

## Strategi Pengelolaan Kualitas Udara Berbasis Model Prediktif (AERMOD) di Sekitar Kawasan PT X

Ana Uswatun Hasanah<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup> Program Studi Teknik Lingkungan, Universitas Islam Indonesia

\*email: [ana.hasanah@uii.ac.id](mailto:ana.hasanah@uii.ac.id)

### Abstrak

PT X merupakan perusahaan yang bergerak di sektor perkebunan dan pengolahan kelapa sawit. Dalam proses produksi minyak sawit mentah (CPO) dan minyak inti kelapa sawit (CPKO), perusahaan ini menghasilkan emisi  $\text{NO}_2$ ,  $\text{PM}_{10}$ , dan  $\text{SO}_2$  dari kegiatan pembakaran yang terjadi di dalam boiler dan genset. Emisi ini berpotensi memengaruhi kualitas udara ambien di sekitar area perusahaan dan dapat menimbulkan risiko kesehatan bagi masyarakat setempat. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis konsentrasi dan pola dispersi polutan  $\text{NO}_2$ ,  $\text{PM}_{10}$ , dan  $\text{SO}_2$ , mengevaluasi tingkat risiko pencemaran udara terhadap kesehatan masyarakat, dan merumuskan strategi pengelolaan kualitas udara. Pendekatan metode secara kuantitatif digunakan melalui analisis hasil simulasi model dispersi AERMOD dan risiko kesehatan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa konsentrasi maksimum  $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ , dan TSP secara berturut-turut di sekitar perusahaan adalah  $11,56 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $2,52 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , dan  $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Nilai ini masih berada di bawah batas ambang yang ditetapkan dalam PP No. 22 Tahun 2021. Namun, hasil ARK dengan notasi Risk Quotient (RQ) menunjukkan nilai  $\text{RQ} > 1$  yang mengindikasikan adanya risiko kesehatan non-karsinogenik sehingga dapat berpengaruh signifikan terhadap populasi terpajan. Oleh karena itu, beberapa strategi pengelolaan kualitas udara yang dapat dilakukan di PT X antara lain melakukan pemantauan berkelanjutan terhadap emisi melalui sistem *Continuous Emission Monitoring System* (CEMS), penggunaan teknologi pengendalian emisi pada boiler dan genset, dan mengimplementasikan program tanggung jawab sosial perusahaan (CSR) yang berfokus pada edukasi dan pengelolaan lingkungan.

**Kata kunci:** AERMOD, analisis risiko kesehatan, CEMS, dispersi polutan, strategi pengelolaan kualitas udara.

### Abstract

PT X operates within the palm oil plantation and processing sector, generating emissions of nitrogen dioxide ( $\text{NO}_2$ ), particulate matter ( $\text{PM}_{10}$ ), and sulfur dioxide ( $\text{SO}_2$ ) as byproducts of combustion activities associated with its boilers and generators. These emissions have the potential to adversely affect the ambient air quality in the vicinity of the company and may pose health risks to the local population. This study aims to analyze the concentration and dispersion patterns of  $\text{NO}_2$ ,  $\text{PM}_{10}$ , and  $\text{SO}_2$  pollutants, assess the associated air pollution risks to public health, and develop strategies for effective air quality management. Utilizing a quantitative methodological approach, the research involves an analysis of results derived from simulations conducted using the AERMOD dispersion model, along with an evaluation of health risks. Findings from the simulations indicate that the maximum concentrations of  $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ , and total suspended particles (TSP) surrounding the company are recorded at  $11.56 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $2.52 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , and  $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , respectively. These values remain below the regulatory thresholds established in Government Regulation Number 22 of 2021. However, the assessment of risk, represented by the Risk Quotient (RQ), reveals an RQ value exceeding 1, signifying a non-carcinogenic health risk that may significantly impact the exposed population. To address these concerns, several air quality management strategies are proposed for PT X. These include the implementation of continuous emissions monitoring through a Continuous Emission Monitoring System (CEMS), the adoption of emission control technologies for boilers and generators, and the initiation of corporate social responsibility (CSR) programs with a focus on education and environmental stewardship.

**Keywords:** AERMOD, air pollutant dispersion, air quality management strategies, CEMS, health risk assessment.

## 1. PENDAHULUAN

Pertumbuhan populasi di Indonesia terus meningkat secara signifikan dari tahun ke tahun. Data Badan Pusat Statistik (BPS) menunjukkan bahwa laju pertumbuhan penduduk Indonesia pada tahun 2021 mencapai 1,13%. Peningkatan jumlah penduduk tersebut akan

berdampak terhadap peningkatan aktivitas antropogenik dalam berbagai sektor, seperti transportasi, industri, dan permukiman, yang secara keseluruhan berkontribusi terhadap peningkatan emisi dan polutan ke atmosfer. Aktivitas antropogenik ini, terutama dari sektor industri, menjadi salah satu kontributor utama dalam permasalahan pencemaran udara. Berdasarkan laporan Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, sektor industri menyumbang sekitar 30% dari total emisi di Indonesia dengan polutan utama meliputi partikel tersuspensi (TSP), nitrogen dioksida (NO<sub>2</sub>), dan sulfur dioksida (SO<sub>2</sub>) (Stanek et al., 2019). Emisi tersebut sebagian besar berasal dari proses pembakaran bahan bakar fosil yang digunakan dalam kegiatan operasional perusahaan. Oleh karena itu, Indonesia, sebagai negara berkembang dengan sektor industri yang terus berkembang menghadapi tantangan besar dalam menjaga kualitas udara agar tetap berada dalam ambang batas yang aman.

Saat ini, industri pengolahan kelapa sawit telah menjadi sektor penting di Indonesia karena merupakan salah satu produsen kelapa sawit terbesar di dunia dengan tingkat permintaan yang sangat tinggi terhadap CPO, baik untuk pasar domestik maupun pasar internasional. Oleh karena itu, fokus kajian dalam penelitian ini adalah perusahaan yang bergerak dalam bidang perkebunan dan industri pengolahan kelapa sawit. Perkebunan kelapa sawit PT X menghasilkan Tandan Buah Segar (TBS) yang digunakan sebagai bahan baku utama dalam proses produksi minyak kelapa sawit. Sedangkan pada sektor industri, PT X mengolah TBS menjadi produk utama berupa *Crude Palm Oil* (CPO) dan *Crude Palm Kernel Oil* (CPKO). Proses produksi CPO dan CPKO ini melibatkan aktivitas pembakaran *fiber* dan cangkang dalam boiler serta solar dalam genset, sehingga dapat menghasilkan emisi NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, dan TSP yang dapat menurunkan tingkat kualitas udara di sekitar wilayah PT X.

Kualitas udara di wilayah sekitar PT X diidentifikasi melalui data konsentrasi polutan dengan mengacu kepada baku mutu udara ambien yang tercantum dalam Peraturan Pemerintah No 22 Tahun 2021. Ketidaktersediaan stasiun pemantauan kualitas udara (SPKU) di sekitar PT X mengakibatkan data konsentrasi NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, dan TSP dianalisis melalui hasil model dispersi AERMOD (Haq dkk., 2019). AERMOD merupakan model dispersi berbasis Gaussian Plume yang digunakan untuk menganalisis persebaran pencemar udara jarak pendek (<50 km) dari sumber titik, area, garis dan volume dengan tingkat prediksi model menunjukkan performa yang baik untuk wilayah dengan topografi pegunungan dan area industri (Afzali dkk., 2017), serta *under-predicted* pada topografi kompleks (Haq dkk., 2019).

Data konsentrasi hasil simulasi model dispersi AERMOD berperan krusial dalam menganalisis tingkat risiko kesehatan masyarakat. Peta spasial yang dihasilkan tersebut dapat memberikan informasi pola persebaran polutan yang berperan penting dalam mengidentifikasi potensi dampak negatif terhadap kesehatan manusia seperti potensi terhadap terjadinya gangguan pernapasan, penyakit kardiovaskular, serta dampak jangka panjang lainnya. Oleh karena itu, menganalisis tingkat risiko kesehatan ini bukan hanya berperan penting dalam perencanaan dan mitigasi pencemaran udara, tetapi juga untuk merancang intervensi yang efektif guna melindungi kesehatan masyarakat dan memastikan kualitas udara yang lebih baik.

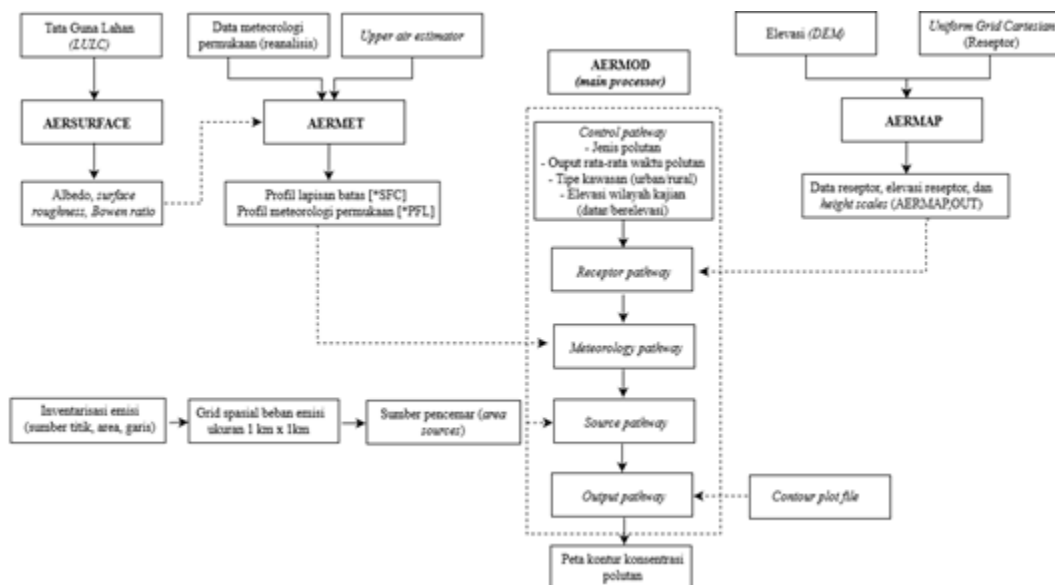
Berdasarkan hal tersebut, maka penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dispersi polutan  $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ , dan TSP yang dihasilkan dari aktivitas cerobong asap/ proses pembakaran dalam boiler dan genset melalui simulasi model AERMOD dan menganalisis tingkat risiko kesehatan masyarakat sekitar, khususnya pada populasi sensitif (anak-anak dan orang tua). Hasil penelitian ini akan memberikan rekomendasi strategi mitigasi yang dapat diimplementasikan untuk mempertahankan atau meningkatkan kualitas udara wilayah sekitar PT X, sehingga dapat menjaga keseimbangan terhadap keberlanjutan PT X serta kesehatan lingkungan dan makhluk hidup di sekitarnya.

## **2. METODE**

Penelitian ini dianalisis di sekitar kawasan PT X dengan pendekatan analisis secara kuantitatif dengan jenis data yang digunakan diperoleh dari pihak ketiga perusahaan dan data pemantauan satelit. Data diproses melalui beberapa tahapan diantaranya menyimulasikan dispersi konsentrasi  $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ , dan TSP menggunakan AERMOD, menentukan tingkat risiko kesehatan, dan mengusulkan jenis strategi pengelolaan kualitas udara di sekitar kawasan PT X.

### **2.1 Menyimulasikan dispersi $\text{NO}_2$ , $\text{SO}_2$ , dan TSP**

Kegiatan operasional genset dan boiler PT X menghasilkan emisi yang dapat memengaruhi tingkat kualitas udara ambien, khususnya emisi  $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ , dan TSP. Secara umum, terdapat tiga tahapan dalam menyimulasikan dispersi polutan menggunakan AERMOD, antara lain *pre processor* AERMET, *pre processor* AERMAP, dan *main processor* AERMOD (Gibson, 2013). Diagram alir pemrosesan secara lebih rinci dapat dilihat dalam Gambar 1.



**Gambar 1.** Tahapan Proses Pemodelan AERMOD

Pada tahap AERMET, data meteorologi (curah hujan, kelembaban, *cloud cover*, radiasi, tekanan, suhu, tutupan awan, serta arah dan kecepatan angin) per jam yang digunakan merupakan data reanalisis ECMWF generasi ke lima (ERA5). Data ini diperoleh dari *website* <https://cds.climate.copernicus.eu> dan digunakan karena ketidakterersediaan stasiun pemantauan meteorologi setempat. Pada tahap AERMAP, data elevasi wilayah diperoleh dari SRTM30 dengan pengaturan jarak reseptor secara seragam (*uniform grid cartesian*) dengan jarak grid berukuran 1,5 km. Kedua tahapan *pre processor* tersebut akan menjadi data input dalam *main processor* AERMOD yang terdiri dari *control*, *receptor*, *meteorology*, *source*, dan *ouput pathways* untuk dapat menghasilkan peta prediksi persebaran konsentrasi NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, dan TSP dengan jenis sumber emisi yang dianalisis berasal dari cerobong asap *boiler* dan genset (*point sources*) (US EPA, 2021). Peta kontur konsentrasi pada kawasan sekitar PT X kemudian akan dibandingkan dengan nilai baku mutu yang tercantum dalam PP 22/2021.

## 2.2 Analisis risiko kesehatan

### Identifikasi bahaya

Bahaya diidentifikasi melalui analisis spasial nilai konsentrasi NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, dan TSP yang telah diproses dalam model dispersi AERMOD. Titik-titik reseptor dibagi ke dalam grid berukuran 1,5 km dengan rata-rata konsentrasi harian (24 jam) persentil 95% untuk merepresentasikan pajanan *daily intake*.

### Penilaian dose-response

Data dosis respon digunakan untuk menentukan tingkat keparahan efek kesehatan merugikan (*response*) akibat jumlah pajanan NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, dan TSP dari sumber pencemaran udara (*dosis*). Analisis ini dilakukan dengan mencari nilai *Reference Dose* (RfD) dan *Reference Concentration* (RfC) untuk parameter NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, dan TSP. Namun, saat ini tidak terdapat nilai RfD dan RfC dari hasil studi epidemiologi, maka nilai tersebut diperoleh dari studi literatur. Nilai RfC NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, dan TSP yang digunakan dalam penelitian ini dengan mengacu ke dalam pedoman US EPA IRIS sebagai berikut.

$$\text{RfC TSP} = 0,020 \text{ mg/kg/hari}$$

$$\text{RfC NO}_2 = 0,053 \text{ mg/kg/hari}$$

$$\text{RfC SO}_2 = 0,04 \text{ mg/kg/hari}$$

Nilai RfC tersebut selanjutnya akan digunakan untuk menghitung nilai RfD dengan persamaan sebagai berikut.

$$\text{RfD} \left( \frac{\text{mg}}{\text{kg} \cdot \text{hari}} \right) = \frac{\text{RfC} \left( \frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3} \right) \times \text{IR} \left( \frac{\text{m}^3}{\text{hari}} \right)}{\text{BW} (\text{kg}) \times 1000 \left( \frac{\mu\text{g}}{\text{mg}} \right)}$$

dengan:

RfD = *Reference Dose* (mg/kg hari)

RfC = *Reference Concentration* (μg/m<sup>3</sup>)

IR = *Inhalation Rate* (m<sup>3</sup>/hari)

BW = *Body weight*

### Penilaian pajanan

Data pajanan diperoleh dari perhitungan nilai *intake* kontaminan polutan NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, dan TSP. Setiap parameter yang tercantum dalam Tabel 1 menggunakan data sekunder yang diperoleh dari studi literatur. Persamaan matematika yang digunakan dalam penelitian ini untuk memperoleh nilai pajanan sebagai berikut:

$$I_{nk} = \frac{C \times \text{IR} \times \text{ED} \times \text{EF}}{\text{BW} \times \text{AT}}$$

dengan:

I<sub>nk</sub> = *Intake* atau *lifetime average daily dosis* (mg/kg/hari)

C = Konsentrasi rata-rata harian NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, dan TSP persentil 95% hasil simulasi model AERMOD (μg/m<sup>3</sup>)

IR = *Inhalation rate* (m<sup>3</sup>/hari)

$ED$  = Exposure duration ( $m^3$ /hari)

$EF$  = Exposure frequency ( $m^3$ /hari)

$BW$  = Body weight (kg)

$AT$  = Averaging time (hari)

**Tabel 1.** Nilai *default* parameter perhitungan Analisis Risiko Kesehatan

No	Parameter	Dewasa	Anak-anak
1	C	Konsentrasi 24 jam persentil 95% ( $mg/m^3$ )	Konsentrasi 24 jam persentil 95% ( $mg/m^3$ )
2	$IR^{1,2}$	20 $m^3$ /hari	12 $m^3$ /hari
3	$EF^{1,2}$	350 hari	350 hari
4	$BW^{1,3}$	55 kg	23,8 kg
5	$ED^{1,2}$	30 tahun	6 tahun
6	$AT^{1,2}$ (non karsinogenik)	10.950 hari	2.190 hari

Catatan : <sup>1</sup>Dirjen PP PL Kemenkes, 2012; <sup>2</sup>US EPA, 2011; <sup>3</sup>Hartono,2018

### Karakterisasi risiko

Tingkat risiko non karsinogenik ditentukan berdasarkan nilai RQ (*Risk Quotient*) pada kelompok dewasa dan anak-anak (Simatupang, 2022). Nilai RQ <1 mengindikasikan tingkat risiko yang rendah atau tidak signifikan sedangkan nilai RQ>1 mengindikasikan adanya potensi risiko terhadap kesehatan manusia. Perhitungan nilai RQ ditentukan berdasarkan persamaan berikut:

$$RQ = \frac{I_{nk}}{RfD}$$

dengan:

RQ = *Risk Quotient*

$I_{nk}$  = Intake atau *lifetime average daily dosis* ( $mg/kg/hari$ )

RfD = *Reference Dose* x ( $mg/kg/hari$ )

### 2.3 Penentuan jenis tsrategi pengelolaan kualitas udara

Penentuan jenis strategi pengelolaan kualitas udara dilakukan melalui pendekatan yang terstruktur dan berbasis data. Analisis dilakukan dengan mempertimbangkan nilai konsentrasi polutan yang dihasilkan model dispersi AERMOD serta tingkat risiko kesehatan masyarakat yang teridentifikasi. Berdasarkan data tersebut, strategi pengelolaan kualitas udara yang

disarankan akan dirumuskan dengan fokus pada mitigasi dampak kesehatan dan pemenuhan standar kualitas udara.

### **3. HASIL DAN PEMBAHASAN**

#### **3.1 Beban emisi SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, dan TSP**

Kegiatan utama PT X adalah perkebunan dan industri pengolahan kelapa sawit. Kegiatan perkebunan PT X menghasilkan Tandan Buah Segar (TBS) sebagai bahan baku dalam industri kelapa sawit untuk memproduksi *Crude Palm Oil* (CPO) dan *Crude Palm Kernal Oil* (CPKO). Dalam proses produksinya, perusahaan melibatkan aktivitas pembakaran dalam dua boiler dan dua genset. Jumlah bahan bakar fiber dan cangkang yang digunakan dalam boiler berkapasitas  $\pm 90$  ton TBS/jam dengan waktu operasi rata-rata mesin selama 20 jam/hari adalah sekitar  $\pm 50.000$  ton/tahun serta bahan bakar solar yang digunakan dalam genset dengan kapasitas masing-masing 635 kVA untuk cadangan energi listrik adalah sekitar  $\pm 45.000$  liter/tahun.

Berdasarkan Djokosetyarjo (2003), limbah fiber dan cangkang sawit dapat dimanfaatkan secara optimal untuk meningkatkan efisiensi boiler. Fiber adalah limbah sawit yang dihasilkan dari hasil pengolahan pemerasan buah sawit pada saat proses kempa (*press*) yang berbentuk pendek seperti benang dan bewarna kuning kecoklatan sedangkan *shell*/cangkang merupakan limbah yang dihasilkan dari pemrosesan kernel inti sawit dengan bentuk seperti tempurung kelapa namun berbentuk kecil. Berbeda hal dengan solar, solar merupakan produk hasil penyulingan minyak bumi dengan karakteristik berupa cairan yang lebih kental dan berat dibandingkan bensin dan tergolong ke dalam penghasil emisi cukup tinggi. Kegiatan pembakaran *fiber*, cangkang, dan solar ini menghasilkan emisi yang dikeluarkan melalui cerobong dalam bentuk asap. Oleh karena itu, simulasi dispersi NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, dan TSP dalam AERMOD menggunakan sumber emisi titik (*point source*).

**Tabel 2.** Nilai beban emisi setiap sumber emisi

	<i>Boiler 1</i>	<i>Boiler 2</i>	<i>Genset 1</i>	<i>Genset 2</i>
Beban emisi SO <sub>2</sub> (g/s)	1.1478	3.2886	0.0519	0.0349
Beban emisi NO <sub>2</sub> (g/s)	6.20	12.50	0.66	0.50
Beban emisi TSP (g/s)	1.186	2.357	0.039	0.038

Hasil perhitungan nilai beban emisi untuk polutan NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, dan TSP dari sumber emisi *boiler* dan genset ditampilkan dalam Tabel 2. Perbedaan nilai beban emisi ini terutama dipengaruhi oleh karakteristik fisik cerobong, seperti diameter cerobong, kecepatan aliran gas



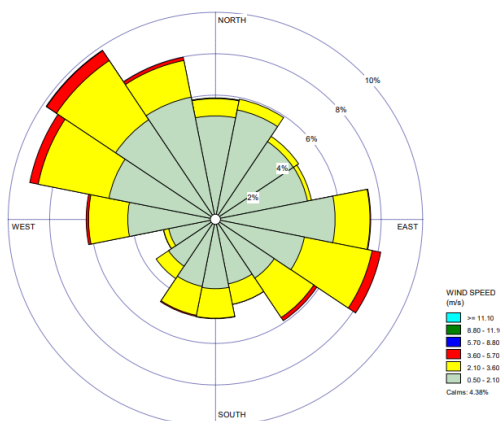
buang, dan densitas emisi. Hasil menunjukkan beban emisi yang dihasilkan oleh genset lebih rendah dibandingkan dengan *boiler*. Hal ini disebabkan oleh beberapa faktor antara lain operasional genset bersifat insidental atau tidak terus menerus, diameter cerobong yang lebih kecil, dan kecepatan alir gas buang yang rendah. Oleh karena itu, meskipun nilai densitas emisi dari genset dan *boiler* tidak jauh berbeda, perbedaan karakteristik cerobong dan pola operasional ini menyebabkan beban emisi dari genset secara keseluruhan lebih rendah dibandingkan dengan *boiler* yang beroperasi secara kontinu dengan kapasitas lebih besar.

Prabasari dan Pusparani (2022) melakukan perhitungan emisi dari aktivitas cerobong boiler pembangkit tenaga uap berbahan bakar 40% cangkang dan 60% serat kelapa sawit yang dihitung menggunakan neraca massa. Hasil perhitungan menunjukkan emisi  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$ , dan partikulat setelah dikendalikan oleh *electrostatic precipitator* menunjukkan penurunan sebesar 95%. Nilai tersebut jika dibandingkan dengan baku mutu pada Permenlh No 07 Tahun 2007 menunjukkan nilai di bawah baku mutu. Oleh karena itu, penggunaan bahan bakar biomassa dan alat pengendali emisi ini secara efektif dapat menurunkan tingkat emisi  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$ , dan partikulat. Rendahnya emisi yang dilepaskan ke atmosfer berkontribusi pada penurunan konsentrasi pencemar udara di lingkungan sekitar, sehingga dapat memperbaiki kualitas udara ambien, mengurangi dampak negatif terhadap kesehatan masyarakat, serta meminimalkan potensi pencemaran lintas batas wilayah. Hal ini juga sejalan dengan upaya pengendalian pencemaran udara sebagaimana diatur dalam kebijakan lingkungan nasional.

### **3.2 Simulasi dispersi $\text{SO}_2$ , $\text{NO}_2$ , dan TSP**

Proses persebaran polutan sangat dipengaruhi oleh faktor meteorologi, khususnya arah dan kecepatan angin (Hewson, 2012). Gambar 2 menunjukkan nilai rata-rata arah dan kecepatan angin di sekitar PT X selama satu tahun. Arah angin dominan bergerak dari barat laut menuju tenggara dengan kecepatan berkisar antara 0,5 hingga 2,1 m/s dengan persentase sebesar 69%. Berdasarkan penelitian Hewson (2012), kecepatan angin yang rendah cenderung menyebabkan akumulasi polutan di dekat sumber emisi  $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ , dan TSP tidak cukup kuat untuk menyebarkan polutan ke area yang lebih jauh. Sebaliknya, pada kondisi angin yang lebih kencang, polutan akan tersebar lebih cepat dan lebih luas, sehingga konsentrasinya menurun seiring dengan jarak dari sumber emisi.



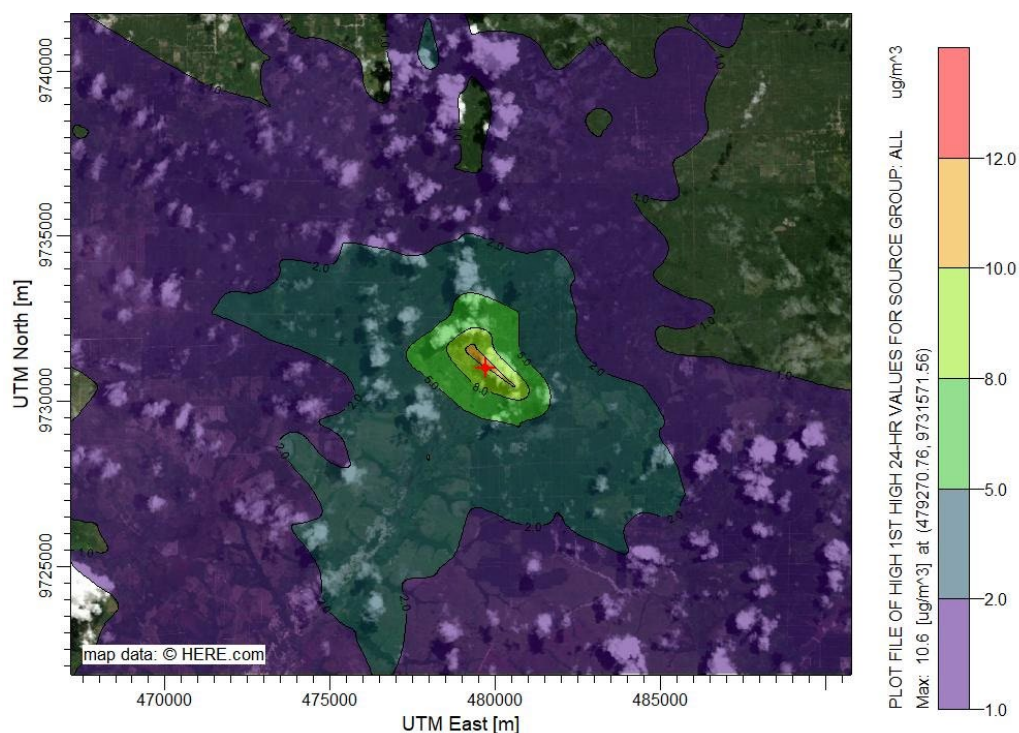


**Gambar 2.** Rata-rata arah dan kecepatan angin satu tahun

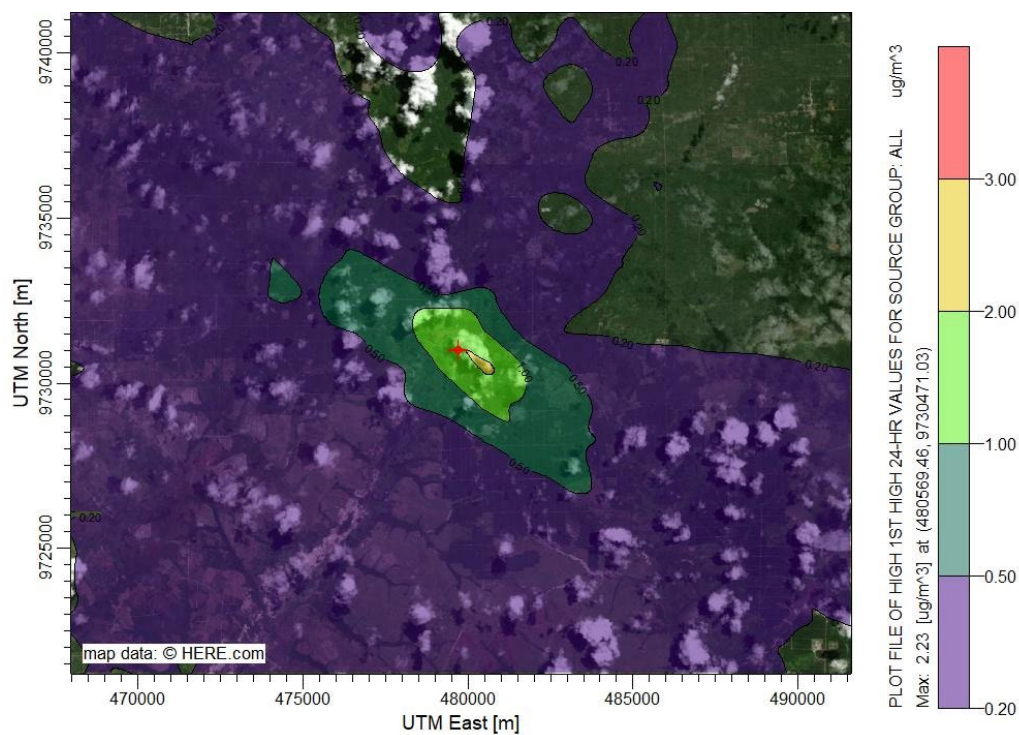
Gambar 3, 4, dan 5 merupakan peta persebaran rata-rata harian (24 jam)  $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ , dan TSP dalam satu tahun dengan nilai *first high* dan persentil 95%. Berdasarkan ketiga Gambar tersebut, konsentrasi tertinggi berada di sekitar sumber emisi (Arani, 2021). Hal ini sesuai dengan prinsip Gauss yang mendasari model dispersi AERMOD, yaitu konsentrasi polutan tertinggi akan berada di dekat pusat atau sumber emisi dan menurun mengikuti distribusi normal seiring dengan bertambahnya jarak dari sumber. AERMOD menggunakan pendekatan ini dengan mempertimbangkan faktor-faktor meteorologi seperti arah dan kecepatan angin, stabilitas atmosfer, serta pengaruh kondisi topografi untuk memprediksi pola sebaran polutan. Kondisi topografi kawasan diperhitungkan karena tipe geografis seperti bukit, lembah, atau bangunan dapat mengganggu aliran udara dan memengaruhi pola dispersi polutan, sehingga dengan adanya perhitungan parameter ini, peta spasial yang dihasilkan akan lebih merepresentasikan kondisi aktual di lapangan dengan lebih akurat.

Hasil simulasi  $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ , dan TSP menunjukkan nilai maksimum sebesar  $11,56 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $2,52 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , dan  $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$  dengan nilai baku mutu yang telah ditetapkan dalam PP No 22 Tahun 2021 dalam waktu pengukuran 24 jam adalah  $65 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , dan  $230 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Gambar 3, 4, 5). Konsentrasi maksimum yang dihasilkan tersebut berada di dekat dengan sumber emisi akibat pengaruh angin lemah yang turut berkontribusi membawa polutan bergerak tidak jauh dari sumbernya. Nilai konsentrasi polutan yang berada di bawah nilai baku mutu ini dipengaruhi oleh beberapa faktor antara lain perusahaan telah menggunakan alat pengendali emisi berupa *dust collector* dan bahan bakar alternatif berupa cangkang dan *fiber* pada *boiler*. *Dust collector* tersebut memiliki sistem *multicyclone* yang dirancang untuk memisahkan partikel debu dan kotoran dari aliran gas melalui mekanisme gaya sentrifugal. Berdasarkan

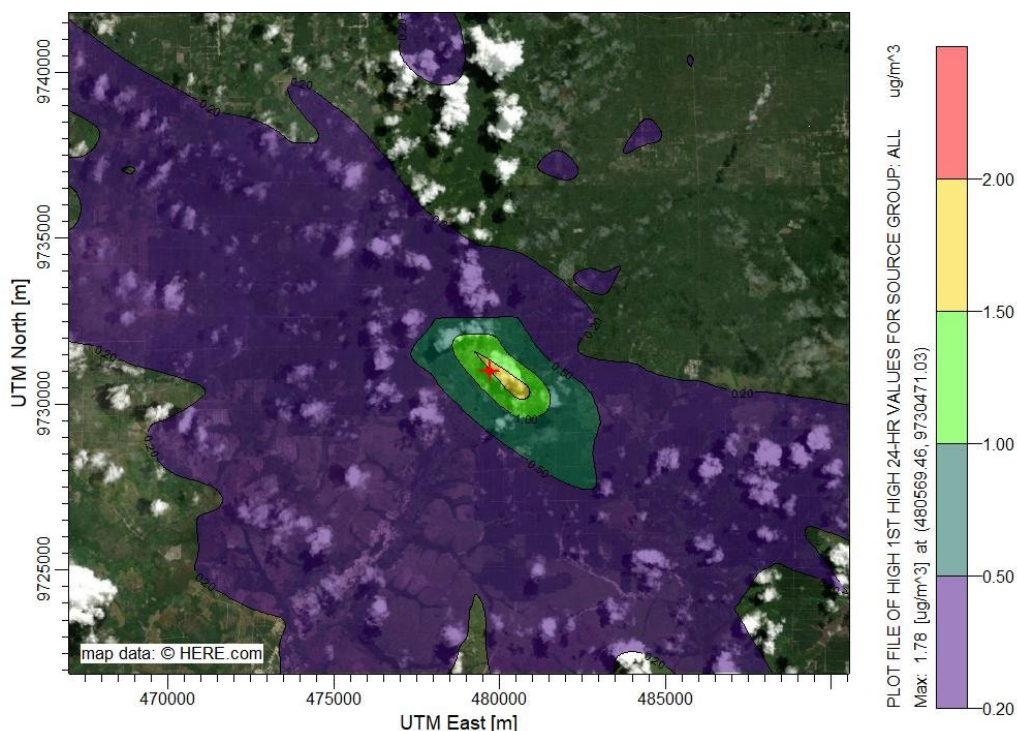
Mihelcic dan Zimmerman (2014), efisiensi alat ini dapat mencapai sekitar 70-90% tergantung pada ukuran partikel dan kondisi operasi.



**Gambar 3.** Peta persebaran konsentrasi NO<sub>2</sub> rata-rata 24 jam



**Gambar 4.** Peta persebaran konsentrasi SO<sub>2</sub> rata-rata 24 jam



**Gambar 5.** Peta persebaran konsentrasi TSP rata-rata 24 jam

Meskipun konsentrasi polutan masih berada di bawah batas ambang yang ditetapkan, paparan jangka panjang terhadap polutan  $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ , dan TSP akan berpotensi menimbulkan risiko kesehatan yang signifikan bagi masyarakat sekitar kawasan PT X. Hal ini terutama bagi populasi sensitif seperti anak-anak, lansia, serta individu yang memiliki riwayat kesehatan tertentu, seperti penderita penyakit pernapasan. Studi menunjukkan bahwa paparan polutan secara berulang dapat menyebabkan akumulasi dalam tubuh yang berkontribusi pada munculnya berbagai masalah kesehatan. Oleh karena itu, diperlukan upaya pengelolaan kualitas udara dan mitigasi risiko.

### 3.3 Tingkat risiko pencemaran udara

Tingkat risiko pencemaran udara dianalisis menggunakan pendekatan data hasil konsentrasi simulasi model AERMOD. Risiko yang dianalisis pada penelitian ini merupakan non karsinogenik dengan spesifik data yang digunakan berupa nilai paparan dan *dose-response*. Data pada Tabel 3 menunjukkan nilai estimasi tingkat risiko pada kelompok dewasa dan anak-anak di sekitar Kawasan PT X.

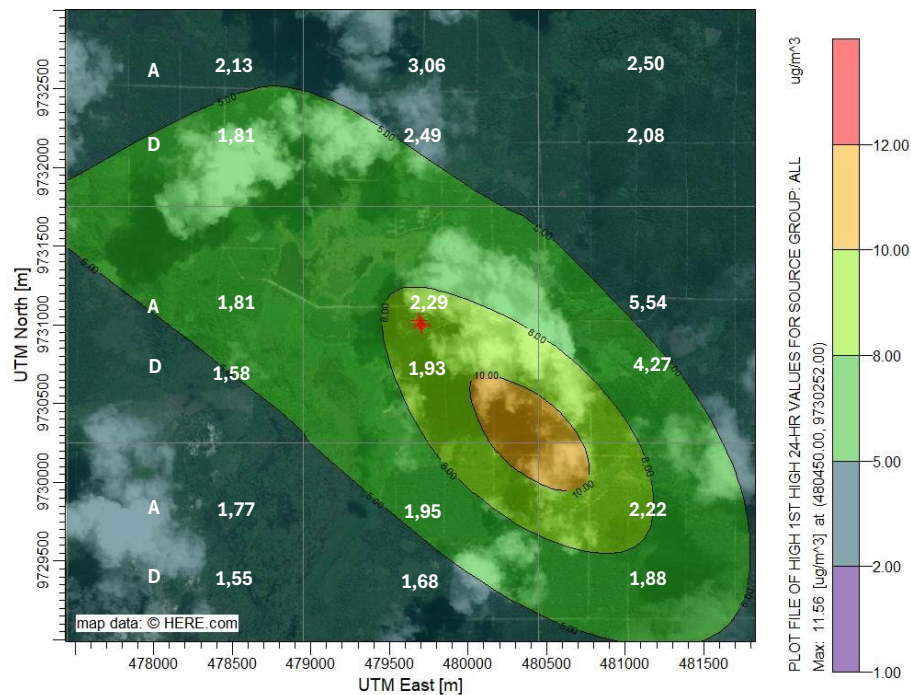
**Tabel 3.** Estimasi risiko non karsinogenik pada polutan NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, dan TSP melalui jalur inhalasi pada kelompok dewasa dan anak-anak dalam notasi RQ

RQ ( <i>Risk Quotient</i> ) Dewasa			RQ ( <i>Risk Quotient</i> ) Anak-Anak		
TSP	NO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	TSP	NO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>
1.55	3.36	4.13	1.77	4.28	5.34
1.58	3.21	3.93	1.81	4.06	5.06
1.81	4.25	5.31	2.13	5.51	6.97
1.68	3.74	4.63	1.95	4.80	6.04
1.93	4.00	4.98	2.29	5.17	6.52
2.49	5.18	6.54	3.06	6.80	8.68
1.88	3.13	3.82	2.22	3.95	4.92
4.27	8.10	10.41	5.54	10.84	14.04
2.08	3.82	4.74	2.50	4.91	6.19

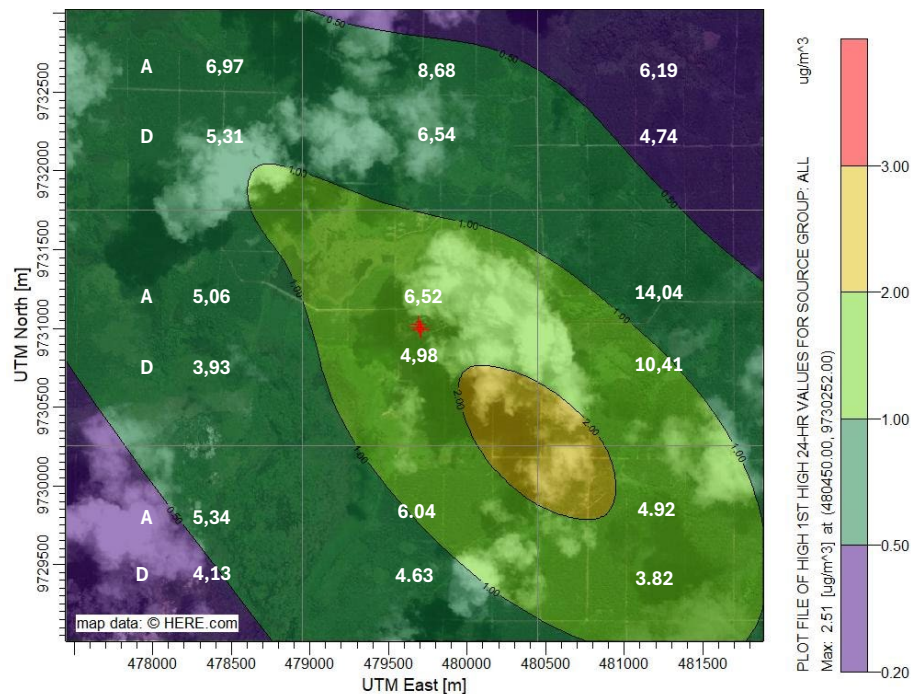
Dengan menggunakan pendekatan perhitungan *Risk Quotient* (RQ) untuk NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, dan TSP, diperoleh nilai RQ>1. Nilai RQ>1 mengindikasikan adanya potensi risiko negatif terhadap kesehatan manusia seperti gangguan pada sistem pernapasan, iritasi pada saluran pernapasan, serta peningkatan penyakit seperti asma dan bronkitis kronis (Siswati dan Dinayah, 2017). Berdasarkan hasil perhitungan, risiko kesehatan untuk anak-anak lebih tinggi dibandingkan dengan orang dewasa. Faktor utama yang memengaruhi hal ini adalah rasio laju inhalasi terhadap berat badan yang lebih besar, sehingga anak-anak menghirup lebih banyak polutan per kilogram berat badan. Selain itu, saluran pernapasan dan sistem imun pada anak-anak belum sepenuhnya berkembang yang menyebabkan lebih rentan terhadap infeksi atau inflamasi akibat paparan polutan seperti NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, dan TSP.

Nilai *Risk Quotient* (RQ) yang terdapat dalam Tabel 3 kemudian divisualisasikan secara spasial dalam Gambar 6, 7, 8 untuk mengetahui lokasi-lokasi spesifik yang memerlukan upaya pengelolaan atau pengendalian karena memiliki tingkat risiko yang lebih tinggi dibandingkan dengan wilayah lainnya di sekitar PT X. Pemetaan ini dilakukan dengan membagi area studi menjadi *grid* berukuran 1,5 km dengan setiap *grid* merepresentasikan satu titik koordinat tertentu yang menjadi pusat perhitungan risiko. Meskipun hasil pengolahan data konsentrasi polutan NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, dan TSP menunjukkan nilai di bawah baku mutu, akan tetapi nilai RQ menunjukkan nilai lebih dari satu sehingga upaya pengelolaan kualitas udara tetap perlu dilakukan untuk meminimalkan dampak jangka panjang (Cooper, 2010).

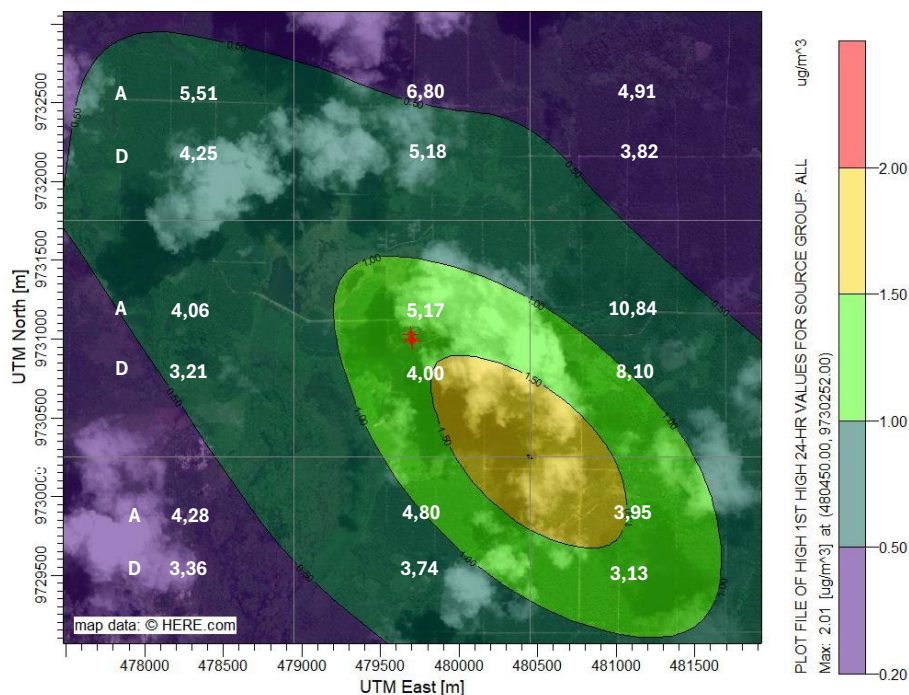




**Gambar 6.** Visualisasi grid tingkat risiko polutan NO<sub>2</sub> terhadap orang dewasa (D) dan anak-anak (A)



**Gambar 7.** Visualisasi grid tingkat risiko polutan SO<sub>2</sub> terhadap orang dewasa (D) dan anak-anak (A)



**Gambar 8.** Visualisasi grid tingkat risiko polutan TSP terhadap orang dewasa (D) dan anak-anak (A)

Strategi utama yang dapat dilakukan meliputi pemantauan berkelanjutan terhadap emisi melalui sistem *Continuous Emission Monitoring System* (CEMS), penerapan teknologi pengendalian emisi yang mempunyai tingkat efisiensi lebih tinggi, seperti pemasangan *electrostatic precipitator* (ESP) pada *boiler* dan *catalytic converter* pada genset, serta optimasi operasional juga perlu dipertimbangkan untuk menjaga agar emisi tetap terkendali. Upaya lainnya yang dapat dilakukan oleh PT X adalah mengimplementasikan program tanggung jawab sosial perusahaan (CSR) yang fokus pada edukasi dan pengelolaan lingkungan. Hal ini dapat memberikan dampak positif terhadap peningkatan kesadaran masyarakat terkait pentingnya menjaga kualitas udara. Langkah-langkah ini apabila diimplementasikan secara berkelanjutan dapat meningkatkan kualitas udara dan meminimalkan tingkat risiko kesehatan masyarakat di sekitar wilayah PT X.

#### 4. KESIMPULAN

Kegiatan operasional PT X yang bergerak di bidang perkebunan dan industri pengolahan kelapa sawit melibatkan aktivitas pembakaran dalam dua boiler dan dua genset. Penggunaan bahan bakar biomassa berupa fiber dan cangkang menghasilkan emisi  $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ , dan TSP. Hasil pengukuran menunjukkan emisi yang dihasilkan dari genset lebih kecil

dibandingkan genset, hal ini dipengaruhi oleh operasional genset yang bersifat insidental, diameter cerobong yang lebih kecil, dan kecepatan alir gas buang yang rendah. Jika emisi yang dihasilkan boiler dibandingkan dengan baku mutu yang tercantum dalam PermenLH No 07 Tahun 2007 maka nilainya akan berada di bawah baku mutu.

Aktivitas cerobong boiler dan genset tersebut menjadi sumber emisi yang dapat memengaruhi kualitas udara di sekitar kawasan PT X. Tingkat konsentrasi  $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ , dan TSP di sekitar kawasan perusahaan disimulasikan melalui model dispersi AERMOD. Hasil simulasi model dispersi AERMOD menunjukkan konsentrasi maksimum  $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ , dan TSP secara berturut-turut  $11,56 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $2,52 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , dan  $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Nilai tersebut berada di bawah nilai baku mutu yang telah ditetapkan dalam PP No 22 Tahun 2021. Meskipun demikian, hasil analisis risiko kesehatan yang diidentifikasi melalui nilai RQ menunjukkan nilai  $\text{RQ} > 1$  atau mengindikasikan adanya potensi risiko negatif terhadap kesehatan manusia seperti gangguan pada sistem pernapasan, iritasi pada saluran pernapasan, serta peningkatan penyakit seperti asma dan bronkitis kronis. Populasi sensitif (anak-anak) berpotensi terdampak lebih besar dibandingkan populasi orang dewasa. Oleh karena itu, upaya pengelolaan kualitas udara diperlukan untuk meningkatkan kualitas udara dan meminimalkan potensi risiko kesehatan yang akan ditimbulkan dari paparan polutan  $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ , dan TSP.

## DAFTAR PUSTAKA

- Afzali, A., Rashid, M., Afzali, M., Younesi, V. (2017). Prediction of air pollutants concentrations from multiple sources using AERMOD coupled with WRF prognostic model, *Journal of Cleaner Production*, 166, 1216-1225.
- Arani, M. H., Jaafazadeh, N., Moslemzadeh, M., Ghalhari, M. R., Arani, S. B., Mohammadzadeh, M. (2021). Dispersion of  $\text{NO}_2$  and  $\text{SO}_2$  pollutants in the rolling industry with AERMOD model: a case study to assess human health risk. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*.
- Cooper, C. D., & Alley, F. (2010). *Air Pollution Control*. Waveland Press, Inc.
- Dirjen PP PL Kemenkes. (2012). Pedoman Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan (ARKL). Direktorat Jenderal PP dan PL Kementerian Kesehatan.
- Djokosetyarjo, M. J. (2003). Ketel Uap. Edisi Kelima. Penerbit PT Edisi Pertama. Penerbit CV Rajawali. Jakarta
- Gibson, M. D., Soumita, Kundu., Mysore, Satish. (2013). Dispersion model evaluation of  $\text{PM}_{2.5}$ ,  $\text{NO}_x$  and  $\text{SO}_2$  from point and major line sources in Nova Scotia, Canada using AERMOD Gaussian plume air dispersion model. *Atmospheric Pollution Research*, 2 (157).
- Hartono, M. (2018). Indonesian anthropometry update for special populations incorporating drills and contini revisted. *International Journal of Industrial Ergonomics*. 64, 89-101.



- Haq, A. H., Nadeem, Q., Farooq, A., Irfan, N., Ahmad, M., Ali, M. R. (2019). Assessment of AERMOD modeling system for application in complex terrain in Pakistan, *Atmospheric Pollution Research*, 10, 1492-1497.
- Hewson, E. W. (2012). Meteorological factors affecting causes and controls of air pollution. *Journal of the Air Pollution Control Association*, 5(4), 235-241.
- Mihelcic, J. R., & Zimmerman, J. B. (2014). *Environmental engineering: Fundamentals, sustainability, design* (2nd ed.). Hoboken, NJ: Wiley.
- Peraturan Pemerintah. (2021). Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup.
- Prabasari, I. G., Pusparani, N. (2022). Model persebaran emisi pada pembangkit listrik tenaga uap berbahan bakar serat dan cangkang kelapa sawit menggunakan perangkat pemodelan AERMOD. *Jurnal Daur Lingkungan*. 5(2), 75-79.
- Simatupang, M. M., Veronika, E., Irfandi, A., Garmini, R. (2022). Environmental health risk assessment of air pollutants in online motorcycle taxi drivers in the special region of Jakarta. *Jurnal Kesehatan Lingkungan*. 14(2).
- Siswati & Dinayah, K. C. (2017). Analisis risiko pajanan debu (Total Suspended Particulate) di unit packer PT X. *Jurnal Kesehatan Lingkungan*. 9 (1), 100-110.
- Stanek, L. W., dan James, S. Brown. (2019). Air pollution: sources, regulation, and health effects. *Pollution, Encyclopedia of Toxicology*, 995 - 1002.
- US EPA (2011). Exposure factors handbook. *National Center for Environmental Assessment*, Washington, DC. EPA.
- US EPA. (2021). *AERMOD Model Formulation and Evaluation*, Air Quality Assessment Division, North Carolina.
- US EPA. (2021). *User's Guide for the AMS/EPA Regulatory Model (AERMOD)*, Air Quality Modeling Group, North Carolina.