan batas deteksi alat

3.2.3 Estimasi emisi SO₂ dan NO₂ dari Sumber Garis (Line Source)

Estimasi emisi kendaraan dihitung dengan metode *Tier 2* berdasarkan faktor emisi berbasis kilometer jalan kendaraan (VKT) sesuai kategori kendaraan. Faktor emisi yang digunakan untuk SO₂ mengacu pada PERMENLH/12/2010 sedangkan NO₂ sebagai NOx mengacu pada EEA. Persamaan untuk perhitungan emisi dipilih jenis jalan utama menyesuaikan dengan kondisi serta fungsi jalan di lokasi penelitian dan disesuaikan satunya sehingga dapat diperoleh hasil dalam satuan g/s. Rekapitulasi hasil estimasi emisi menggunakan persamaan (1.1) dan (1.2) dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Estimasi Emisi Jalan Utama (*Line Source*) di Sekitar Titik Pengukuran Udara Ambien

No	Titik	Keterangan Titik	Kategori Kendaraan	SO ₂ (g/s)	NO ₂ (g/s)
1	Titik 2	Halaman Kantor PKS	Sepeda motor	$2,5 \times 10^{-6}$	$5,6 \times 10^{-5}$
			Mobil	$2,3 \times 10^{-5}$	$1,4 \times 10^{-4}$
			Truk	$2,2 \times 10^{-4}$	$1,7 \times 10^{-3}$
Total				$2,4 \times 10^{-4}$	$1,9 \times 10^{-3}$
2	Titik 3	Kantin Karyawan PKS	Sepeda motor	$2,1 \times 10^{-5}$	$4,7 \times 10^{-4}$
			Mobil	$7,4 \times 10^{-5}$	$4,1 \times 10^{-5}$
			Truk	$6,5 \times 10^{-4}$	$5,1 \times 10^{-3}$
Total				$7,5 \times 10^{-4}$	$5,6 \times 10^{-3}$
3	Titik 4	Halaman Toko Bu Sakti	Sepeda motor	$2,3 \times 10^{-5}$	$5,0 \times 10^{-4}$
			Mobil	$1,2 \times 10^{-4}$	$7,4 \times 10^{-4}$
			Truk	$3,4 \times 10^{-4}$	$2,7 \times 10^{-3}$
Total				$4,9 \times 10^{-4}$	$3,9 \times 10^{-3}$
4	Titik 5	Perumahan Karyawan PKS	Sepeda motor	$7,9 \times 10^{-5}$	$1,8 \times 10^{-3}$
			Mobil	$3,8 \times 10^{-4}$	$2,3 \times 10^{-3}$
			Truk	$1,4 \times 10^{-3}$	$1,1 \times 10^{-2}$
Total				$1,8 \times 10^{-3}$	$1,5 \times 10^{-2}$

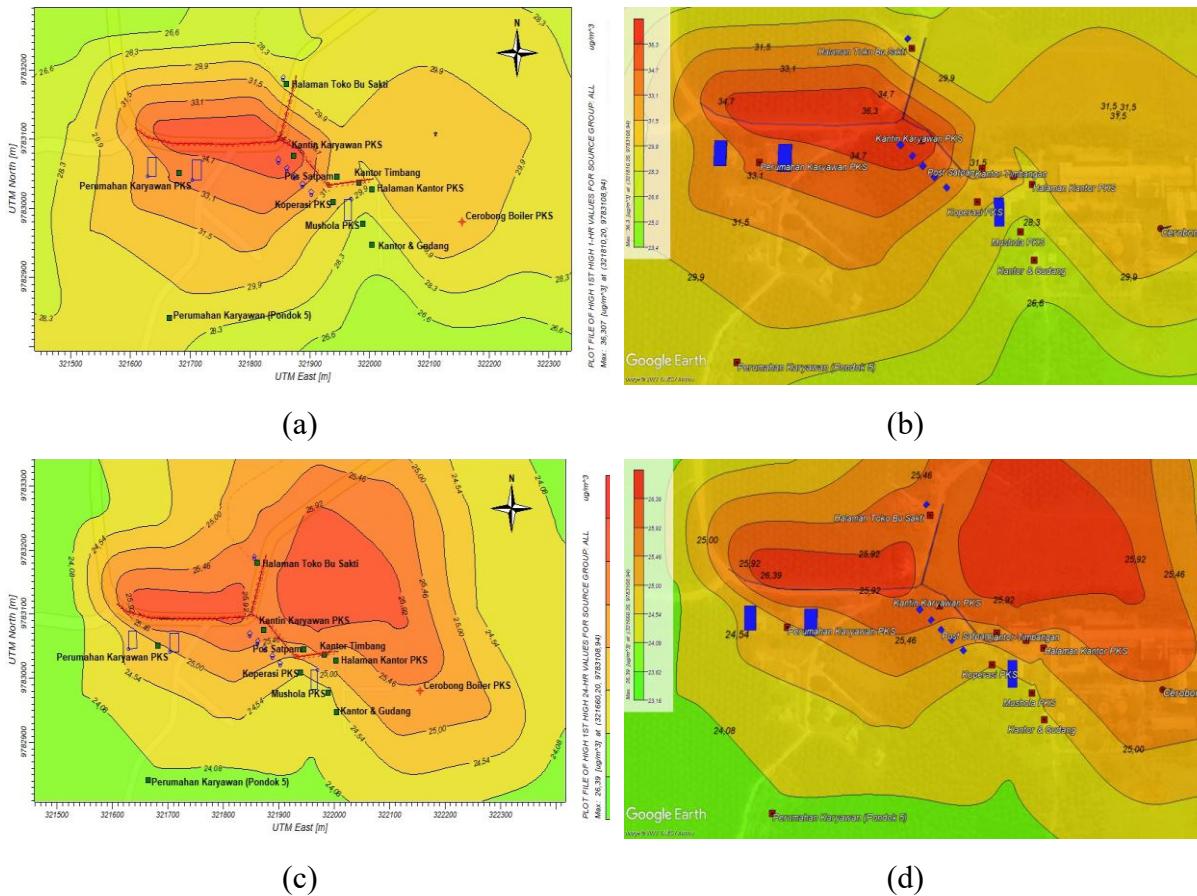
Sumber: Hasil analisis, 2022

3.3 Sebaran Konsentrasi SO₂ dan NO₂ pada Titik Reseptor Sekitar Pabrik

Data *background concentration*, emisi *point source* dan *line source* merupakan data *input* utama yang digunakan pada model AERMOD untuk mendapatkan sebaran dan konsentrasi rata-rata 1 jam dan 24 jam dari SO₂ dan NO₂. Titik reseptor terukur aktual yaitu Halaman Kantor PKS, Kantin Karyawan PKS, Halaman Toko Bu Sakti, Perumahan Karyawan PKS sedangkan reseptor tidak terukur aktual yaitu Mushola PKS, Kantor & Gudang, Kantor Timbang, Pos Satpam, Koperasi PKS, Perumahan Karyawan PKS (pondok 5).

3.3.1 Sebaran Konsentrasi Sulfur Dioksida (SO_2)

Hasil sebaran berupa *isopleth* dan *overlay* ke *Google Earth* ditunjukkan pada Gambar 3 berikut.

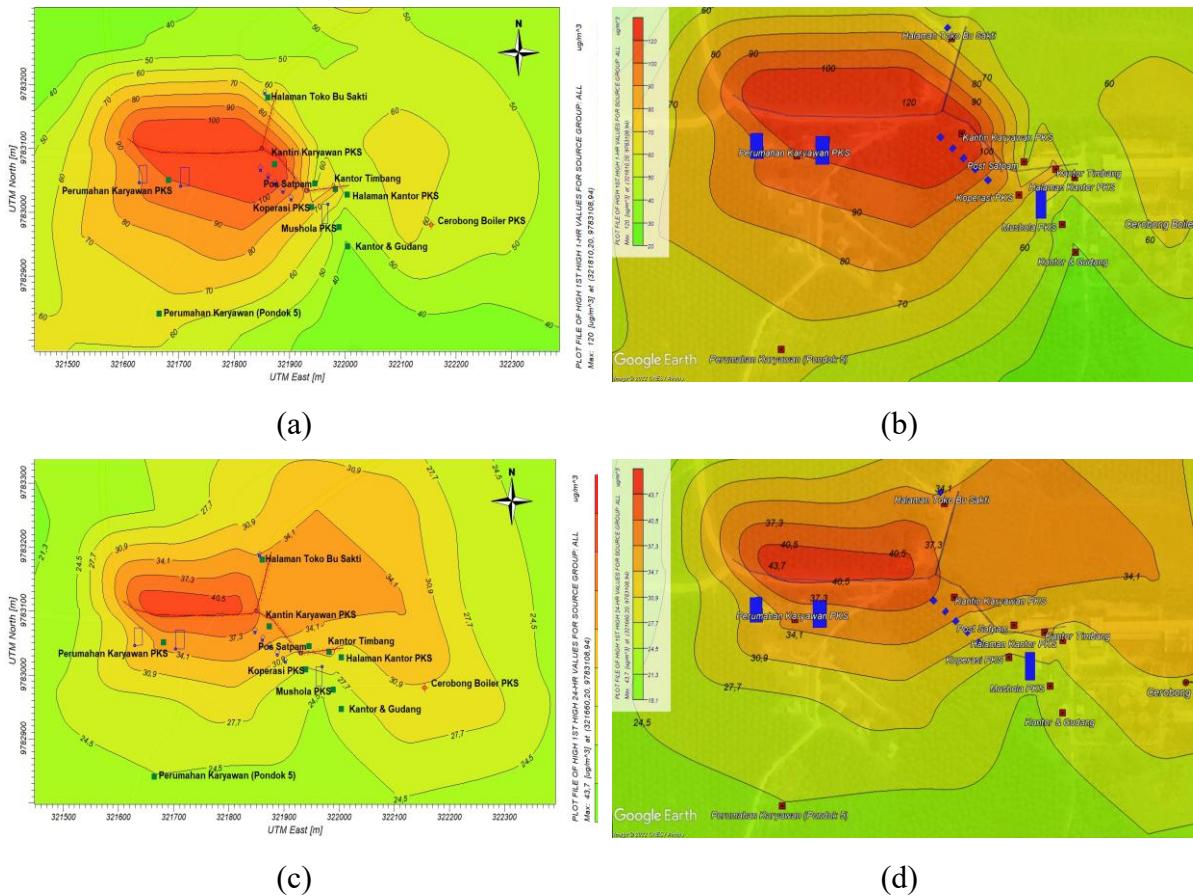


Gambar 1. (a) Sebaran SO_2 periode 1 jam, (b) *Overlay* sebaran SO_2 periode 1 jam, (c) Sebaran SO_2 periode 24 jam, (d) *Overlay* sebaran SO_2 periode 24 jam

Berdasarkan Gambar 3 di atas, diketahui konsentrasi maksimum rata-rata 1 jam berada pada titik koordinat UTM 321810,20 m ; 9783108,94 m dengan konsentrasi $36,31 \mu\text{g}/\text{m}^3$ berlokasi tepat depan persimpangan 3 (tiga) jalan dekat dengan titik reseptor Kantin Karyawan. Sebaran konsentrasi tertinggi dan terendah SO_2 pada 1 jam di Kantin Karyawan PKS sebesar $35,85 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dan Kantor & Gudang sebesar $26,84 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Konsentrasi maksimum rata-rata 24 jam berada di titik koordinat UTM 321660,20 m ; 9783108,94 m dengan konsentrasi sebesar $26,39 \mu\text{g}/\text{m}^3$ berlokasi tepat di dekat tepi jalan utama berseberangan titik *sampling* 5 udara ambien. Sebaran konsentrasi tertinggi dan terendah SO_2 24 jam di Halaman Kantor PKS sebesar $25,72 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dan Perumahan Karyawan PKS (pondok 5) sebesar $23,99 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

3.3.2 Sebaran Konsentrasi Nitrogen Dioksida (NO_2)

Hasil sebaran berupa *isopleth* dan *overlay* ke *Google Earth* ditunjukkan pada Gambar 4 berikut.



Gambar 2. (a) Sebaran NO_2 periode 1 jam, (b) *Overlay* sebaran NO_2 periode 1 jam, (c) Sebaran NO_2 periode 24 jam, (d) *Overlay* sebaran NO_2 periode 24 jam

Berdasarkan Gambar 4 di atas, diketahui bahwa konsentrasi maksimum NO_2 periode 1 jam berada pada titik koordinat UTM 321810,20 m ; 9783108,94 m dengan konsentrasi $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ berlokasi tepat persimpangan 3 (tiga) jalan dekat dengan titik reseptor Kantin Karyawan. Sebaran konsentrasi pada reseptor untuk NO_2 periode 1 jam tertinggi dan terendah di Kantin Karyawan PKS sebesar $115,64 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dan Kantor & Gudang sebesar $38,77 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Konsentrasi maksimum NO_2 periode 24 jam berada pada UTM 321660,20 m ; 9783108,94 m dengan konsentrasi $43,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ berlokasi dekat jalan utama berseberangan titik sampling ke-5 udara ambien. Sebaran konsentrasi pada reseptor untuk NO_2 periode 24 jam tertinggi dan terendah di Kantin Karyawan PKS sebesar $36,36 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dan Perumahan Karyawan PKS (pondok 5) sebesar $24,36 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Faktor-faktor yang mempengaruhi tingginya konsentrasi pencemar pada Gambar 3 dan Gambar 4 dipengaruhi oleh emisi kendaraan (*line source*) yang melintas di jalan tanah, faktor

meteorologi utama seperti suhu, kecepatan dan arah angin, kelembaban, presipitasi, radiasi matahari, dan tutupan awan. Selain itu, kestabilan atmosfer memainkan peran penting dalam proses dispersi polutan pencemar di udara, di mana atmosfer yang stabil cenderung menghambat proses dispersi polutan sehingga konsentrasi polutan meningkat sedangkan atmosfer tidak stabil dapat membantu proses dispersi polutan sehingga konsentrasi polutan rendah. Hal ini sesuai dengan penelitian Dewi *et al.*, (2018) bahwa konsentrasi maksimum SO₂, NO₂, dan partikulat akan semakin tinggi seiring dengan adanya pengaruh stabilitas atmosfer.

3.4 Uji Validitas AERMOD dengan Metode *Root Mean Square Percent Error* (RMSPE)

Dalam memvalidasi hasil pemodelan AERMOD, terlebih dahulu dilakukan kalibrasi pada AERMET yang mana dalam mengkalibrasi model terdapat 3 parameter modifikasi (*albedo*, *bowen ratio*, dan *surface roughness*) yang harus disesuaikan untuk meminimalisir ketidak-akuratan model. Tiga parameter modifikasi lokasi penelitian dapat dilihat pada Tabel 5 berikut.

Tabel 5. Nilai *Albedo*, *Bowen Ratio*, dan *Surface Roughness* Setiap Sektor

Sektor	Start (°)	End (°)	Bulan	Albedo	Bowen Ratio	Surface Roughness
Sektor 1	0	100		0,28	3	0,12
Sektor 2	100	250	Juni	0,2	2,5	3,71
Sektor 3	250	300		0,4	2,8	4,69
Sektor 4	300	0		0,48	3	7,2

Sumber: Hasil analisis, 2022

Berdasarkan perhitungan RMSPE menggunakan persamaan (1.3), titik reseptor aktual di Halaman Kantor PKS, Kantin Karyawan PKS, Halaman Toko Bu Sakti, dan Perumahan Karyawan PKS pada periode 1 jam yang dibandingkan dengan hasil model AERMOD diperoleh hasil bahwa SO₂ memiliki RMSPE sebesar 19,94% < 25% (valid) sedangkan NO₂ > 25% (tidak valid). RMSPE yang besar pada NO₂ diartikan sebagai hasil pengukuran aktual dan prediksi yang memiliki nilai *error* besar sehingga keakuratan model tidak dapat terpenuhi. Ketidak-akuratan prediksi model AERMOD dengan aktual (model > aktual) kemungkinan besar disebabkan oleh reaksi kimia polutan NO₂ di udara seperti reaksi penghancuran polutan, pembentukan polutan sekunder atau siklus perubahan bentuk pencemar ke bentuk lain saat *sampling* dilakukan. Selain itu, waktu pengukuran di lapangan termasuk siang menjelang sore di mana pada waktu tersebut penyinaran matahari yang sampai ke permukaan bumi semakin berkurang sehingga mempengaruhi kinerja alat spektrofotometer sinar tampak serta keberadaan

pohon-pohon besar di sekitar titik *sampling* juga berpotensi untuk mereduksi gas NO₂ sehingga yang tertangkap pada alat jerap lebih sedikit.

3.5 Kontribusi SO₂ dan NO₂ di Udara Ambien dari Sebaran Emisi Cerobong Boiler

Data *input Background Concentration* (BC), *Point Source* (PS) dan *Line Source* (LS), SO₂ dan NO₂ dimodelkan dengan *AERMOD* lalu di *running* untuk mendapatkan konsentrasi sebaran. Hasil yang diperoleh dari *output* model *AERMOD* menunjukkan bahwa kontribusi emisi cerobong *boiler* untuk SO₂ tertinggi dan terendah pada periode 1 jam berada di Halaman kantor PKS sebesar 10,35% dan Halaman Toko Bu Sakti sebesar 0%, sedangkan 24 jam berada di Halaman Kantor PKS sebesar 6,77% dan Perumahan Karyawan PKS (pondok 5) sebesar 0,62%. Konsentrasi NO₂ periode 1 jam tertinggi dan terendah berada di Halaman Kantor PKS sebesar 18,46% dan Halaman Toko Bu Sakti sebesar 0%, sedangkan 24 jam berada di Halaman Kantor PKS sebesar 30,12% dan Perumahan Karyawan PKS sebesar 0,92%. Secara keseluruhan, kontribusi emisi SO₂ dan NO₂ dari cerobong *boiler* PKS terhadap reseptor tergolong rendah. Salah satu faktor utama yang menyebabkan rendahnya kontribusi emisi ke reseptor kemungkinan besar dikarenakan terjadinya pengenceran polutan saat proses *sampling*.

3.6 Sebaran Konsentrasi SO₂ dan NO₂ (Tidak Terukur Aktual) Dibandingkan dengan Baku Mutu Udara Ambien

Titik reseptor tidak terukur aktual terdiri dari Mushola PKS, Kantor & Gudang, Kantor Timbang, Pos Satpam, Koperasi PKS, dan Perumahan Karyawan (pondok 5). Penelitian menunjukkan konsentrasi SO₂ periode 1 jam di semua reseptor berada pada rentang 26-30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dan periode 24 jam berada di rentang 23-25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. NO₂ periode 1 jam berada pada rentang 38-73 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dan periode 24 jam di rentang 24-31 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Menurut Peraturan Pemerintah (2021), baku mutu udara ambien yang ditetapkan sesuai Lampiran VII Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 untuk SO₂ periode 1 jam dan 24 jam yaitu 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dan 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ sedangkan untuk NO₂ periode 1 jam dan 24 jam adalah 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dan 65 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Berdasarkan hasil penelitian, diketahui bahwa pada titik reseptor tidak terukur aktual masih berada dalam batas aman karena nilai konsentrasiannya lebih kecil dari baku mutu yang ditetapkan.

4. KESIMPULAN

Kesimpulan dari penelitian yang telah dilakukan, antara lain sebagai berikut.

1. Sebaran konsentrasi pada reseptor untuk SO₂ tertinggi dan terendah dengan periode 1 jam berada di Kantin Karyawan PKS sebesar 35,85 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dan Kantor & Gudang sebesar 26,84

$\mu\text{g}/\text{m}^3$ sedangkan periode 24 jam di Halaman Kantor PKS sebesar $25,72 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dan Perumahan Karyawan PKS (pondok 5) sebesar $23,99 \mu\text{g}/\text{m}^3$. NO_2 periode 1 jam tertinggi dan terendah berada di Kantin Karyawan PKS sebesar $115,64 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dan Kantor & Gudang sebesar $38,77 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sedangkan periode 24 jam berada di Kantin Karyawan PKS sebesar $36,36 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dan Perumahan Karyawan PKS (pondok 5) sebesar $24,36 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

2. Validasi model AERMOD dengan metode *Root Mean Square Percent Error* (RMSPE) untuk SO_2 memiliki nilai akurasi sebesar $19,94\% < 25\%$ (valid) sedangkan untuk $\text{NO}_2 > 25\%$ (tidak valid) kemungkinan besar disebabkan oleh reaksi kimia polutan NO_2 di udara seperti pembentukan polutan sekunder saat *sampling* dilakukan, waktu pengukuran menjelang sore hari menyebabkan penyinaran matahari yang sampai ke permukaan bumi semakin berkurang dan mempengaruhi kinerja alat spektrofotometer sinar tampak serta keberadaan pohon-pohon besar sekitar titik *sampling* juga berpotensi untuk mereduksi gas NO_2 dan yang tertangkap alat jerap lebih sedikit.

3. Kontribusi emisi cerobong *boiler* untuk SO_2 tertinggi dan terendah pada periode 1 jam berada di Halaman kantor PKS sebesar $10,35\%$ dan Halaman Toko Bu Sakti sebesar 0% , sedangkan periode 24 jam di Halaman Kantor PKS sebesar $6,77\%$ dan Perumahan Karyawan PKS (pondok 5) sebesar $0,62\%$. NO_2 periode 1 jam tertinggi dan terendah berada di Halaman Kantor PKS sebesar $18,46\%$ dan Halaman Toko Bu Sakti sebesar 0% , sedangkan periode 24 jam di Halaman Kantor PKS sebesar $30,12\%$ dan Perumahan Karyawan PKS sebesar $0,92\%$.

4. Sebaran konsentrasi yang dibandingkan dengan baku mutu udara ambien sesuai Lampiran VII berdasarkan Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 untuk SO_2 dan NO_2 periode 1 jam dan 24 jam di setiap titik reseptor yang tidak terukur aktual masih berada di bawah baku mutu.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada PT Perkebunan Nusantara VI Unit Usaha Pinang Tinggi yang telah memberikan izin kepada penulis untuk melakukan penelitian di lingkungan kerja perusahaan dan PT Jambi Lestari Internasional selaku pihak ke 3 yang telah membantu dalam pengambilan dan pengujian sampel udara ambien.

DAFTAR PUSTAKA

Dewi, N. W. S. P., June, T., Yani, M., & Mujito, M. (2018). Estimasi Pola Dispersi Debu, SO_2 dan NO_x dari Industri Semen Menggunakan Model Gauss yang Diintegrasikan dengan

Screen3. *Jurnal Pengelolaan Sumberdaya Alam Dan Lingkungan*, 8(1), 109–119.
<https://doi.org/10.29244/jpsl.8.1.109-119>

Kementerian Lingkungan Hidup (2013). Pedoman Teknis Penyusunan Inventarisasi Emisi Pencemar Udara di Perkotaan.

Marlina, N., Kasam, K., & Juliani, A. (2015). Evaluasi Daya Tampung Terhadap Beban Pencemar Menggunakan Model Kualitas Air (Studi Kasus: Sungai Winongo). *Jurnal Inovasi Dan Kewirausahaan*, 4(2), 78–86. <https://doi.org/10.20885/ajie.vol4.iss2.art2>

Masito, A. (2018). Risk Assessment Ambient Air Quality (NO₂ and SO₂) and The Respiratory Disorders to Communities in the Kalianak Area of Surabaya. *Jurnal Kesehatan Lingkungan*, 10(4), 394–401. <https://doi.org/10.20473/jkl.v10i4.2018.394-401>

Peraturan Pemerintah (2021). Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 tentang Pedoman Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup.

Peraturan Menteri Negara Lingkungan Hidup RI (2010). Pelaksanaan Pengendalian Pencemaran Udara di Daerah.

Reed, K. F., Casper, D. P., France, J., & Kebreab, E. (2015). Prediction of Nitrogen Efficiency in Dairy Cattle: A review. *CAB Reviews: Perspectives in Agriculture, Veterinary Science, Nutrition and Natural Resources*, 10(001). <https://doi.org/10.1079/PAVSNNR201510001>

Sasmita, A., Andrio, D., & Hasibuan, P. (2019). Pemetaan Sebaran Partikulat Dari Pembakaran Limbah Padat Industri Pengolahan Sawit Di Kabupaten Kampar, Riau. *Sains Dan Teknologi*, 18(2), 57–67.

Sugiarto, Herawati, P., & Riyanti, A. (2019). Analisis 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*, 2(1), 21–28. <https://doi.org/10.33087/daurling.v2i1.20>

Venkatram, A. (1981). Model predictability with reference to concentrations associated with point sources. *Atmospheric Environment* (1967), 15(9), 1517–1522. [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(81\)90133-5](https://doi.org/10.1016/0004-6981(81)90133-5)

Zou, B., Benjamin Zhan, F., Gaines Wilson, J., & Zeng, Y. (2010). Performance of AERMOD at Different Time Scales. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 18(5), 612–623. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2010.01.005>