

**TESIS**

**MODEL PREDIKSI PENCEMAR SULFUR DIOKSIDA (SO<sub>2</sub>)  
DAN NITROGEN DIOKSIDA (NO<sub>2</sub>) DI KAWASAN  
INDUSTRI DAN PEMUKIMAN KOTA MAKASSAR**

*PREDICTION MODEL FOR SULFUR DIOXIDE (SO<sub>2</sub>) AND  
NITROGEN DIOXIDE (NO<sub>2</sub>) IN INDUSTRIAL AND RESIDENT  
AREA OF MAKASSAR*

**RAHMI MULYANI AGUS**



**PROGRAM PASCASARJANA  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
MAKASSAR  
2019**

**MODEL PREDIKSI PENCEMAR SULFUR DIOKSIDA (SO<sub>2</sub>)  
DAN NITROGEN DIOKSIDA (NO<sub>2</sub>) DI KAWASAN  
INDUSTRI DAN PEMUKIMAN KOTA MAKASSAR**

Tesis

Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Mencapai Gelar Magister

Program Studi  
Kesehatan Masyarakat

Disusun dan diajukan oleh

**RAHMI MULYANI AGUS**

Kepada

**PROGRAM PASCASARJANA  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
MAKASSAR  
2019**

**TESIS**

**MODEL PREDIKSI PENCEMAR SULFUR DIOKSIDA (SO<sub>2</sub>) DAN  
NITROGEN DIOKSIDA (NO<sub>2</sub>) DI KAWASAN INDUSTRI DAN  
PEMUKIMAN KOTA MAKASSAR**

Disusun dan diajukan oleh:

**RAHMI MULYANI AGUS**

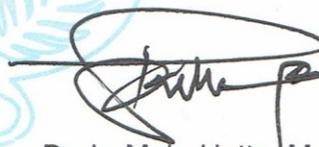
Nomor Pokok P1801216003

Telah dipertahankan di depan Panitia Ujian Tesis  
Pada tanggal 07 Agustus 2019  
dan dinyatakan telah memenuhi syarat

Menyetujui  
KOMISI PENASIHAT,



Anwar Mallongi, SKM., M.Sc., Ph.D  
Ketua



Dr. Ir. Muh. Hatta, M.Si.  
Anggota

Ketua Program Studi  
Ilmu Kesehatan Masyarakat



Dr. Masni, Apt., MSPH.

Dekan  
Fakultas Kesehatan Masyarakat



Dr. Aminuddin Syam, SKM., M.Kes., M.Med.Ed

## PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Rahmi Mulyani Agus

NIM : P1801216003

Program Studi : Kesehatan Masyarakat

Menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa tesis yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri, bukan merupakan pengambilan tulisan atau pemikiran orang lain. Apabila di kemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan tesis ini hasil karya orang lain, saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Makassar, September 2018  
Yang menyatakan

**Rahmi Mulyani Agus**

## PRAKATA



Segala puji senantiasa penulis panjatkan kehadiran Allah SWT atas segala limpahan rahmat dan karunia-Nya, juga salam dan salawat t penulis kirimkan kepada junjungan kita Rasulullah, Nabi Muhammad SAW. Alhamdulillah, merupakan nikmat yang besar sehingga penulis dapat menyelesaikan penyusunan tesis yang berjudul “**Model Prediksi Pencemar Sulfur Dioksida (SO<sub>2</sub>) dan Nitrogen Dioksida (NO<sub>2</sub>) di Kawasan Industri dan Pemukiman Kota Makassar**”. Tesis ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister Kesehatan Masyarakat di Universitas Hasanuddin..

Penulis menyadari penulisan tesis ini tidak dapat diselesaikan tanpa adanya bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, dengan kerendahan hati dan rasa hormat, penulis menyampaikan terima kasih atas segala bantuan, bimbingan dan motivasi kepada:

1. Bapak **Anwar, SKM., M.Sc., Ph.D** sebagai Pembimbing I dan Bapak **Dr. Ir. Muh. Hatta, M.Si.** selaku Pembimbing II yang dengan tulus ikhlas meluangkan waktu, tenaga, dan pemikiran untuk membimbing dan memberikan arahan kepada penulis dalam penyelesaian tesis ini.
2. Bapak **dr. Hasanuddin Ishak, M.Sc., Ph.D**; Bapak **Prof. Dr. Anwar Daud, SKM., M.Kes**; dan Bapak **Dr. Agus Bintara Birawida, S.Kel., M. Kes.** selaku dosen penguji yang telah banyak memberikan saran serta arahan guna penyempurnaan penulisan tesis ini.

3. Bapak **Dr. Aminuddin Syam, SKM., M.Kes., M.Med.Ed** selaku Dekan, dan juga para wakil dekan beserta seluruh staf akademik Fakultas Kesehatan Masyarakat Universitas Hasanuddin.
4. Ibu **Dr. Masni, Apt., MSPH.** selaku ketua Program Studi Ilmu Kesehatan Masyarakat Sekolah Pascasarjana Universitas Hasanuddin.
5. Ibu **Dr. Erniwati Ibrahim, SKM., M.Kes.** selaku ketua Bagian Kesehatan Lingkungan Fakultas Kesehatan Masyarakat Universitas Hasanuddin.
6. Dosen-dosen Fakultas Kesehatan Masyarakat Universitas Hasanuddin terutama dosen Bagian Kesehatan Lingkungan, beserta staf Bagian Kesehatan Lingkungan atas dukungan serta bantuannya kepada penulis.
7. Pimpinan beserta seluruh staf Balai Besar Pengembangan Keselamatan dan Kesehatan Kerja Makassar, tempat penulis bekerja, yang telah memberikan kesempatan kepada penulis untuk menyelesaikan penulisan tesis dan membantu dalam penelitian.
8. Pimpinan beserta seluruh staf Dinas Lingkungan Hidup Provinsi Sulawesi Selatan yang turut membantu dalam penelitian ini.
9. Rekan-rekan mahasiswa Pascasarjana Bagian Kesehatan Lingkungan angkatan 2016 atas segala bantuan dan dukungannya selama ini.

10. Seluruh pihak yang tidak sempat penulis sebutkan namanya yang telah banyak memberikan bantuannya dalam rangka penyelesaian tesis ini.

Penghargaan yang setinggi-tingginya penulis persembahkan kepada kedua orang tua tercinta, Ayahanda **Drs. Agustan A., M.A** dan Ibunda tercinta **Sitti Aisyah** yang dengan ikhlas, sabar dan penuh kasih sayang serta selalu mendoakan juga memberikan semangat kepada penulis hingga sampai pada tahap ini.

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa penulisan tesis ini masih jauh dari kesempurnaan. Oleh karena itu, penulis menerima saran dan kritik bersifat membangun dari segala pihak, demi penyempurnaan bagi penelitian di masa yang akan datang. Semoga tesis ini bermanfaat bagi pembangunan kesehatan dan ilmu pengetahuan. Semoga Allah SWT selalu melimpahkan berkah dan rahmat-Nya bagi kita semua. Amin.

Makassar, Juli 2019

**Penulis**

**ABSTRAK**

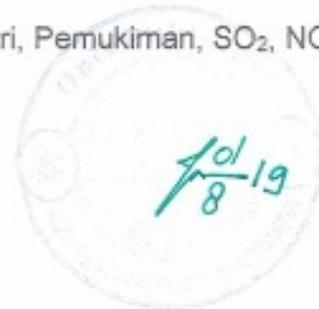
**RAHMI MULYANI AGUS.** *Model Prediksi Pencemar Sulfur Dioksida (SO<sub>2</sub>) dan Nitrogen Dioksida (NO<sub>2</sub>) di Kawasan Industri dan Pemukiman Kota Makassar (dibimbing oleh Anwar Mallongi dan Muh. Hatta)*

Salah satu dampak kemajuan industri yang kian mengkhawatirkan adalah permasalahan kualitas lingkungan, utamanya kualitas udara ambien. Aktivitas industri menghasilkan emisi berupa SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub>. Penelitian ini bertujuan untuk mengestimasi konsentrasi SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub> di pemukiman sekitar Kawasan Industri Kota Makassar selama 10 tahun (2019-2028) untuk mengetahui sejauh mana skenario model dalam menurunkan konsentrasi SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub>.

Jenis penelitian ini adalah observasional analitik melalui pendekatan model dinamis. Sampel penelitian ini adalah kualitas udara ambien pada 4 (empat) titik lokasi yang berada di sekitar kawasan industri Makassar dengan teknik pengambilan sample secara *purposive sampling*. Data dianalisis menggunakan program *Stella 9.0.2*.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa 10 tahun mendatang (2028), konsentrasi SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub> terus mengalami peningkatan. Konsentrasi SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub> tertinggi berada di titik lokasi Kapasa Baru dengan nilai masing-masing 51,99 µg/Nm<sup>3</sup> dan 170,58 µg/Nm<sup>3</sup>. Berdasarkan simulasi skenario model selama 10 tahun (2019-2028), diperoleh hasil bahwa skenario gabungan penambahan tinggi cerobong dan penyediaan RTH privat mampu menurunkan konsentrasi SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub> paling besar hingga 9 kali lipat. Konsentrasi SO<sub>2</sub> tertinggi pada bulan Desember 2019 berada di titik lokasi Kapasa Raya dengan nilai 6,65 µg/Nm<sup>3</sup>, sementara NO<sub>2</sub> tertinggi berada di titik lokasi Kapasa Baru dengan nilai 22,65 µg/Nm<sup>3</sup>. Berdasarkan hasil tersebut, maka skenario yang paling baik untuk diterapkan di kawasan industri dan pemukiman di Kota Makassar adalah skenario gabungan.

**Kata Kunci :** Model Prediksi, Kawasan Industri, Pemukiman, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>



## ABSTRACT

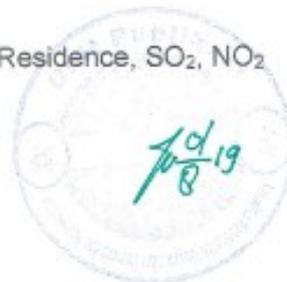
**RAHMI MULYANI AGUS.** *Prediction Model for Sulfure Dioxide (SO<sub>2</sub>) and Nitrogen Dioxide (NO<sub>2</sub>) in Industrial and Residence Area of Makassar* (Supervised by **Anwar Mallongi** and **Muh.Hatta**)

One of the more worrisome industrial advances is the problem of environmental quality, especially ambient air quality. Industrial activity produce emissions in the form of SO<sub>2</sub> and NO<sub>2</sub>. This study aims to estimate the concentration of SO<sub>2</sub> and NO<sub>2</sub> in settlements around the Industrial Area of Makassar for 10 years (2019-2028) to learn more about the model scenario in decreasing the concentration of SO<sub>2</sub> and NO<sub>2</sub>.

This type of this study is observational analytic through dynamic model research. The sample of this study was ambient air quality at 4 (four) locations located in settlements around industrial area of Makassar by using purposive sampling technique. Data were analyzed using Stella 9.0.2 program.

The results showed that in next 10 years (2028), the concentration of SO<sub>2</sub> and NO<sub>2</sub> increase continuously. The highest SO<sub>2</sub> and NO<sub>2</sub> concentrations were at the location of the Kapasa Baru with values of 51,99 µg/Nm<sup>3</sup> and 170,58 µg/Nm<sup>3</sup> respectively. Based on scenario simulation for 10 years (2019-2028), the results showed that combined scenario of stack height addition and private green open space (RTH) provision provides maximum reductions of SO<sub>2</sub> and NO<sub>2</sub> concentrations up to 9 times. The highest SO<sub>2</sub> concentrations in December 2019 was at Kapasa Raya with a value of 6,65 µg/Nm<sup>3</sup>, while the highest NO<sub>2</sub> was at Kapasa Baru with a value of 22,65 µg/Nm<sup>3</sup>. Based on these results, the best scenario to be applied in industrial estates and settlements in Makassar was the combined scenario.

**Keywords :** Prediction Model, Industrial Area, Residence, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>



## DAFTAR ISI

	<b>Halaman</b>
<b>HALAMAN JUDUL</b> .....	i
<b>LEMBAR PENGAJUAN TESIS</b> .....	ii
<b>LEMBAR PENGESAHAN TESIS</b> .....	iii
<b>LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN TESIS</b> .....	iv
<b>PRAKATA</b> .....	v
<b>ABSTRAK</b> .....	viii
<b>ABSTRACT</b> .....	ix
<b>DAFTAR ISI</b> .....	x
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	xii
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	xiii
<b>DAFTAR LAMPIRAN</b> .....	xvi
<b>DAFTAR SINGKATAN</b> .....	xvii
<b>BAB I PENDAHULUAN</b>	
A. Latar Belakang .....	1
B. Rumusan Masalah .....	6
C. Tujuan Penelitian .....	6
D. Manfaat Penelitian .....	7
E. Ruang Lingkup/Batasan Penelitian .....	8
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b>	
A. Tinjauan Umum Pencemaran Udara .....	10
B. Tinjauan Umum Emisi Gas Buang Industri .....	12
C. Tinjauan Umum SO <sub>2</sub> di Udara.....	14
D. Tinjauan Umum NO <sub>2</sub> di Udara .....	18
E. Tinjauan Umum Meteorologi.....	20
F. Tinjauan Umum Permodelan .....	23
G. Tinjauan Umum Aplikasi Stella .....	28
H. Tabel Rekap.....	30
I. Kerangka Teori .....	37

J. Kerangka Konsep .....	38
K. Variabel dan Defenisi Operasional .....	39
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN</b>	
A. Jenis dan Desain Penelitian .....	41
B. Waktu dan Lokasi Penelitian .....	41
C. Populasi Dan Sampel .....	42
D. Teknik Pengambilan Sampel Udara .....	44
E. Metode Pengumpulan Data .....	53
F. Instrumen Penelitian .....	57
G. Diagram Alir Model .....	58
H. Alur Penelitian .....	60
I. Kontrol Kualitas.....	61
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN</b>	
A. Hasil Penelitian .....	62
B. Pembahasan .....	88
C. Keterbatasan Penelitian .....	103
<b>BAB V PENUTUP</b>	
A. Kesimpulan .....	105
B. Saran .....	106
<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>	<b>108</b>
<b>LAMPIRAN.....</b>	<b>113</b>

**DAFTAR TABEL**

<b>Tabel</b>		<b>Halaman</b>
2.1	Dampak Paparan SO <sub>2</sub> terhadap Manusia .....	16
2.2	Daftar Penelitian Tentang Permodelan Kualitas Udara .....	30
3.1	Lokasi dan Jarak Pengambilan Sampel Udara Ambien di Permukiman sekitar Kawasan Industri Kota Makassar .....	43
3.2	Koefisien Dispersi Gauss .....	55
3.3	Klasifikasi Stabilitas Atmosfer .....	56
3.4	Nilai P untuk Persamaan Perkiraan Kecepatan Angin .....	57
4.1	Perusahaan yang Diteliti .....	66
4.2	Profil Cerobong Perusahaan Tahun 2018 .....	67
4.3	Parameter Meteorologi di Lokasi Penelitian Tahun 2018 ....	71

**DAFTAR GAMBAR**

<b>Gambar</b>	<b>Halaman</b>
2.1 Kerangka Teori Penelitian .....	37
2.2 Kerangka Konsep Penelitian .....	38
3.1 Diagram Alir Model .....	58
3.2 Alur Penelitian .....	59
4.1 Peta Wilayah PT. KIMA .....	63
4.2 Rata-Rata Suhu Udara Tahun 2014-2018 .....	66
4.3 Rata-Rata Radiasi Matahari Tahun 2014-2018 .....	67
4.4 Diagram Mawar Angin Musim Kemarau (April-September) Tahun 2014-2018 .....	68
4.5 Diagram Mawar Angin Musim Hujan (Oktober-Maret)	68

Tahun 2014-2018 .....	
4.6 Wilayah Pengukuran Konsentrasi SO <sub>2</sub> dan NO <sub>2</sub> di wilayah Pemukiman Penduduk yang Ditandai dengan Titik Poin Berwarna Merah .....	69
4.7 Hasil Pengukuran Konsentrasi SO <sub>2</sub> di Lokasi Penelitian Tahun 2019 .....	70
4.8 Hasil Pengukuran Konsentrasi NO <sub>2</sub> di Lokasi Penelitian Tahun 2019 .....	71
4.9 Estimasi Pola Sebaran Konsentrasi SO <sub>2</sub> di Lokasi Penelitian dalam Setahun .....	72
4.10 Estimasi Pola Sebaran Konsentrasi NO <sub>2</sub> di Lokasi Penelitian dalam Setahun.....	73
4.11 Hasil Uji Parameter Emisi dengan Kecepatan Angin pada Lokasi yang Dekat dengan Sumber Emisi .....	75
4.12 Hasil Simulasi Konsentrasi SO <sub>2</sub> di Lokasi Penelitian pada Kondisi Eksisting Tahun 2019 – 2028 .....	76
4.13 Hasil Simulasi Konsentrasi SO <sub>2</sub> di Lokasi Penelitian pada Kondisi Tinggi Cerobong Sedang Tahun 2019 – 2028 .....	77
4.14 Hasil Simulasi Konsentrasi SO <sub>2</sub> di Lokasi Penelitian pada Kondisi Tinggi Cerobong Tinggi Tahun 2019 – 2028.....	78
4.15 Hasil Simulasi Konsentrasi SO <sub>2</sub> di Lokasi Penelitian pada Kondisi Penyediaan 1 Tanaman Puring Tahun 2019 – 2028 .....	79
4.16 Hasil Simulasi Konsentrasi SO <sub>2</sub> di Lokasi Penelitian pada Kondisi Penyediaan 5 Tanaman Puring Tahun 2019 –	80

2028.....	
4.17 Hasil Simulasi Konsentrasi SO <sub>2</sub> di Lokasi Penelitian pada Kondisi Penambahan Tinggi Cerobong menjadi 30 meter dan Penyediaan Ruang Terbuka Hijau Tahun 2019 – 2028	81
4.18 Hasil Simulasi Konsentrasi SO <sub>2</sub> di Lokasi Penelitian pada Kondisi Penambahan Tinggi Cerobong menjadi 30 meter dan Penyediaan Ruang Terbuka Hijau Tahun 2019 – 2028	81
4.19 Hasil Simulasi Konsentrasi NO <sub>2</sub> di Lokasi Penelitian pada Kondisi Eksisting Tahun 2019 – 2028 .....	83
4.20 Hasil Simulasi Konsentrasi NO <sub>2</sub> di Lokasi Penelitian pada Kondisi Tinggi Cerobong Sedang Tahun 2019 – 2028 .....	84
4.21 Hasil Simulasi Konsentrasi NO <sub>2</sub> di Lokasi Penelitian pada Kondisi Tinggi Cerobong Tinggi Tahun 2019 – 2028 .....	84
4.22 Hasil Simulasi Konsentrasi NO <sub>2</sub> di Lokasi Penelitian pada Kondisi Penyediaan Ruang Terbuka Hijau Privat dengan 1 Tanaman Alkalipa Merah Per Luasan Wilayah Tahun 2019 – 2028 .....	85
4.23 Hasil Simulasi Konsentrasi NO <sub>2</sub> di Lokasi Penelitian pada Kondisi Penyediaan RTH Privat dengan 5 Tanaman Alkalipa Merah Per Luasan Wilayah Tahun 2019-2028.....	86
4.24 Hasil Simulasi Konsentrasi NO <sub>2</sub> di Lokasi Penelitian pada Kondisi Penambahan Tinggi Cerobong menjadi 30 meter dan Penyediaan Ruang Terbuka Hijau Privat Tahun 2019-2028 .....	128
4.25 Hasil Simulasi Konsentrasi NO <sub>2</sub> di Lokasi Penelitian pada Kondisi Penambahan Tinggi Cerobong menjadi 50 meter dan Penyediaan Ruang Terbuka Hijau Privat Tahun 2019-	128

2028 .....

## DAFTAR LAMPIRAN

- Lampiran 1 Laporan Hasil Pengukuran Konsentrasi SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub>
- Lampiran 2 Rekap Data Bulanan Meteorologi Tahun 2014-2018
- Lampiran 3 Formula Model
- Lampiran 4 Surat Izin Penelitian
- Lampiran 5 Dokumentasi Penelitian

## DAFTAR SINGKATAN

<b>Singkatan</b>	<b>Keterangan</b>
BMKG	Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika
BBPK3	Balai Besar Pengembangan Keselamatan dan Kesehatan Kerja
BSN	Badan Standarisasi Nasional
CO	Karbon Monoksida
CO <sub>2</sub>	Karbon Dioksida
COHb	Karboksihemoglobin
FEPA	Federal Environmental Protection Agency
Hb	Hemoglobin
HI	Hazard Index
ISPA	Infeksi Saluran Pernapasan Akut
ISPU	Indeks Standar Pencemaran Udara
KIMA	Kawasan Industri Makassar
NO <sub>x</sub>	Nitrogen Oksida
NO <sub>2</sub>	Nitrogen Dioksida
O	Oksigen
O <sub>2</sub> Hb	Oksihemoglobin
O <sub>3</sub>	Ozon
PT	Perseroan Terbatas
PM	Particulate Matter
RKL	Rencana Pengelolaan Lingkungan Hidup
RPL	Rencana Pemantauan Lingkungan Hidup
RTH	Ruang Terbuka Hijau
SO <sub>x</sub>	Sulfur Oksida
SO <sub>2</sub>	Sulfur Dioksida
SNI	Standar Nasional Indonesia
TSP	Total Suspended Particulates
VOC	Volatile Organic Compounds
WHO	World Health Organization

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **A. Latar Belakang**

Sejak revolusi industri tahun 1750-1850, terjadi perubahan skala besar untuk berbagai bidang, dimana teknologi mesin digunakan sebagai alat untuk membantu kerja manusia dalam memenuhi kebutuhannya. Seiring perkembangan kebutuhan manusia, maka penggunaan teknologi dan transportasi juga kian berkembang. Hal ini tentu memberikan dampak secara sosial, ekonomi, budaya, juga kesehatan.

Salah satu dampak kemajuan industri dan transportasi yang kian mengawatirkan adalah permasalahan kualitas lingkungan, utamanya kualitas udara ambient. Udara atau atmosfer yang menyelubungi bumi ini, terdiri atas kumpulan bermacam-macam gas. Atmosfer mempunyai komposisi yang terdiri atas komponen utama (udara kering) seperti nitrogen (78,08%), oksigen (20,95%) serta argon dan lainnya (0,97%) (Mukono, 2011).

Permasalahan kualitas udara bukan hanya dihadapi oleh negara maju, tetapi juga negara berkembang. Salah satu ciri negara berkembang yakni ditandai dengan pertumbuhan industri dan transportasi yang pesat. Hal ini akan berdampak pada kondisi lingkungan yang ada khususnya terkait kualitas udara.

Indonesia, sebagai salah satu negara berkembang juga menghadapi permasalahan kualitas udara, salah satunya dipengaruhi oleh keberadaan kawasan industri. Aktivitas pembangunan industri yang semakin meningkat memiliki konsekuensi yaitu meningkatnya limbah yang dihasilkan oleh industri tersebut, termasuk limbah udara yang dapat mengubah kualitas udara ambien maupun udara dalam ruangan (*indoor*) (Mukono, 2011). Daerah sekitar kawasan industri ataupun daerah yang memiliki banyak industri merupakan salah satu lokasi penting yang perlu dipantau kualitas udaranya.

Terkait kualitas udara ambient di kawasan industri, saat ini beberapa penelitian pernah dilakukan untuk menganalisis konsentrasi polutan di kawasan industri, khususnya di kota-kota besar di Indonesia. Ada beberapa hal yang menjadi pertimbangan, salah satunya dikemukakan Turyanti dkk. (2016) yang melakukan penelitian di wilayah Jakarta dan Tangerang menyebutkan bahwa kota-kota besar di Indonesia merupakan wilayah yang sangat padat aktivitas transportasi sekaligus memiliki beberapa wilayah yang padat industri, dan hal ini menarik untuk dikaji potensi keterpaparannya terhadap pencemar udara.

Seperti halnya beberapa kota besar di Indonesia, kota Makassar merupakan salah satu ibu kota Provinsi yang juga memiliki kawasan industri di Indonesia. Terkait pencemaran, secara umum, pencemar udara dapat berupa padatan dan gas. Pencemaran berupa padatan adalah debu, asap kendaraan bermotor dan pabrik (industri), dan proses

pembusukan sampah. Sedangkan pencemaran bahan kimia berbentuk gas seperti: sulfur dioksida ( $\text{SO}_2$ ), nitrogen oksida ( $\text{NO}_x$ ), karbon dioksida ( $\text{CO}_2$ ), dan sebagainya. Salah satu pencemar utama dari industri adalah  $\text{SO}_2$  (Hutapea, 2015).

Menurut Chusai dkk. (2012),  $\text{NO}_2$  dan  $\text{SO}_2$  umumnya merupakan dua polutan udara utama yang dipersyaratkan oleh pemerintah saat menilai dampak fasilitas industri untuk mendapatkan izin operasi di kawasan industri dan saat merencanakan perluasan industri pada kawasan industri di masa depan. Kedua polutan tersebut diketahui memiliki efek buruk pada kesehatan manusia, terutama pada sistem pernafasan.

Sulfur dioksida adalah salah satu spesies dari gas-gas oksida sulfur ( $\text{SO}_x$ ). Gas ini sangat mudah terlarut dalam air, memiliki bau namun tidak berwarna. Sebagaimana  $\text{O}_3$ , pencemar sekunder yang terbentuk dari  $\text{SO}_2$ , seperti partikel sulfat, dapat berpindah dan terdeposisi jauh dari sumbernya (Wahyuddin, 2016).

Senyawa  $\text{NO}_2$  berasal dari aktivitas pusat-pusat industri.  $\text{NO}_2$  memiliki kemampuan untuk menyerap sinar ultraviolet (UV) serta partisi sinar matahari yang memiliki panjang gelombang mendekati panjang gelombang dari UV. Akibat dari kemampuan tersebut maka udara yang memiliki kandungan  $\text{NO}_2$  yang tinggi memberikan kesan warna merah pada warna dari udara atmosfer (Turyanti dan Santikayasa, 2006).

Berdasarkan data yang diperoleh dari Badan Lingkungan Hidup Daerah Provinsi Sulawesi Selatan di Tahun 2017, terjadi peningkatan

kandungan pencemar  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_2$  di udara untuk wilayah industri di kota Makassar dari tahun ke tahun. Sebagai gambaran, di tahun 2013, kandungan  $\text{SO}_2$  di kawasan industri kota Makassar sebesar  $11,9 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$ , kemudian meningkat di tahun 2014 sebesar  $35,7 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$ , dan meningkat lagi menjadi  $56,7 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$  di tahun 2015. Sementara untuk kandungan  $\text{NO}_2$  di tahun 2013 untuk kawasan industri di kota Makassar sebesar  $11,9 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$ , meningkat drastis sebesar  $94,9 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$  di tahun 2014.

Penelitian yang dilakukan oleh Paerunan (2017) yang melakukan penelitian di Terminal Daya yang merupakan wilayah terdekat dari Kawasan Industri KIMA mengemukakan bahwa hasil pemantauan kualitas udara pada polutan sulfur dioksida ( $\text{SO}_2$ ) tertinggi terjadi pada pengukuran sore hari (14.00-16.00) mencapai  $91,81 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Penelitian oleh Hapsah (2013) di Kawasan Industri KIMA Makassar mengemukakan bahwa peningkatan pencemaran udara disebabkan oleh penambahan volume kendaraan, pertumbuhan industri, penambahan jumlah penduduk di sekitar kawasan industri, dan besarnya penggunaan listrik.

Penelitian yang dilakukan oleh Awkash Kumar dkk. (2016) menunjukkan bahwa model kualitas udara yang digunakan untuk memperkirakan perubahan tingkat kualitas udara ambien saat ini dan di masa yang akan datang dengan sumber emisi dari industri untuk parameter  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  dan PM dengan skenario penambahan tinggi cerobong memiliki efektifitas 10%, efisiensi bahan bakar dengan efektifitas

25% dan bila menggabungkan kedua skenario, maka diperoleh efektifitas sebesar 50% dalam peningkatan kualitas udara di kawasan industri.

Pencemaran  $\text{SO}_2$  dari udara juga terkait dengan pencemaran bagi air dan tanah. Dalam konsentrasi yang lebih besar dari 0.5 ppm gas ini menyebabkan kerusakan daun dalam waktu yang pendek. Karena gas ini dapat bereaksi dengan air, maka air hujan yang mengandung asam sulfat atau sulfit menyebabkan peristiwa yang disebut hujan asam. Hal ini akan menyebabkan rusaknya beberapa jenis tanaman (Sarudji, 2010). Sementara itu, paparan  $\text{NO}_2$  terhadap lingkungan berdampak pada pembentukan asap fotokimia (*smog*). Asap tersebut merupakan polusi udara yang cukup untuk mengaburkan pandangan dan menyebabkan kondisi kesehatan (Mallongi, 2015).

Selain memiliki dampak bagi lingkungan, polutan di udara sangat erat kaitannya dengan kejadian penyakit akibat saluran pernapasan. Data dari dinas kesehatan Kota Makassar menunjukkan dari tahun 2012 hingga Tahun 2016, penyakit infeksi saluran pernafasan atas (ISPA) mencapai urutan 1 dari 10 penyakit tertinggi. Kasus tertinggi penyakit ISPA berada di tahun 2013 sebanyak 134.579 Kasus (Dinkes, 2017). Hal ini mendorong pemerintah Kota Makassar untuk membuat perencanaan strategis untuk menanggulangi tingkat pencemaran udara di Kota Makassar.

Melihat tren kandungan  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_2$  di kawasan industri di Kota Makassar dari tahun ke tahun menunjukkan bahwa terjadi peningkatan pencemaran udara dari tahun ke tahun. Hal ini tentu akan berdampak

bukan hanya bagi kawasan industri, tapi juga bagi pemukiman di sekitar kawasan industri tersebut.

Berdasarkan data yang ada dan beberapa hasil penelitian sebelumnya, maka peneliti ingin melakukan penelitian untuk mengestimasi kualitas udara ambien gas ( $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_2$ ) di kawasan industri, dan menganalisis sebaran polutan tersebut pada pemukiman di sekitar kawasan industri Kota Makassar. Salah satu cara atau metode yang bisa digunakan adalah membuat suatu pemodelan untuk menggambarkan konsentrasi zat-zat pencemar ini dengan menggunakan pemodelan matematik (Suryani, 2010). Hasil dari pemodelan estimasi pencemaran udara oleh gas  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_2$  ini diharapkan dapat menjadi bahan strategi pengendalian dalam menekan peningkatan pencemaran udara  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_2$  di Kota Makassar, utamanya yang bersumber dari industri.

## **B. Rumusan Masalah**

Berdasarkan uraian pada latar belakang, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana gambaran sebaran gas Sulfur dioksida ( $\text{SO}_2$ ) dan Nitrogen dioksida ( $\text{NO}_2$ ) di pemukiman sekitar kawasan industri Kota Makassar?
2. Berapa konsentrasi gas Sulfur dioksida ( $\text{SO}_2$ ) dan Nitrogen dioksida ( $\text{NO}_2$ ) di udara berdasarkan hasil simulasi model dinamis selama 10 tahun (2019- 2028) pada kawasan industri Kota Makassar?

3. Bagaimana skenario model dalam menurunkan konsentrasi gas Sulfur dioksida ( $\text{SO}_2$ ) dan Nitrogen dioksida ( $\text{NO}_2$ ) di udara pada kawasan industri Kota Makassar?

### **C. Tujuan Penelitian**

#### **1. Tujuan Umum**

Penelitian ini bertujuan untuk menggambarkan pola sebaran  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_2$  di pemukiman sekitar kawasan industri, mengestimasi konsentrasi  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_2$  di kawasan industri Kota Makassar selama 10 tahun (2019–2028), merancang skenario model untuk menurunkan konsentrasi  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_2$  dengan pendekatan model dinamis.

#### **2. Tujuan Khusus**

- a. Memberikan gambaran sebaran  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_2$  di pemukiman sekitar kawasan industri Kota Makassar.
- b. Mengestimasi konsentrasi  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_2$  di kawasan industri Kota Makassar selama 10 tahun (2019 – 2028) dengan pendekatan model dinamis tanpa skenario.
- c. Mengestimasi konsentrasi  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_2$  di kawasan industri Kota Makassar selama 10 tahun (2019 – 2028) melalui pendekatan model dinamis dengan skenario Ruang Terbuka Hijau.
- d. Mengestimasi konsentrasi  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_2$  di kawasan industri Kota Makassar selama 10 tahun (2019 – 2028) melalui pendekatan model dinamis dengan skenario efektifitas bahan bakar pabrik.

- e. Mengestimasi konsentrasi SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub> di kawasan industri Kota Makassar selama 10 tahun (2019 – 2028) melalui pendekatan model dinamis dengan skenario penambahan tinggi cerobong.
- f. Mengestimasi konsentrasi SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub> di kawasan industri Kota Makassar selama 10 tahun (2019 – 2028) melalui pendekatan model dinamis dengan gabungan skenario.

#### **D. Manfaat Penelitian**

##### **1. Bagi pemerintah**

Hasil penelitian dapat digunakan sebagai bahan pertimbangan dalam penentuan kebijakan khususnya terkait kualitas udara kawasan industri dan pemukiman sekitar kawasan industri Kota Makassar.

##### **2. Bagi industri**

Hasil penelitian ini nantinya akan memberikan gambaran skenario dalam menurunkan konsentrasi polutan udara, sehingga dapat menjadi bahan pertimbangan pengambilan kebijakan di industri.

##### **3. Bagi institusi**

Penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi dan menambah khasanah ilmu pengetahuan khususnya dalam bidang simulasi menggunakan permodelan dinamis dengan software Stella.

##### **4. Bagi mahasiswa**

Penelitian ini menjadi wahana mengembangkan pengetahuan serta mengabdikan pengalaman dan keterampilan di lokasi penelitian.

##### **5. Bagi masyarakat**

Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi ide dan gagasan serta titik tolak dalam meningkatkan partisipasi masyarakat terutama dalam pencemaran udara, serta dapat digunakan dalam upaya mencegah risiko penyakit akibat paparan polutan di udara.

### **E. Ruang Lingkup/ Batasan Penelitian**

1. Parameter kualitas udara yang diukur hanya  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_2$  berdasarkan pertimbangan beberapa hasil penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa kedua parameter banyak ditemukan pada pabrik/ industri dengan bahan bakar utama batubara yang banyak digunakan di Kawasan Industri Makassar.
2. Data survey untuk perhitungan konsentrasi  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_2$  yang dianalisis adalah konsentrasi pada udara ambient yang berasal dari konsentrasi cerobong industri, sementara konsentrasi yang bersumber dari kegiatan lain (aktivitas pemukiman dan transportasi) tidak dilakukan analisis.
3. Konsentrasi gas  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_2$  dalam penelitian ini dihitung berdasarkan asumsi beban maksimum pada wilayah studi karena pada kenyataannya gas  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_2$  dapat terdispersi dengan adanya angin yang membawa tersebar di atmosfer.
4. Pendekatan model dinamis dalam penelitian ini menggunakan aplikasi software stella 9.0.2.

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **A. Tinjauan Umum Pencemaran Udara**

Secara alami atmosfer terdiri dari berbagai gas. Ada gas-gas yang permanen jumlahnya dan ada gas-gas yang berfluktuasi dari waktu ke waktu. Fluktuasi gas-gas tersebut didorong oleh aktivitas di permukaan bumi, baik yang alami (*biogenic*) maupun akibat aktivitas manusia (*anthropogenic*). Secara alami atmosfer mampu memperbaiki keseimbangan gas-gas tersebut. Namun demikian, jika aktivitas manusia terus-menerus menambah jumlah gas yang masuk atmosfer, maka akan berpotensi menambah konsentrasi gas tersebut, sehingga melebihi baku mutu, sehingga berpotensi terjadi pencemaran udara (Hutapea, 2015).

##### 1. Defenisi pencemaran udara

Penurunan kualitas udara disebabkan oleh masuknya zat pencemar ke dalam lingkungan udara tersebut. Zat pencemar yang masuk salah satunya berasal dari hasil sampingan kegiatan industri. Zat tersebut akan masuk dan terdispersi ke dalam atmosfer dan menyebabkan terjadinya pencemaran udara (Mahan, 2009).

Menurut Peraturan Pemerintah (PP) No. 41 Tahun 1999, pencemaran udara adalah masuknya zat atau dimasukkannya zat, energi, dari komponen lain ke dalam udara ambien oleh kegiatan manusia, sehingga mutu udara turun sampai ke tingkat tertentu yang

menyebabkan udara ambien tidak dapat memenuhi fungsinya. Zat pencemar (polutan) adalah zat yang dapat menurunkan kualitas lingkungan, atau menurunkan nilai lingkungan itu.

Sugiarti (2009) menyebutkan bahwa pencemaran udara pada suatu tingkat tertentu merupakan campuran dari satu atau lebih bahan pencemar, baik berupa padatan, cairan atau gas yang masuk terdispersi ke udara dan kemudian menyebar ke lingkungan sekitarnya. Kecepatan penyebaran ini akan tergantung pada keadaan geografi dan meteorologi setempat.

## 2. Karakteristik dan sumber pencemaran udara

Pencemar udara dapat berupa padatan dan gas. Pencemaran berupa padatan adalah debu, asap kendaraan bermotor dan pabrik (industri), dan proses pembusukan sampah. Sedangkan pencemaran bahan kimia berbentuk gas seperti: sulfur dioksida ( $\text{SO}_2$ ), nitrogen oksida ( $\text{NO}_x$ ), karbon dioksida ( $\text{CO}_2$ ), dan sebagainya. Salah satu pencemar utama dari industri adalah  $\text{SO}_2$  (Hutapea, 2015).

Perubahan lingkungan udara yang disebabkan pencemaran udara, yaitu masuknya zat pencemar (berbentuk gas – gas dan partikel kecil / aerosol) kedalam udara, dapat secara alamiah (asap kebakaran hutan, akibat gunung berapi, debu meteorit, dan pancaran garam dari laut) dan aktivitas manusia (transportasi, industri pembuangan sampah) (Ratnani, 2008).

Menurut Sugiarti (2009), perkiraan persentase komponen pencemar udara utama di Indonesia khususnya transportasi dan industri yaitu :

- a. Karbon monoksida (CO) 70,50%
- b. Oksida Sulfur (SO<sub>x</sub>) 0,9%
- c. Nitrogen Oksida (NO<sub>x</sub>) 8,9%
- d. Partikulat sebesar 1,33%
- e. Hidrokarbon (HC) 18,34%
- f. Gas rumah Kaca (CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> dan N<sub>2</sub>O), tersebar dalam nilai persentase sumber utama.

### **B. Tinjauan Umum Emisi Gas Buangan Industri**

Aktivitas pembangunan industri yang semakin meningkat memiliki konsekuensi yaitu meningkatnya limbah yang dihasilkan oleh industri tersebut, termasuk limbah udara yang dapat mengubah kualitas udara ambien maupun udara dalam ruangan (*indoor*) (Mukono, 2011).

Emisi pencemaran udara oleh industri sangat tergantung dari jenis industri dan prosesnya, peralatan industri dan utilitasnya. Berbagai industri dan pusat pembangkit tenaga listrik menggunakan tenaga dan panas yang berasal dari pembakaran arang dan bensin. Hasil sampingan dari pembakaran adalah SO<sub>x</sub>, asap dan bahan pencemar lain (Ratnani, 2008).

Sumber emisi merupakan tempat atau lubang dikeluarkannya zat pencemar menuju ke dalam atmosfer. Sumber emisi tersebut memiliki karakteristik dan bentuk fisik yang berbeda-beda mulai dari segi luas,

bentuk, dan tinggi lubang. Karakteristik dari sumber emisi antara lain laju pancaran (Q), kecepatan pengeluaran, geometri sekitar sumber emisi, dan bahan bakar yang digunakan (Mahan, 2009).

Terkait emisi cerobong, lebih lanjut Mahan (2009) memberikan definisi sebagai berikut:

1. Laju pancaran (Q) merupakan jumlah zat pencemar yang dikeluarkan ke atmosfer ( $\mu\text{g m}^{-3}$  atau  $\text{mg m}^{-3}$ ) yang kadarnya tergantung pada kapasitas produksi. Semakin besar kapasitas produksi, laju pancaran akan semakin meningkat sehingga konsentrasi zat pencemar di dalam atmosfer juga akan bertambah, dan sebaliknya.
2. Kecepatan pengeluaran merupakan laju zat pencemar yang keluar dari sumber emisi. Kecepatan pengeluaran tergantung pada proses produksi masing-masing sumber emisi tersebut serta berpengaruh terhadap laju keluarnya zat pencemar ke atmosfer .
3. Geometri di sekitar sumber emisi merupakan keadaan tata ruang di sekitar sumber emisi, antara lain berupa bentuk dan ukuran bangunan sekitar, dan jenis tanaman di sekitar sumber emisi. Keadaan tersebut berpengaruh terhadap pola sebaran zat pencemar yang melewati kawasan tersebut.
4. Bahan bakar yang digunakan oleh sumber emisi bentuknya berbeda-beda, baik itu berupa cair (minyak tanah, bensin), gas (hidrogen, LPG), padatan (kayu, batubara), ataupun nuklir. Oleh karena itu, jenis

zat pencemar hasil emisi dari masing-masing pembakaran bahan bakar tersebut juga berbeda.

Pencemaran udara terjadi pada lapisan terendah atmosfer yang disebut lapisan perbatas (*atmospheric boundary layer* – ABL). Lapisan perbatas adalah lapisan atmosfer yang sifat-sifat dan karakteristiknya sangat ditentukan oleh kondisi permukaan di bawahnya, tempat terjadinya pertukaran momentum, panas ataupun massa, yang diakibatkan oleh interaksi antara permukaan dengan lapisan udara di atasnya (Turyanti, 2016).

### **C. Tinjauan Umum SO<sub>2</sub> di Udara**

Sulfur dioksida yang ada di bumi diperoleh dari sumber alamiah dan sumber buatan. Sumber alami SO<sub>2</sub> yakni gunung-gunung api, pembusukan bahan organik mikrobiologis dan reduksi sulfat secara biologis. Pembusukan akan menghasilkan H<sub>2</sub>S yang mudah berubah menjadi SO<sub>2</sub>, di udara, sulfur dioksida mengalami reaksi fotokimia dan berubah menjadi berbagai macam senyawa sebelum jatuh ke permukaan bumi. Oksidasi SO<sub>2</sub> menjadi SO<sub>3</sub> mempunyai sifat iritan yang lebih kuat dibandingkan dengan SO<sub>2</sub>. Jumlah SO<sub>2</sub> di dalam udara sangat bervariasi dengan musim maupun keadaan cuaca (Soemirat, 2011).

#### **1. Karakteristik Sulfur dioksida (SO<sub>2</sub>)**

Sulfur dioksida adalah gas yang tidak berwarna, berbau tajam dengan rumus SO<sub>2</sub> yang tersusun dari 1 atom sulfur dan 2 atom oksigen. SO<sub>2</sub> terutama dihasilkan dari letusan gunung berapi dan

beberapa proses industri, contohnya adalah pada tahun 1991 letusan gunung Pinatubo di Philipina melepaskan sebesar 26 juta ton  $\text{SO}_2$  ke atmosfer, sehingga terjadi pendinginan permukaan secara global sebesar  $0.50\text{C}$  satu tahun setelah letusan (Department of Climate Change Australia 2007).

$\text{SO}_2$  berbau tajam dan tidak mudah terbakar. Baunya akan terdeteksi oleh indera manusia ketika konsentrasinya berkisar antara  $0.3\text{-}1.0$  ppm.  $\text{SO}_2$  merupakan pencemar primer yang berada di atmosfer dan bereaksi dengan pencemar lain membentuk senyawa sulfur dan dapat menyebabkan hujan asam (Mahan, 2009).

$\text{SO}_2$  juga bersifat larut dalam air dan jika membentuk kabut (*haze*) dari reaksi fotokimia aerosol,  $\text{SO}_2$ , oksida nitrogen dan hidrokarbon di atmosfer, senyawa sulfur dapat menurunkan jarak pandang; jika bereaksi dengan air hujan akan meningkatkan keasaman air hujan yang dapat menyebabkan asidifikasi sumber air serta penurunan unsur hara tanah; juga menyebabkan korosi logam dan bahan bangunan lain. Waktu tinggal  $\text{SO}_2$  dapat mencapai 6 hari, sehingga memungkinkan adanya akumulasi sebelum bereaksi dengan zat lain. (Turyanti, 2016).

Berdasarkan PP No. 41 Tahun 1999 baku mutu (BM) sulfur dioksida ( $\text{SO}_2$ ) udara ambien adalah  $900 \mu\text{g m}^{-3}$  dalam waktu pengukuran 1 jam,  $365 \mu\text{g m}^{-3}$  dengan pengukuran 24 jam, dan dalam setahun sebesar  $60 \mu\text{g m}^{-3}$ .

## 2. Dampak Sulfur dioksida (SO<sub>2</sub>)

Sulfur dioksida (SO<sub>2</sub>) menimbulkan rasa jika konsentrasinya 0,3 ppm dan menghasilkan bau yang kuat pada tingkat konsentrasi yang lebih besar dari 0,5 ppm. SO<sub>2</sub> adalah gas yang dapat diserap oleh selaput lendir hidung dan saluran pernafasan. Gas SO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (aq) dengan konsentrasi tinggi dapat merusak paru-paru. Paparan jangka panjang dari SO<sub>2</sub> (g) dari pembakaran batubara dapat mengganggu fungsi paru-paru atau menimbulkan penyakit pernafasan lainnya (Jacobson, 2002).

SO<sub>2</sub> adalah polutan udara yang telah terbukti menyebabkan peningkatan kejadian asma dan gejala pernafasan. Paparan SO<sub>2</sub> telah berkaitan dengan peningkatan angka kematian dan gangguan pernafasan (Chen et al., 2012), peningkatan risiko diagnosis asma (Clark et al., 2010), memperparah penyakit pernafasan yang sudah ada sebelumnya (Chen et al., 2017) dan peningkatan prevalensi gejala pernafasan seperti mengi dan sesak napas (Zhao et al., 2008).

Menurut Turk dan Kavraz (2011), dampak SO<sub>2</sub> terhadap manusia adalah sebagai berikut:

**Tabel 2.1 Dampak paparan SO<sub>2</sub> terhadap manusia**

Konsentrasi	Durasi Paparan	Dampak
<b>0.037-0.092</b>	Rata-rata tahunan	Dengan 185 µg m <sup>-3</sup> konsentrasi asap, peningkatan penyakit saluran pernafasan dan penyakit paru-paru.
<b>0.007</b>		

<b>0.11-0.19</b>	Rata-rata tahunan	Dengan konsentrasi partikel yang tinggi, perkembangan dalam penyakit saluran pernapasan pada anak-anak
<b>0.19</b>	24 jam	Dalam konsentrasi partikel yang rendah, peningkatan penyakit saluran pernapasan pada orang tua.
<b>0.19</b>		
<b>0.25</b>	24 jam	Peningkatan penyakit saluran pernapasan kronis pada orang dewasa
<b>0.5</b>	24 jam	Dalam konsentrasi partikel rendah, peningkatan dapat diamati pada kematian.
<b>5</b>		
<b>10</b>	24 jam	Dengan 750 mg m <sup>-3</sup> konsentrasi asap, peningkatan angka kematian harian dapat diamati. Tiba-tiba peningkatan morbiditas.
<b>20</b>		
		Pada pasien asma, peningkatan bernapas resistensi selama latihan (mobilitas).
		Pada orang sehat, peningkatan resistensi bernapas.
	10 menit	Bronchospasm (karakteristik asma dan bronkhitis)

Iritasi pada mata,  
batuk.

24 jam

10 menit

*Sumber: Turk dan Kavraz (2011)*

Selain menimbulkan dampak bagi kesehatan manusia, SO<sub>2</sub> juga memberikan dampak bagi lingkungan sekitar. Pencemaran SO<sub>2</sub> dari udara juga terkait dengan pencemaran bagi air dan tanah. Dalam konsentrasi yang lebih besar dari 0.5 ppm gas ini menyebabkan kerusakan daun dalam waktu yang pendek. Karena gas ini dapat bereaksi dengan air, maka air hujan yang mengandung asam sulfat atau sulfit menyebabkan peristiwa yang disebut hujan asam. Hal ini akan menyebabkan rusaknya beberapa jenis tanaman (Sarudji, 2010).

#### **D. Tinjauan Umum NO<sub>2</sub> di Udara**

Nitrogen merupakan unsur yang ada di udara untuk menjaga keseimbangan alam, di alam unsur nitrogen sebanyak 78%, dan oksigen sebanyak 20%, sisinya merupakan unsur-unsur lain, di atmosfer ada 6 jenis oksida dari nitrogen yaitu Nitrous oksida (N<sub>2</sub>O), Nitrogen oksida

(NO), Nitrogen dioksida ( $\text{NO}_2$ ), Nitrogen trioksida ( $\text{N}_2\text{O}_3$ ), Nitrogen tetraoksida ( $\text{N}_2\text{O}_4$ ), dan Nitrogen pentaoksida ( $\text{N}_2\text{O}_5$ ) (Mallongi, 2015).

$\text{NO}_2$  termasuk polutan kriteria yang diemisikan dari berbagai sumber di suatu kawasan terutama sektor transportasi. Sebagai gambaran umum, sektor transportasi menyumbang pencemar  $\text{NO}_2$  sebesar 69% di perkotaan, diikuti industri dan rumah tangga (Hadiwidodo, 2006).

#### 1. Karakteristik $\text{NO}_2$

Sumber utama nitrogen oksida adalah berasal dari aktifitas pembakaran. Pada hakikatnya semua pembakara akan menghasilkan  $\text{NO}_x$ , karena banyaknya nitrogen dan oksigen di udara sewaktu terjadi proses pembakaran. Di dalam udara NO akan berubah menjadi  $\text{NO}_2$  (Soemirat, 2011).

Senyawa  $\text{NO}_2$  juga berasal dari aktivitas pusat-pusat industri.  $\text{NO}_2$  memiliki kemampuan untuk menyerap sinar ultraviolet (UV) serta partisi sinar matahari yang memiliki panjang gelombang mendekati panjang gelombang dari UV. Akibat dari kemampuan tersebut maka udara yang memiliki kandungan  $\text{NO}_2$  yang tinggi memberikan kesan warna merah pada warna dari udara atmosfer (Turyanti dan Santikayasa, 2006).

Nitrogen Oksida adalah suatu gas yang tidak berwarna dan tidak berbau, sedangkan Nitrogen Dioksida ( $\text{NO}_2$ ) berwarna merah kecoklatan, dan keduanya sangat penting sebagai gas polutan penyebab pencemaran udara (Soemirat, 2011).

## 2. Dampak NO<sub>2</sub>

Gas NO<sub>2</sub> ini sangat berbahaya bagi kesehatan manusia karena dapat menyebabkan gangguan pernapasan (penurunan kapasitas difusi paru-paru), juga dapat merusak tanaman. Selain itu juga mengurangi jarak pandang dan resistansi di udara (Hadiwidodo, 2006).

Nitrogen dioksida adalah gas yang toksis bagi manusia. Efek yang terjadi tergantung pada dosis serta lamanya pemaparan yang diterima seseorang. Konsentrasi NO<sub>2</sub> yang berkisar antara 50 – 100 ppm dapat menyebabkan peradangan paru – paru bila orang terpapar selama beberapa menit saja. Pada fase ini orang masih dapat sembuh kembali dalam waktu 6 – 8 minggu. Konsentrasi 150 – 220 ppm dapat menyebabkan pemampatan bronkioli dan disebut “bronchiolitis fibrosis obliterans”. Orang dapat meninggal dalam waktu 3 – 5 minggu setelah pemaparan. Konsentrasi lebih dari 500 ppm dapat mematikan dalam waktu 2 – 10 hari (Slamet, 2011).

### **E. Tinjauan Umum Meteorologi**

Atmosfir merupakan lingkungan udara, yakni udara yang meliputi planet bumi. Atmosfir terdiri dari beberapa lapisan yang terbentuk akibat adanya interaksi antara sinar matahari, gaya tarik bumi, rotasi bumi dan permukaan bumi. Lapisan atmosfer dapat dikenali dari perbedaan suhu (Mickley, 2014).

Pada dasarnya, mempelajari dinamika atmosfer tidak sederhana. Berbagai macam proses terjadi di dalamnya mulai dari pergerakan molekul, turbulensi, perpindahan panas, reaksi kimia, presipitasi, perpindahan massa udara, dan sebagainya. Proses-proses tersebut saling berkaitan satu sama lain sehingga membentuk suatu sistem yang seimbang (Mahan, 2009).

Sebaran polutan sangat dipengaruhi oleh faktor meteorologi setempat seperti angin, suhu dan stabilitas atmosfer, dan hujan. Faktor tersebut dapat mempengaruhi dispersi (penyebaran), dilusi (pengenceran), transformasi fisik kimia dan transport pencemar (Hutapea, 2015).

#### 1. Angin

Kecepatan dan arah angin akan mempengaruhi konsentrasi suatu polutan. Angin akan mempengaruhi kecepatan penyebaran polutan dan pencampuran polutan dengan udara sekitarnya. Semakin tinggi kecepatan angin di daerah sumber pencemar maka kepulan asap jauh terpisah dan lebih encer sebagai pusaran turbulen campuran asap dengan udara sekitarnya, sehingga konsentrasi pencemar berkurang di daerah tersebut, dan jika kecepatan angin rendah akan menghasilkan kepulan asap lebih dekat dan lebih terkonsentrasi, sehingga konsentrasi di daerah itu akan tetap berada di daerah sumber (Ahrens, 2007).

#### 2. Temperatur

Pergerakan mendadak lapisan udara dingin ke sekitar industri dapat menimbulkan temperatur inversi. Dengan kata lain, udara dingin akan terperangkap dan tidak dapat keluar dari sekitar tersebut akan cenderung menahan polutan tetap berada di lapisan permukaan bumi sehingga konsentrasi polutan di sekitar tersebut semakin lama semakin tinggi (Chandra, 2006).

### 3. Curah hujan

Hujan merupakan faktor utama dalam pembersihan atmosfer. Proses pembersihannya melalui dua mekanisme, yaitu *rain out* merupakan proses kondensasi dengan partikel pencemar sebagai inti kondensasinya dan *wash out* adalah proses pencucian yang terjadi ketika air hujan yang jatuh ke bumi bereaksi dengan partikel-partikel pencemar (Hutapea, 2015). Penelitian yang dilakukan Muhaimin (2014) mengemukakan bahwa konsentrasi maksimum polutan ( $\text{SO}_x$ ,  $\text{NO}_x$  dan CO) pada musim hujan lebih rendah dibandingkan pada musim kemarau.

### 4. Stabilitas Atmosfer

Di lapisan Troposfer, suhu udara menurun seiring naiknya ketinggian hingga elevasi kira-kira 10 km. Penurunan ini karena berkurangnya proses pemanasan ketika ketinggian bertambah. Suhu udara menurun dibanding ketinggian (*lapse rate*). Rata-rata temperatur menurun sekitar  $0,65^\circ\text{C}$  setiap 100 m atau  $6,5^\circ\text{C}$  setiap 1 km pada *lapse rate* normal. Jika udara hangat terangkat di lingkungan

yang kering, maka terjadi ekspansi adiabatik dan pendinginan. Pendinginan adiabatik ini menghasilkan *lapse rate*  $1^{\circ}\text{C}$  per 100 m atau  $10^{\circ}\text{C}$  per 1 km, disebut juga *Dry Adiabatic Lapse Rate* (DALR) (Aji, 2010).

Pengukuran temperatur secara vertikal berbeda secara normal *lapse rate* ataupun DALR, namun secara umum keduanya disebut *Environmental Lapse Rate* (ELR). Nilai ELR menggambarkan stabilitas atmosfer dan dapat mempengaruhi pergerakan udara vertikal serta dispersi polutan. Stabilitas atmosfer berpengaruh terhadap proses dispersi polutan terutama pada arah vertikal. Dalam keadaan stabil, gerakan udara terhambat sehingga kemampuan parcel udara dalam mendispersi polutan akan berkurang. Karena dipengaruhi oleh suhu, maka nilai stabilitas atmosfer sangat ditentukan oleh intensitas cahaya matahari.

#### **F. Tinjauan Umum Permodelan**

Istilah pemodelan merupakan terjemahan bebas dari "*modelling*". "*Pemodel-an*" dapat diartikan sebagai suatu rangkaian kegiatan pembentukan model. Diperlukan penelaahan tentang "*model*" secara spesifik ditinjau dari pendekatan sistem. Secara umum model didefinisikan sebagai suatu perwakilan atau abstraksi dari suatu obyek atau situasi aktual. Model melukiskan hubungan-hubungan langsung dan tidak langsung serta kaitan timbal-balik dalam terminologi sebab akibat. Oleh karena suatu model adalah gambaran dari realita, maka pada wujudnya

lebih sederhana dibandingkan dengan realita yang diwakilinya. Model dapat disebut lengkap apabila dapat mewakili berbagai aspek dari realita yang sedang dikaji (Soemarno, 2003).

Sebelum menyusun model harus memperhatikan beberapa hal, diantaranya (Mallongi, 2012) :

1. Model adalah representasi dari sebuah teori, sehingga jika teori yang digunakan benar maka model juga seharusnya akan mengeluarkan hasil yang benar, begitu pula sebaliknya.
2. Asumsi dan penyederhanaan yang dibuat ketika menyusun model harus mengikuti aturab/teori yang berlaku, setiap asumsu yang dibuat harus disertakan dokumentasi atau dengan pencatatan yang baik.
3. Untuk menghitung model matematika, biasanya digunakan pendekatan metode numeric, sehingga model harus didefinisikan dengan baik untuk menghindari kemungkinan kesalahan perhitungan dari metode numeric yang akan digunakan.

Menurut Axella dan Suryani (2012), ada empat keuntungan penggunaan model dalam penelitian dengan menggunakan pendekatan sistem yaitu:

1. memungkinkan melakukan penelitian lintas sektoral dengan ruang lingkup yang luas,
2. dapat melakukan eksperimentasi terhadap sistem tanpa mengganggu (memberikan perlakuan) tertentu terhadap sistem,

3. mampu menentukan tujuan aktivitas pengelolaan dan perbaikan terhadap sistem yang diteliti,
4. dapat dipakai untuk menduga (meramal) perilaku dan keadaan sistem pada masa yang akan datang.

Menurut Kumar dkk. (2016), pemodelan membutuhkan inventarisasi emisi, karakteristik geografis dan parameter meteorologi. Dalam data emisi, emisi dari sumber seperti kendaraan, industri, bakery, pemanggangan terbuka, dan sektor domestik sangat dibutuhkan. Data geografi seperti data medan dan peta dasar juga sangat dibutuhkan. Sementara dalam data meteorologi, sembilan parameter seperti kecepatan angin, arah angin, curah hujan, suhu, kelembaban, tekanan, tinggi langit-langit, radiasi horizontal global dan tutupan awan sangat dibutuhkan. Ketersediaan data daerah untuk penelitian merupakan isu krusial dalam pemodelan. Estimasi emisi sumber industri dapat dilakukan untuk setiap tumpukan sebagai sumber titik. Umumnya data meteorologi diambil dari stasiun meteorologi terdekat dan diinterpolasi dengan ruang dan waktu ke tempat studi.

Menurut Mahan (2009), terdapat berbagai macam model prediksi dispersi polutan, mulai dari yang sederhana sampai dengan yang lebih kompleks yaitu (a) model empirik: hanya didasarkan pada data sumber emisi, kualitas udara, dan meteorologi (b) model numerik: berdasarkan prinsip dasar fisika dan kimia yang berhubungan dengan proses dalam pencemaran udara, contohnya adalah model kotak-tetap (c) model semi-

empirik: berdasarkan formulasi yang diturunkan dari prinsip *scientific*, tetapi berdasar pada parameter yang ditentukan secara empirik, contohnya adalah model Gaussian (d) model dinamik: berdasarkan persamaan-persamaan diferensial fisika dan kimia yang berhubungan dengan dinamika aliran fluida di atmosfer.

### **1. Model Dispersi Gaussian**

Pemodelan kualitas udara yang paling umum digunakan adalah dengan pendekatan sebaran gauss atau dikenal sebagai *Gaussian Model*, tetapi lebih sesuai untuk analisis sumber titik, atau pun modifikasi dari sumber garis. Model Gauss merupakan model dispersi yang relatif sederhana sehingga banyak digunakan, tetapi menggunakan banyak asumsi yang terlalu ideal (Beychok 2003).

Model Gaussian berbentuk persamaan matematika yang dapat dimasukkan ke dalam perhitungan variabel yang bersifat fisik dan diberikan informasi yang lebih detail mengenai sumber polutan pada suatu daerah yang diteliti (Puspitasari, 2011).

Dalam penelitian Mahan (2009), model Gauss telah dicobakan untuk sumber tunggal pada kondisi meteorologi khusus dengan waktu rata-rata satu jam atau lebih. Model ini cukup valid untuk difusi dengan waktu yang lama, kondisi homogen dan stasioner. Dalam penggunaan model dispersi gaussian, ada beberapa asumsi yang digunakan, diantaranya:

a. Turbulensi atmosfer konstan.

- b. Kecepatan dan arah angin dari sumber titik sampai reseptor konstan.
- c. Kepulan tidak mengalami deposisi ataupun *washout*.
- d. Tidak ada komponen yang diserap oleh badan air ataupun vegetasi.
- e. Dispersi hanya terjadi pada arah vertikal dan *crosswind*.
- f. Tidak ada komponen yang mengalami transformasi secara kimia
- g. Komponen yang mencapai permukaan dipantulkan kembali ke dalam kepan

Dengan keberadaan berbagai asumsi tersebut, penggunaan model gaussian masih memiliki beberapa kelemahan, namun sampai saat ini masih digunakan sebagai salah satu permodelan dispersi untuk menggambarkan pola distribusi polutan di udara.

## 2. Tinjauan Umum Model Dinamis

Dalam mengestimasi konsentrasi atau menggambarkan pengaruh berbagai aspek/ variabel, khususnya terkait pencemaran udara, penggunaan model dinamis merupakan pilihan yang tepat. Model dinamis memberikan representasi struktur diagram umpan balik yakni diagram sebab akibat atau *Causal Loop Diagram*, yang merupakan penunjuk arah aliran perubahan variabel dan polaritasnya. Polaritas aliran terbagi atas positif dan negatif. Diagram Alir atau *Flow Diagram* merupakan bentuk diagram lain yang menggambarkan

struktur model sistem dinamis. Diagram alir menggambarkan hubungan antar variabel dalam diagram sebab-akibat dengan lebih jelas, yang ditunjukkan dengan penggunaan berbagai simbol tertentu untuk berbagai variabel yang ada (Bohari, 2014).

Menurut Sterman (2000), ada beberapa tahapan dalam melakukan model dinamis terkait pengambilan kebijakan/ keputusan berdasarkan beberapa simulasi/ skenario, yakni:

- a. Identifikasi permasalahan
- b. Merumuskan hipotesis dinamis dan konseptualisasi model.
- c. Merumuskan model simulasi
- d. Uji dan validasi model
- e. Analisis model
- f. Rancangan perbaikan (uji kebijakan)
- g. Implementasi

### **G. Tinjauan Umum Aplikasi Stella**

Program pemodelan STELLA atau *Structural Thinking Experimental Learning Laboratory With Animation* adalah sistem dinamis, powerful dan fleksibel dalam menangani berbagai kasus urgen terkait semua bidang kesehatan dan semua kasus lingkungan, ketepatan mempreksi mencapai 95%, mampu mengkreasi solusi berbagai kasus/ masalah dengan langsung mengarahkan “*people learn by doing*”. Berbagai hasil penelitian ilmiah dari berbagai negara telah dibandingkan dengan berbagai kasus dalam penggunaan aplikasi stella. Hasilnya menunjukkan perbedaannya

tidak lebih dari 5% *gap* antara penelitian langsung dibandingkan aplikasi pemodelan Stella (Mallongi, 2012).

Menurut Oni dkk.(2014), “blok” model berbasis simulasi di STELLA (mis., Stock, flow, converter, reservoir, dll.) dilengkapi dengan sistem pemodelan hierarkis pada model, persamaan dan lapisan antarmuka. Pada lapisan model, struktur dikembangkan dengan menghubungkan “blok” yang telah ditentukan, yang diterjemahkan ke dalam persamaan numerik pada lapisan persamaan. Model simulasi dilakukan dengan menggunakan teknik integrasi numerik di STELLA.

Beberapa *tool* yang dapat digunakan dalam penyusunan model pada Stella antara lain :

1. *Stocks* yang merupakan hasil suatu akumulasi. Fungsinya untuk menyimpan informasi berupa nilai suatu parameter yang masuk ke dalamnya.
2. *Flow* yang berfungsi seperti aliran, yakni menambah atau mengurangi stock. Arah anak panah menunjukkan arah aliran tersebut. Aliran bisa satu arah maupun dua arah.
3. *Converter* mempunyai fungsi yang luas, dapat digunakan untuk menyimpan konstanta, input bagi suatu persamaan, melakukan kalkulasi dari berbagai input lainnya atau menyimpan data dalam bentuk grafis.

4. *Connector* yang berfungsi sebagai penghubung elemen – elemen dari suatu model. Hubungan connector langsung ke stock tidak dapat dilakukan

## H. Tabel Rekap

Tabel 2.2 Daftar Penelitian Tentang Pemodelan Kualitas Udara

No	Peneliti / Tahun	Judul	Tujuan	Karakteristik		
				Metode	Aplikasi Model	Hasil
1	Awkash Kumar dkk./ 2016	Evaluation of Control Strategies for Industrial Air Pollution Sources Using American Meteorological Society/Environmental Protection Agency Regulatory Model with Simulated Meteorology by Weather Research and Forecasting Model	Untuk memberikan gambaran kualitas udara dari industri dengan parameter SO <sub>2</sub> , NO <sub>2</sub> , dan PM, serta merumuskan skenario alternatif untuk meningkatkan kualitas udara	Model Dinamis	AERMOD	Model kualitas udara yang digunakan untuk memperkirakan perubahan tingkat kualitas udara ambien saat ini dan di masa yang akan datang dengan sumber emisi dari industri untuk parameter SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> dan PM dengan skenario penambahan tinggi cerobong memiliki efektifitas 10%, efisiensi bahan bakar dengan efektifitas 25% dan bila menggabungkan kedua skenario, maka diperoleh efektifitas sebesar 50% dalam peningkatan kualitas udara di kawasan industri.
2	Z. Klimont dkk. / 2009	Projections of SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> and carbonaceous aerosols emissions in Asia	Untuk memberikan gambaran emisi SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , dan Aerosol Karbon di Asia dan menemukan skenario efektif sebagai langkah pengendalian.	Model Dinamis	Greenhouse Gas and Air Pollution Interactions and Synergies (GAINS)	Hasil penelitian menunjukkan bahwa dalam rentang tahun 2020-2030 terdapat peningkatan penggunaan bahan bakar di wilayah Asia, khususnya Cina dan India sehingga dirumuskan skenario regulasi (undang-undang), penggunaan bahan bakar bersulfur rendah, dan penggunaan filter desulfurisasi gas buang. Dari simulasi dengan ketiga skenario tersebut, ditunjukkan bahwa ketiganya mampu mengontrol konsentrasi polutan SO <sub>2</sub> di

No	Peneliti / Tahun	Judul	Tujuan	Karakteristik		
				Metode	Aplikasi Model	Hasil
						udara ambien dari gas buang.
3	Rafael Borge dkk. / 2014	Analysis of Contributions to NO <sub>2</sub> Ambient Air Quality Levels in Madrid City (Spain) through Modeling. Implications for the Development of Policies and Air Quality Monitoring	Untuk memberikan gambaran kontribusi NO <sub>2</sub> terhadap kualitas udara ambien sebagai upaya pemantauan dalam meningkatkan kualitas udara di kota Madrid.	Model Dispersi	Sistem WRF-SMOKE-CMAQ	Hasil menunjukkan bahwa berdasarkan pemantauan kualitas udara di kota Madrid, emisi transportasi memiliki pengaruh 2/3 dari total emisi. Hal ini dikarenakan industri berada jauh dari pusat kota. Namun, sektor industri memiliki kontribusi sebesar 9,4% dari total konsentrasi NO <sub>2</sub> di udara ambien kota Madrid.
4	N.H. Savage dkk. / 2013	Air Quality Modelling Using The Met Office Unified Model (AQUM OS24-26): Model Description And Initial Evaluation	Untuk memberikan estimasi kualitas udara regional (Ozon, NO <sub>2</sub> , PM) dan untuk menginformasikan keputusan kebijakan mengenai pengendalian emisi yang dapat dilakukan.	Model Dinamis	AQUM (Air Quality in the Unified Model)	Model dinamis yang dilakukan dalam penelitian ini merupakan model dinamis tanpa skenario, namun berupa gambaran estimasi kualitas udara. Hasil menunjukkan bahwa AQUM (Air Quality in the Unified Model) dapat mengestimasi parameter Ozon dan PM, namun ada pergeseran untuk parameter NO <sub>2</sub> yang diasumsikan dikarenakan peningkatan penggunaan transportasi berbahan bakar.
5	B. Yorkor / 2017	Prediction And Modeling Of Seasonal Concentrations Of Air Pollutants In Semi-Urban Region Employing Artificial	Untuk memprediksi variasi konsentrasi polutan (SO <sub>2</sub> , NO <sub>2</sub> , CO and CH <sub>4</sub> ) berdasarkan musim.	Model Artificial Neural Network (ANN)	MATLAB	Model prognostik ANN yang secara akurat menggambarkan hubungan dinamis antara konsentrasi polutan dan variabel prediktor meteorologi. Hubungan antara nilai yang diprediksi dan yang diamati sangat signifikan pada tingkat kepercayaan 95%

No	Peneliti / Tahun	Judul	Tujuan	Karakteristik		
				Metode	Aplikasi Model	Hasil
		Neural Network Ensembles				untuk semua model. Model musim kering dan hujan memberikan $R^2$ lebih besar dari 0,99 (menunjukkan hubungan yang erat antara nilai yang diamati dan yang diperkirakan). $CH_4$ menunjukkan $R^2$ 0,9946 dan 0,9974 untuk musim kering dan hujan; CO menunjukkan $R^2$ 0,9918 dan 0,9972 untuk musim kering dan hujan; $NO_2$ menunjukkan $R^2$ masing-masing 0,9998 dan 0,9982 untuk musim kering dan hujan; $SO_2$ menunjukkan $R^2$ masing-masing 0,9921 dan 0,9991 untuk musim kering dan hujan.
6	Chatinai Chusai/ 2012	$NO_2$ and $SO_2$ Dispersion Modeling and Relative Roles of Emission Sources Over Map Ta Phut Industrial Area, Thailand	Untuk menilai potensi sumber emisi yang berkontribusi terhadap peningkatan $NO_2$ dan $SO_2$ dan untuk melihat pola dispersi polutan	Model Dispersi Polutan	AERMOD	Hasil menunjukkan bahwa di daerah industri, kontribusi $SO_2$ banyak berasal dari aktivitas industri yang memberikan dampak di wilayah-wilayah sekitar daerah industri. Namun pada parameter $NO_2$ kontribusi paling banyak adalah bersumber dari jalan (transportasi).
7	Ana Turyanti / 2016	Permodelan Dispersi PM dan $SO_2$ dengan Pendekatan Dinamika Stabilisasi Atmosfer di Lapisan Perbatas Pada Kawasan Industri	Untuk mendapatkan model dispersi PM10 dan $SO_2$ untuk menduga potensi pajanan pencemar udara masyarakat	Pendekatan Dinamika Stabilisasi Atmosfer	WRF/Chem	Hasil analisis dispersi spasial menunjukkan bahwa konsentrasi maksimum PM10 dan $SO_2$ berpotensi terjadi di wilayah DKI Jakarta terutama pada malam hari menjelang pagi. Pada siang hari konsentrasi maksimum bergeser ke arah

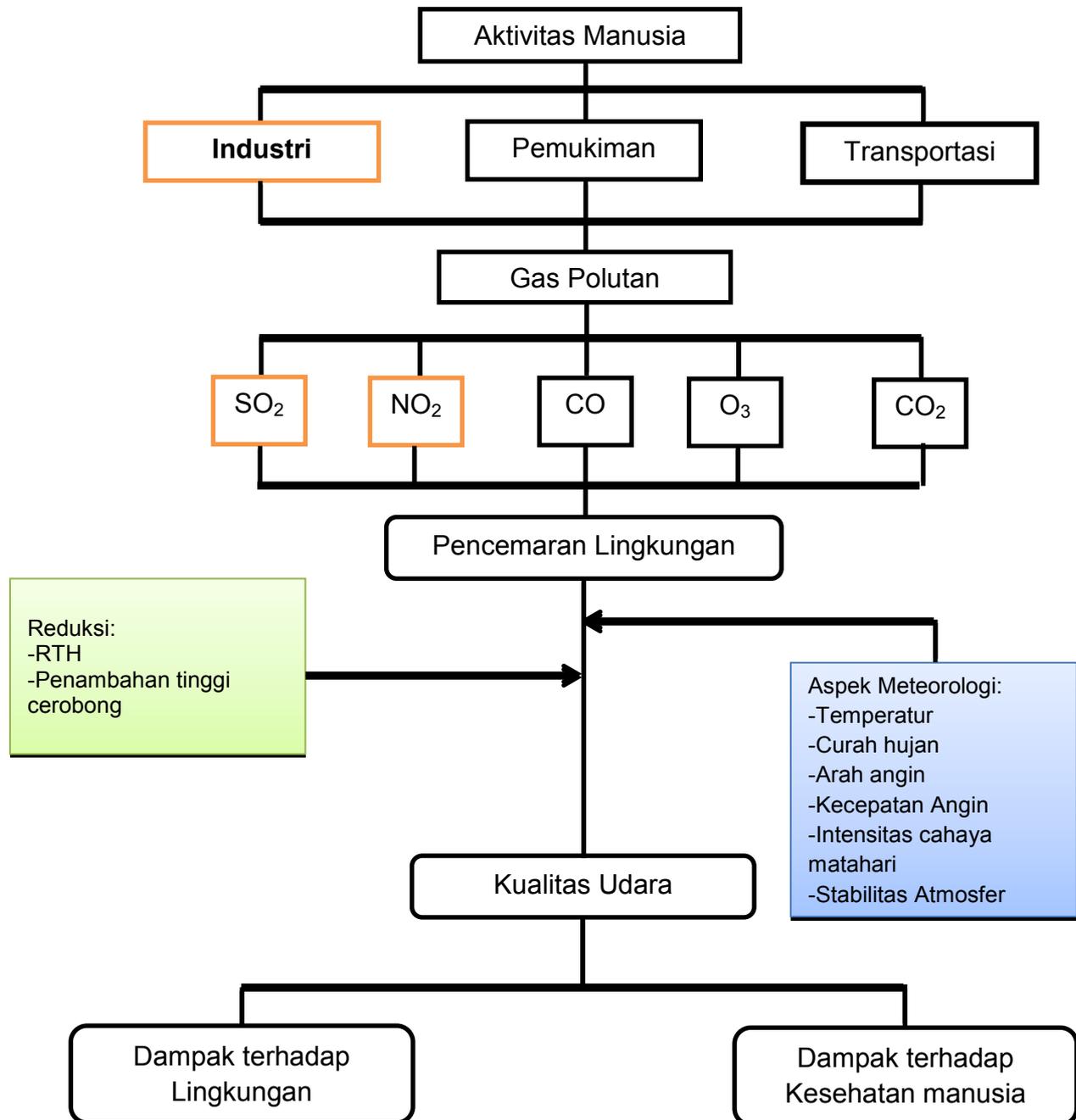
No	Peneliti / Tahun	Judul	Tujuan	Karakteristik		
				Metode	Aplikasi Model	Hasil
			sekitar kawasan industri.			Tangerang dan Tangerang Selatan. Konsentrasi maksimum di pagi hari berpotensi melampaui nilai baku mutu nasional 24 jam, baik PM10 maupun SO <sub>2</sub>
8	Lei Huang / 2017	Development of Land Use Regression Models for PM <sub>2.5</sub> , SO <sub>2</sub> , NO <sub>2</sub> and O <sub>3</sub> In Nanjing, China	Untuk mengeksplorasi penerapan model LUR berdasarkan jaringan pemantau nasional yang melakukan pemantauan rutin di kota Nanjing, China.	<i>Land Use Regressi on Model</i>	LUR, SPSS dan Arc.GIS	Hasil menunjukkan bahwa diantara 4 parameter kualitas udara, SO <sub>2</sub> dan NO <sub>2</sub> banyak berasal dari sumber emisi lain wilayah perkotaan dibandingkan dengan sumber emisi dari pabrik. Hal ini diprediksi akan semakin meningkat seiring dengan peningkatan jumlah penduduk. Namun peningkatan konsentrasi SO <sub>2</sub> dan NO <sub>2</sub> di wilayah perkotaan diasumsikan bukan hanya disebabkan oleh kendaraan bermotor, namun juga pengaruh ketinggian wilayah dan karakteristik wilayah Nanjing yang berbatasan dengan pegunungan sehingga memungkinkan akumulasi dari area lain, termasuk area industri terpusat di Nanjing.
9	Erwin Azizi Jayadipraja dkk. / 2016	Applying Spatial Analysis Tools In Public Health: The Use of AERMOD in Modeling The Emission Dispersion of	Penelitian ini bertujuan untuk memodelkan dispersi gas SO <sub>2</sub> dan NO <sub>2</sub> dan untuk menentukan luas	Model Dispersi	AERMOD	Emisi SO <sub>2</sub> dan NO <sub>2</sub> dari emisi pabrik PT. Semen Tonasa cenderung menuju ke Timur, sesuai dengan arah angin dan kondisi topografi. Konsentrasi pada satu jam puncak adalah 135 µg / m <sup>3</sup> untuk SO <sub>2</sub> dan 160 µg / m <sup>3</sup> untuk NO <sub>2</sub> , dan masih

No	Peneliti / Tahun	Judul	Tujuan	Karakteristik		
				Metode	Aplikasi Model	Hasil
		SO <sub>2</sub> And NO <sub>2</sub> to Identify Area Exposed to Health Risks	dispersi dengan American Regulation Meteorological - Environmental Protection Agency Regulation Model atau AERMOD yang telah digunakan oleh PT. Semen Tonasa			berada di bawah standar kualitas udara yang ditetapkan. Daerah dengan risiko yang lebih tinggi dari emisi ini adalah Kecamatan Minasatene (Kelurahan Bontoa, kalabbirang, minasatene dan biraeng), Kecamatan Bungoro (Kelurahan Biringere, Sapanang, Mangilu, Bulu Tellue) dan Kecamatan Labakkang (Kelurahan Taraweang).
10	Yayat Ruhiyat/ 2008	Model Prediksi Distribusi Laju Penyebaran Sulfur Dioksida (SO <sub>2</sub> ) dan Debu dari Kawasan Industri (Studi Kasus Di Kota Cilegon)	Untuk menganalisis tingkat pencemaran udara di kawasan industri menggunakan model dispersi Gauss.	Model Dispersi	Screen3 model US-EPA	Hasil analisis model <i>screen3</i> menunjukkan bahwa semakin tinggi cerobong yang digunakan, maka semakin jauh jarak polutan yang diemisikan. Jarak dan besarnya kadar polutan yang jatuh pada permukaan tanah selain dipengaruhi oleh stabilitas juga akan sangat dipengaruhi oleh besarnya sumber emisi dan ketinggian cerobong. Untuk setiap kondisi stabilitas atmosfer, konsentrasi maksimum suatu polutan dipengaruhi oleh kecepatan angin. Semakin besar kecepatan angin, konsentrasi maksimum yang diemisikan suatu sumber semakin besar, dengan jarak sebaran semakin kecil. Pada stabilitas atmosfer A pencemar udara menyebar di sekitar kawasan industri. Sedangkan pada

No	Peneliti / Tahun	Judul	Tujuan	Karakteristik		
				Metode	Aplikasi Model	Hasil
						stabilitas C, D dan E pencemar udara menyebar sampai keluar kawasan industri. Hasil analisis sebaran menunjukkan bahwa semakin besar kecepatan angin, konsentrasi maksimum polutan semakin besar dengan jarak sebaran semakin kecil.
11	Sri Suryani/ 2010	Model Sebaran Polutan SO <sub>2</sub> Pada Cerobong Asap PT. Semen Tonasa	Untuk memodelkan sebaran polutan SO <sub>2</sub> dan mendapatkan besaran konsentrasi SO <sub>2</sub> pada jarak tertentu	Model dispersi Gauss	Screen View	Sebaran Konsentrasi gas SO <sub>2</sub> pada cerobong pabrik PT. Semen Tonasa dapat dimodelkan pada sumbu (X,Y,Z) dengan jarak sebaran $0 \leq X \leq 3000$ meter arah horisontal. Konsentrasi terbesar gas SO <sub>2</sub> pada pabrik unit II/III adalah 0.090 ppm, konsentrasi terbesar gas SO <sub>2</sub> pada pabrik unit IV adalah 0.12 ppm pada jarak 350 meter – 500 meter dari sumber. Pada areal Quarry dengan ketinggian 50 meter dari sumber pada jarak 0 – 500 meter dengan arah menyamping 250 meter nilai konsentrasinya 0 – 1.9 ppm.
12	G. Grigoras / 2016	Air Pollution Dispersion Modeling In A Polluted Industrial Area Of Complex Terrain From Romania	Untuk membandingkan konsentrasi polutan udara (Pb, SO <sub>2</sub> , dan PM <sub>10</sub> ) berdasarkan aspek meteorologi, dan untuk	Model Dispersi	The Air Pollution Model (TAPM)	Dari peta dispersi menunjukkan bahwa polutan dari sumber industri merupakan sumber utama, yang lebih banyak terkena dampak di sekitar wilayah industri adalah di Lembah Firiza. Hal ini semakin didukung oleh kondisi lingkungan (topografi) yang berupa lereng dengan kemiringan yang

No	Peneliti / Tahun	Judul	Tujuan	Karakteristik		
				Metode	Aplikasi Model	Hasil
			menggambarkan prediksi sebaran polutan di wilayah Industri			menyebabkan angin lemah terperangkap dan polutan terakumulasi di wilayah sekitar lembah. Emisi lebih tinggi saat cuaca kering (curah hujan rendah).
13	Ni Wayan Srimani Puspa Dewi / 2018	Estimasi Pola Dispersi Debu, SO <sub>2</sub> dan NO <sub>x</sub> dari PT Holcim Indonesia Tbk, Bogor Menggunakan Model Gauss	Mengestimasi sebaran polutan debu, SO <sub>2</sub> , dan NO <sub>x</sub> PT Holcim Indonesia Tbk, Bogor	Observasi onal	Model Dispersi Gaussian dengan software <i>Screen3</i>	Konsentrasi debu, SO <sub>2</sub> dan NO <sub>x</sub> di permukaan (ground level concentration) menunjukkan bahwa konsentrasi permukaan maksimum ketiga zat pencemar tersebut terjadi pada malam hari, yaitu pukul 19.00 – 22.00 WIB saat kondisi atmosfer stabil dengan konsentrasi maksimum permukaan debu, SO <sub>2</sub> , dan NO <sub>x</sub> berturut-turut adalah 13.16 µg/Nm <sup>3</sup> , 32.69 µg/Nm <sup>3</sup> , dan 100.21 µg/Nm <sup>3</sup>
14	Fajar Septian Anwar, dkk./ 2018	Dispersion modelling of carbon monoxide and total suspended particulate emission from cement stacks: case study of PT. Semen Tonasa in Indonesia	Menganalisis model sebaran CO dan TSP dari cerobong pabrik semen di PT. Semen Tonasa Indonesia	Model Dispersi	Stella	Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa terdapat penurunan konsentrasi CO dan TSP di wilayah pemukiman sekitar PT. Semen Tonasa Indonesia setelah adanya perlakuan, yakni penambahan tinggi cerobong atau penyediaan ruang terbuka hijau. Penurunan konsentrasi tertinggi terjadi jika dilakukan penambahan tinggi cerobong dan penyediaan ruang terbuka hijau secara bersamaan.

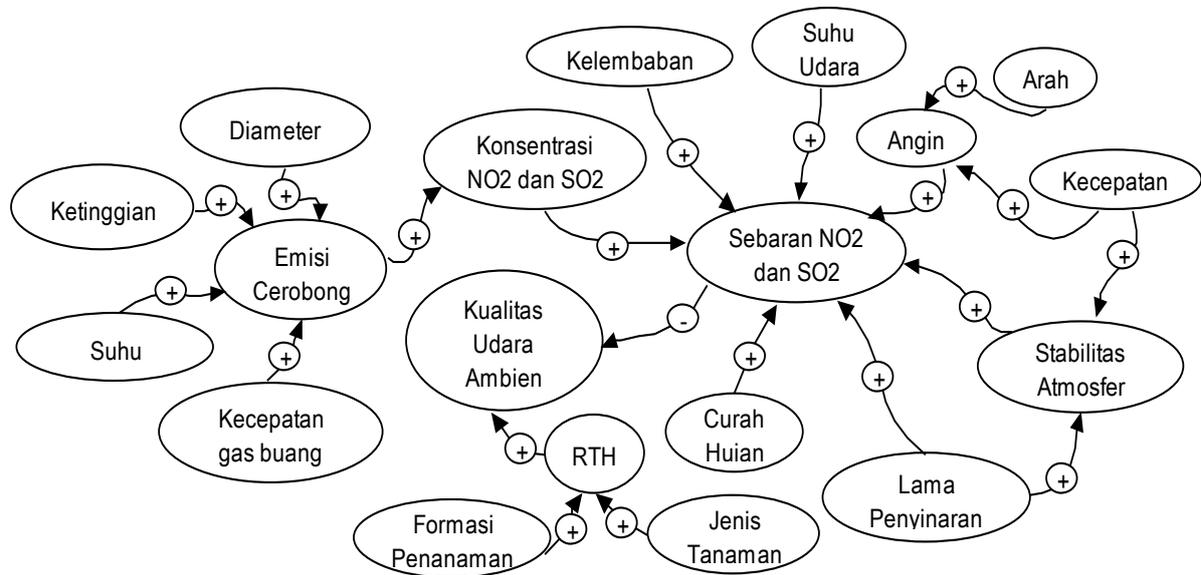
## I. Kerangka Teori



**Gambar 2.1 Kerangka Teori Penelitian**

Sumber : (Dauhi, 2014) dan (Popescu and Ionel, 2010) yang dimodifikasi

## J. Kerangka Konsep



**Gambar 2.2 Kerangka Konsep Penelitian**

### **K. Variabel dan Defenisi Operasional**

1. Konsentrasi Sulfur Dioksida ( $\text{SO}_2$ ) dan Nitrogen dioksida ( $\text{NO}_2$ ) merupakan konsentrasi emisi yang diukur berdasarkan buangan dari cerobong pabrik, udara ambient di kawasan industri, dan udara ambient pemukiman di sekitar kawasan industri. Satuan yang digunakan untuk kedua parameter tersebut adalah  $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ . Pengukuran konsentrasi  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_2$  di udara dilakukan dengan spektrofotometer.
2. Cerobong pabrik merupakan sumber emisi dari industri yang diasumsikan memberikan dampak terhadap kualitas lingkungan. Cerobong pabrik diklasifikasikan berdasarkan tinggi cerobong yang diasumsikan memberikan distribusi cemaran udara dalam kawasan industri dan kawasan pemukiman disekitar Kawasan Industri Makassar.
3. Bahan bakar produksi merupakan bahan bakar yang digunakan selama proses produksi pabrik yang akan menghasilkan gas buang.
4. Waktu operasional merupakan satuan yang menunjukkan jam saat mesin/ produksi pabrik yang menghasilkan gas buang berlangsung.
5. Tinggi cerobong merupakan ukuran cerobong secara tegak lurus yang dihitung dari permukaan tanah sampai ujung cerobong tempat keluarnya gas buang pabrik/ industri.

6. Temperatur adalah suhu rata-rata bulanan (dalam °C) yang diperoleh dari suhu rata-rata harian berdasarkan data Badan Meteorologi dan Geofisika Kota Makassar.
7. Curah hujan adalah rata-rata banyaknya hujan yang terjadi sepanjang tahun yang diperoleh dari rata-rata curah hujan harian dan bulanan berdasarkan data Badan Meteorologi dan Geofisika Kota Makassar.
8. Arah angin dominan adalah arah mata angin yang paling banyak terjadi berdasarkan data Badan Meteorologi dan Geofisika Kota Makassar.
9. Kecepatan angin adalah rata-rata satuan knot arus angin bulanan berdasarkan data Badan Meteorologi dan Geofisika Kota Makassar.
10. Udara di pemukiman penduduk adalah udara ambient yang di ukur di wilayah pemukiman yang diasumsikan mendapat emisi dari cerobong paling banyak berdasarkan arah dan kecepatan angin dalam radius hingga 4000 meter dari sumber emisi (cerobong pabrik).
11. Udara di kawasan industri adalah udara ambient dalam kawasan industri Kota Makassar yang diukur menurut titik tertentu yang dianggap representatif mewakili seluruh kawasan industri.

## **BAB III**

### **METODOLOGI PENELITIAN**

#### **A. Jenis dan Desain Penelitian**

Jenis penelitian ini adalah observasional analitik melalui pendekatan model dinamis yang dipadukan dengan model dispersi dengan pengumpulan data untuk mendesain model yang bertujuan mendeskripsikan dan memprediksi kualitas udara di kawasan industri dan menggambarkan pola penyebaran polutan di pemukiman penduduk sekitar kawasan industri Kota Makassar. Sehingga penelitian ini juga merupakan penelitian prognostic (*Prognostic research*), yakni penelitian yang berusaha memprediksi suatu kejadian pencemaran udara yang dipengaruhi oleh beberapa faktor yang ada.

#### **B. Waktu dan Lokasi Penelitian**

##### **1. Waktu Penelitian**

Penelitian dilakukan dalam beberapa tahapan dalam waktu lima bulan yaitu bulan Februari – Juni 2019 dengan didahului oleh survey awal, penelusuran daftar pustaka, dan dilanjutkan dengan penelitian di lokasi.

##### **2. Lokasi Penelitian**

Penelitian dilakukan di Kawasan Industri Kota Makassar yang terletak di jalan Perintis Kemerdekaan KM.15 Daya Kota Makassar,

dan di pemukiman penduduk di sekitar Kawasan Industri Kota Makassar.

### **C. Populasi Dan Sampel**

#### **1. Populasi**

Populasi yang akan diteliti adalah udara ambient di kawasan industri dan pemukiman sekitar kawasan industri Kota Makassar, dengan parameter SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub> yang diasumsikan memiliki risiko terhadap kesehatan dan lingkungan.

#### **2. Sampel**

Sampel dalam penelitian ini adalah cerobong pabrik yang beroperasi di kawasan industri Kota Makassar yang memiliki pola persebaran terpusat dalam radius 300-500 meter dalam kawasan industri, dan radius hingga 4000 meter dari pemukiman penduduk.

##### **a. Teknik pengambilan sampel**

Pengambilan sampel pada penelitian ini dilakukan secara *purposive sampling* yang didasarkan dengan pertimbangan arah angin dominan dan data dari hasil penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa titik lokasi pengambilan sampel berada di area pemukiman sekitar kawasan industri dalam radius 300-500 meter dari cerobong pabrik mengikuti arah mata angin, dan titik yang mewakili kawasan industri Kota Makassar secara keseluruhan yang mendapat emisi dari cerobong pabrik di Kawasan Industri Kota Makassar.

b. Kriteria Sampel

Sampel udara yang akan diambil adalah konsentrasi  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_2$  yang keluar dari cerobong pabrik yang masih aktif beroperasi, dan udara ambient di kawasan industri, serta udara ambient pemukiman di sekitar kawasan industri Kota Makassar yang berada dalam radius 300 - 500 meter dari sumber emisi cerobong.

c. Besar sampel

Besar sampel yang diukur adalah 4 titik yang berlokasi dalam kawasan industri Kota Makassar, dan pemukiman penduduk sekitar kawasan industri yang searah dengan mata angin dari patokan cerobong industri. Sampel yang diambil merupakan sampel sesaat yang diambil menurut 3 waktu (pagi, siang, sore) untuk mewakili konsentrasi harian polutan di kawasan industri dan pemukiman sekitar kawasan industri kota Makassar.

**Tabel 3.1 Lokasi dan Jarak Pengambilan Sampel Udara Ambien di Permukiman sekitar Kawasan Industri Kota Makassar**

Kode Lokasi	Lokasi	Titik Koordinat (S/E)	Jarak Titik Lokasi dari Sumber Pencemar (meter)						
			C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
L1	Jl. Kapasa Baru	5°06'10.42" 119°29'37.73"	1406	1098	423	1415	1415	1415	1415
L2	Jl. Kapasa Raya	5°05'39.40" 119°29'20.39"	2482	2193	1512	2259	2259	2259	2259
L3	Jl. Mula Baru	5°05'26.78" 119°28'56.09"	3259	2925	2233	3099	3099	3099	3099

L4 Jl. Lr. Mattoangin 5°05'04.35" 3956 3644 2964 3710 3710 3710 3710  
119°28'47.41"

**Keterangan:**

- C1 = Cerobong Produksi PT. Wahyu Pradana Bina Mulia, titik koordinat 05°06'44.53" (S) dan 119°30'08.04" (E).
- C2 = Cerobong Produksi PT. Indofood Sukses Makmur, titik koordinat 05°06'42.06" (S) dan 119°29'54.48" (E)
- C3 = Cerobong Produksi PT. Mars Symbioscience, titik koordinat 05°06'23.19" (S) dan 119°30'42.81" (E)
- C4 = Cerobong Boiler PT. Samator Gas Industry; titik koordinat 05°06'17.56" (S) dan 119°30'23.23" (E).
- C5 = Cerobong Boiler PT. Samator Gas Industry; titik koordinat 05°06'17.76" (S) dan 119°30'23.08" (E).
- C6 = Cerobong Boiler PT. Samator Gas Industry; titik koordinat 05°06'17.96" (S) dan 119°30'23.02" (E).
- C7 = Cerobong Produksi PT. Samator Gas Industry; titik koordinat 05°06'18.08" (S) dan 119°30'22.93" (E).

#### **D. Tehnik Pengambilan Sampel Udara**

##### **1. Metode pengambilan dan pemeriksaan sampel gas SO<sub>2</sub>**

###### a. Metode

Pengukuran gas Sulfur dioksida (SO<sub>2</sub>) mengacu pada SNI 7119.7.2017 dengan metode pararosanilin yang menggunakan Spektrofotometer.

###### b. Prinsip Pengujian

Sulfur dioksida (SO<sub>2</sub>) dalam larutan penyerap tetrakloromerkurat membentuk senyawa kompleks *diklorosulonatomerkurat* dengan menambah larutan *pararosanilin* dan *formaldehida* kedalam senyawa *diklorosulonatomerkurat* maka terbentuk senyawa pararosanilin metel sulfonat, berwarna ungu. Konsentrasi larutan di ukur pada panjang gelombang 550 nm.

###### c. Bahan

- 1) Larutan penyerap *tetrakloromerkuat* (TCM) 0,04 M.
- 2) Larutan induk natrium metabisulfinit ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ ).
- 3) Larutan Standar Metabisulfit ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ ).
- 4) Larutan induk iod ( $\text{I}_2$ ) 0,1 N.
- 5) Larutan iod 0,01 N.
- 6) Larutan indicator Kanji.
- 7) Larutan asam klorida (HCL) (1+10).
- 8) Larutan induk natrium tio sulfat ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ) 0,1 N
- 9) Larutan  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  0,01 N.
- 10) Larutan asam klorida (HCL) 1 M
- 11) Larutan asam sulfat ( $\text{NH}_2\text{SO}_3\text{H}$ ) 0,6% b/v.
- 12) Larutan asam fosfat ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ) 3 M.
- 13) Larutan induk pararosanilin hidroksida ( $\text{C}_{19}\text{H}_{17}\text{N}_3\text{HCl}$ ) 0,2%.
- 14) Larutan kemurnian pararosanilin.
- 15) Larutan kerja pararosanilin.
- 16) Larutan formaldehida (HCHO) 0,2% v/v
- 17) Larutan penyangga asetat 1 M (pH=4,74).

d. Peralatan

- 1) Peralatan pengambilan contoh sampel uji  $\text{SO}_2$  (setiap unit peralatan disambungkan dengan selang silikon dan tidak mengalami kebocoran).
- 2) Labu ukur 50 mL, 100mL, 250 mL, 500 mL dan 1000 mL.
- 3) Pipet volumetric 1 mL, 2 mL, 5 mL dan 50 mL;

- 4) Gelas ukur 100 mL;
- 5) Gelas piala 100 mL, 250 mL, 1000 mL;
- 6) Tabung uji 25 mL;
- 7) Spektrofotometer UV-Vis dilengkapi kuvet;
- 8) Timbangan analitik dengan ketelitian 0,1 mg;
- 9) Buret 50 mL;
- 10) Labu erlemeyer asah bertutup 250 mL;
- 11) Oven;
- 12) Kaca arloji;
- 13) Termometer;
- 14) Barometer;
- 15) Pengaduk;
- 16) Botol pereaksi

e. Pengambilan contoh uji

- 1) Pengambilan sampel selama 1 jam
  - a) Susun peralatan pengambilan sampel
  - b) Masukkan larutan penyerap  $\text{SO}_2$  sebanyak 10 mL ke masing-masing botol penyerap. Atur botol penyerap agar terlindung dari hujan dan sinar matahari langsung.
  - c) Hidupkan pompa penghisap udara dan atur kecepatan aliran 0,5 L/menit sampai 1 L/menit, setelah stabil catat laju aliran awal  $F_1$  (L/Menit).

- d) Lakukan pengambilan sampel selama 1 jam dan catat temperature dan tekanan udara.
- e) Setelah 1 jam, catat laju aliran akhir  $F_2$  (L/Menit) dan kemudian matikan pompa penghisap.
- f) Diamkan selama 20 menit setelah pengambilan sampel untuk menghilangkan pengganggu.

**(Catatan: sampel dapat diambil selama 24 jam jika disimpan pada suhu 5°C dan terhindar dari sinar matahari langsung).**

## 2) Pengujian Sampel

- a) Pengujian sampel untuk pengambilan 1 Jam
- b) Pindahkan larutan sampel ke dalam tabung uji 25 mL dan tambahkan 5 mL air suling untuk membilas.
- c) Baca serapan sampel kemudian hitung konsentrasi dengan menggunakan kurva kalibrasi
- d) Lakukan langkah-langkah diatas untuk pengujian blanko dengan menggunakan 10 mL larutan penyerap.

## 3) Perhitungan

- a) Volume sampel udara yang diambil

Volume sampel udara yang diambil dikoreksi pada kondisi normal (25°C, 760 mmHg) dengan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$V = \frac{F1 + F2}{2} \times tx \times \frac{Pa}{Ta} \times \frac{298}{760}$$

Keterangan:

V : Volume udara yang dihisap (L)

F<sub>1</sub> : Laju alir awal (L/menit)

F<sub>2</sub> : Laju alir akhir (L/menit)

50 : durasi pengambilan sampel (menit)

P<sub>a</sub> : Tekanan barometer rata-rata selama pengambilan sampel (mmHg)

T<sub>a</sub> : temperature rata-rata selama pengambilan contoh uji

98 : temperature pada kondisi normal 25 °C (K)

760 : Tekanan pada kondisi normal 1 atm (mmHg)

Konsentrasi SO<sub>2</sub> dalam sampel untuk pengambilan sampel selama 1 jam dapat dengan rumus sebagai berikut:

$$C = \frac{a}{V} \times 1000$$

Keterangan:

C : Konsentrasi SO<sub>2</sub> di udara (µg/Nm<sup>3</sup>)

a : jumlah SO<sub>2</sub> dari sampel dengan melihat kurva kalibrasi (µg)

V : Volume udara pada kondisi normal (L)

1000: Konversi liter (L) ke m<sup>3</sup>

## 2. Metode pengambilan dan pemeriksaan sampel gas Nitrogen dioksida (NO<sub>2</sub>)

### a. Metode

Pengukuran gas Nitrogen Dioksida ( $\text{NO}_2$ ) dilakukan dengan mengacu pada SNI 7119.2-2017 menggunakan metode *Griess Saltzman* dengan Spektrofotometer.

b. Prinsip Pengujian

Gas nitrogen dioksida diserap dalam larutan *Griess Saltzman* Sehingga membentuk suatu senyawa *azo dye* berwarna merah muda yang stabil setelah 15 menit. Konsentrasi larutan ditentukan secara spektrofotometer pada panjang gelombang 550 nm.

c. Bahan

- 1) Hablur asam sulfanilat ( $\text{H}_2\text{NC}_6\text{H}_4\text{SO}_3\text{H}$ )
- 2) Larutan asam asetat glasial ( $\text{CH}_3\text{COOH}$  pekat)
- 3) Air suling bebas nitrit
- 4) Larutan induk *N – (1-naftil)-etilendiamin dihidroklorida* (NEDA,  $\text{C}_{12}\text{H}_{16}\text{Cl}_2\text{N}_2$ ).
- 5) Aseton ( $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$ )
- 6) Larutan penjerap *Griess Saltzman*
- 7) Larutan induk nitrit ( $\text{NO}_2$ ) 1640  $\mu\text{g}/\text{mL}$
- 8) Larutan standar nitrit ( $\text{NO}_2$ )

d. Peralatan

Peralatan yang digunakan antara lain:

- 1) Flowmeter
- 2) Barometer

- 3) Termometer
- 4) Hygrometer
- 5) Tabung cuvet
- 6) Spektrofotometer
- 7) Poma vakum
- 8) Timbangan analitik
- 9) Desikator
- 10) Oven
- 11) Bulb
- 12) Pipet ukur
- 13) Impinge

Peralatan pengambilan contoh uji NO<sub>2</sub> seperti gambar (setiap unit peralatan disambung dengan selang silicon dan tidak mengalami kebocoran).

e. Cara Kerja

- 1) Timbang filter dalam timbangan analitik dan catat berat filter sebagai berat awal
- 2) Letakkan alat ukur NO<sub>2</sub> pada titik pengukuran, dengan ketinggian maksimal 1,5 meter dan dengan jarak maksimal 5 meter.
- 3) Masukkan larutan penyerap *Griess Saltzman* sebanyak 10 mL ke dalam botol penyerap. Atur botol penyerap agar terlindung dari hujan dan sinar matahari langsung.

- 4) Hidupkan pompa penghisap udara dan atur kecepatan alir 0,4 L/menit, setelah stabil catat laju alir awal ( $F_1$ )
- 5) Lakukan pengambilan contoh uji seama satu jam dan catat temperature, kelembaban, kecepatan angin dan tekanan udara
- 6) Setelah satu jam cata laju alur akhir ( $F_2$ ) dan kemudain matikan pompa penghisap.
- 7) Lepaskan fikter dari pompa vakum lalu timbang kembai di timbangan analitik, catat hasilnya sebagai berat akhir.

**(CATATAN Bila pengoksidasi atau pereduksi hadir, pengukuran harus sudah dilakukan maksimum satu jam setelah pengambilan contoh uji).**

f. Pengujian Sampel

- 1) Masukkan larutan uji ke dalam kuvet pada alat spektrofotometer, lalu ukur intensitas warna merah muda yang terbentuk pada panjang gelombang 550 nm.
- 2) Baca serapan contoh uji kemudian hitung konsentrasi dengan menggunakan kurva kalibrasi.
- 3) Lakukan langkah-langkah 1 sampai 2 untuk larutan penyerap di ukur sebagai larutan blanko.

g. Perhitungan

- 1) Volume sampel udara yang di ambil

Volume sampel contoh uji yang di ambil, dihitung pada kondisi normal (25°C, 760 mmHg) dengan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$V = \frac{F_1 + F_2}{2} \times t \times \frac{P_a}{T_a} \times \frac{298}{760}$$

**Keterangan:**

V : adalah volume udara yang dihisap dokoreksi pada kondisi normal 25°C, 760 mmHg.

F<sub>1</sub> : adalah laju alir awal (L/menit)

F<sub>2</sub> : adalah laju alir akhir (L/menit)

t : adalah durasi pengambilan contoh uji (menit)

P<sub>a</sub> : adalah tekanan barometer rata-rata selama pengambilan contoh uji (mmHg)

T<sub>a</sub> : adalah temperature rata-rata selama pengambilan contoh uji (K)

760 : adalah tekanan udara standar (mmHg)

2) Konsentrasi NO<sub>2</sub> di udara ambient

Konsentrasi NO<sub>2</sub> dalam sampel uji dapat dihitung menggunakan rumus sebagai berikut:

$$C = \frac{b}{v} \times \frac{10}{25} \times 1000$$

**Keterangan:**

C : adalah konsentrasi NO<sub>2</sub> di udara (µg/Nm<sup>3</sup>)

b : adalah jumlah  $\text{NO}_2$  dari contoh uji hasil perhitungan dari kurva kalibrasi

V : adalah volume udara yang dihisap dan dikoreksi pada kondisi normal  $25^\circ\text{C}$ , 760 mmHg.

10/25 : adalah faktor pengenceran

1000 : adalah konversi liter ke  $\text{m}^3$

## **E. Metode Pengumpulan Data**

### **1. Jenis dan Sumber Data**

Jenis data yang digunakan dalam penelitian ini mencakup data primer dan sekunder. Data primer diperoleh dengan melakukan pengukuran dan observasi langsung di lapangan. Data primer terdiri dari emisi gas Sulfur dioksida dan Nitrogen dioksida di dalam kawasan dan pemukiman sekitar kawasan industri Kota Makassar dan pemukiman sekitar kawasan, dan data meteorologi.

Data sekunder berupa laporan pengukuran hasil pengujian kualitas udara ambien di kawasan industri Kota Makassar yang mencakup data pengukuran konsentrasi  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_2$  cerobong tahun 2013 sampai tahun 2018 diperoleh dari masing-masing perusahaan yang diidentifikasi memiliki pabrik dengan cerobong aktif, data kualitas udara ambient kawasan industri Kota Makassar dan data luas Ruang Terbuka Hijau (RTH) di Kawasan Industri Kota Makassar yang diperoleh dari PT KIMA Kota Makassar, serta data curah hujan, arah, dan kecepatan angin diperoleh dari BMKG Kota Makassar. Data arah

angin, kecepatan angin, temperatur, dan intensitas cahaya matahari yang digunakan merupakan data harian.

## **2. Analisis Data / Model**

Penelitian ini melalui beberapa tahapan, baik dalam bentuk telaah pustaka, pengambilan dan pengolahan data maupun kegiatan analisis model dengan menggunakan aplikasi Stella 9.0.2, dan analisis dispersi menggunakan metode Gaussian. Waktu simulasi yang dilakukan yakni selama 10 tahun (2014 – 2028) dengan jumlah simulasi sebanyak 4 (lima) jenis simulasi sebagai berikut:

1. Simulasi I merupakan simulasi yang dilakukan untuk mengestimasi konsentrasi  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_2$  di kawasan industri Kota Makassar selama 15 tahun (2014 – 2028) dengan pendekatan model dinamis (aplikasi software Stella 9.0.2) tanpa skenario.
2. Simulasi II merupakan simulasi yang dilakukan untuk mengestimasi konsentrasi  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_2$  di kawasan industri Kota Makassar selama 15 tahun (2014 – 2028) dengan pendekatan model dinamis (aplikasi software Stella 9.0.2) dengan skenario ruang terbuka hijau.
3. Simulasi III merupakan simulasi yang dilakukan untuk mengestimasi konsentrasi  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_2$  di kawasan industri Kota Makassar selama 15 tahun (2014 – 2028) dengan pendekatan model dinamis (aplikasi software Stella 9.0.2) dengan skenario penambahan tinggi cerobong.

4. Simulasi V merupakan simulasi yang dilakukan untuk mengestimasi konsentrasi  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_2$  di kawasan industri Kota Makassar selama 15 tahun (2014 – 2028) dengan pendekatan model dinamis (aplikasi software Stella 9.0.2) dengan skenario ruang terbuka hijau dan penambahan tinggi cerobong.

Pemodelan dinamis diawali dengan membangun sebuah diagram alir model konsentrasi  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_2$ . Sementara untuk dispersi konsentrasi  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_2$  dari cerobong, dilakukan dengan membandingkan konsentrasi polutan dari cerobong dengan konsentrasi pada udara ambient di pemukiman penduduk setelah mereduksi konsentrasi dari transportasi untuk melihat besar pengaruh keberadaan cerobong dalam radius tertentu dengan kualitas udara di pemukiman.

Dalam menghitung konsentrasi dispersi emisi  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_2$  dari cerobong industri, digunakan rumus Gaussian yang melibatkan koefisien dispersi guna mengetahui nilai penyebaran vertikal maupun penyebaran lateral pada jarak tertentu. Konsentrasi polutan dihitung berdasarkan persamaan gaussian berikut:

$$C(x, y, z; H) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y^2}{\sigma_y^2}\right)\right] \left\{ \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-H}{\sigma_z}\right)^2\right] + \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z+H}{\sigma_z}\right)^2\right] \right\}$$

Dimana :

$C(x, y, z; H)$  = Konsentrasi permukaan ( $\text{g}/\text{m}^3$ )

$Q$  = Laju emisi konstan ( $\text{g}/\text{s}$ )

$\sigma_y, \sigma_z$  = Standar deviasi keputulan secara vertikal dan horizontal

$u$  = Kecepatan angin rata-rata pada sumber ( $\text{m}/\text{s}$ )

$x$  = Arah penyebaran ( $\text{m}$ )

$y$  = Jarak horizontal dari titik tengah sumber

$z$  = Jarak vertikal dari dasar ( $\text{m}$ )

$H$  = Tinggi sumber emisi efektif (Tinggi *stack* ( $h$ ) + tinggi keputan ( $\Delta h$ ))

Koefisien dispersi gauss yang disajikan dalam tabel 3 berikut ini.

**Tabel 3.2 Koefisien Dispersi Gauss**

Stabilitas Atmosfer	$X < 1 \text{ km}$				$X > 1 \text{ km}$		
	a	C	d	f	c	d	f
A	213	440,8	1,941	9,27	459,7	2,094	- 9,6
B	156	106,6	1,149	3,3	108,2	1,098	2
C	104	61	0,911	0	61	0,911	0
D	68	33,2	0,725	-1,7	44,5	0,516	-13
E	50,5	22,8	0,678	-1,3	55,4	0,305	-34
F	34	14,4	0,740	-0,35	62,6	0,180	-48,6

Sumber: Aji, 2010

Catatan : harga  $b = 0,894$  untuk semua kelas

$$\sigma_y = aX^b \text{ dan } \sigma_z = cX^d + f$$

$X$  = jarak konsentrasi sebaran (km)

Kecepatan angin di titik sumber menggunakan rumus :  $U_s = U_{10} \left( \frac{H_s}{10} \right)^n$

Ket :  $U_s$  = kecepatan angin pada ketinggian cerobong (m/dt)

$U_{10}$  = kecepatan angin pada ketinggian 10 m (m/dt)

$H_s$  = tinggi cerobong (m)

$n$  = konstanta = 0,25 untuk angin tidak stabil,  $n = 0,50$  untuk angin stabil.

Sementara klasifikasi stabilitas atmosfer, maka mengacu pada tabel berikut.

**Tabel 3.3 Klasifikasi Stabilitas Atmosfer**

No.	Kecepatan Angin permukaan ( m/detik )	Siang			Malam	
		Intensitas Sinat Matahari			Tutupan Awan	
		Kuat	Sedang	Lemah	>4/8 berawan	<3/8 cerah
1	<2	A	A-B	B	F	F
2	2 sampai 3	A-B	B	C	E	F
3	3 sampai 5	B	B-C	C	D	E
4	5 sampi 6	C	C-D	D	D	D
5	>6	C	D	D	D	D

Sumber : Aji, 2010.

A = sangat tidak stabil

B = sedang

C = sedikit tidak stabil

D = netral

E = agak sedikit stabil

F = stabil

Perkiraan nilai P untuk persamaan perkiraan kecepatan angin ditunjukkan oleh tabel berikut:

**Tabel 3.4 Nilai P untuk Persamaan Perkiraan Kecepatan Angin**

Kelas Stabilitas	P (Desa)	P (Kota)
A	0,11	0,15
B	0,12	0,15
C	0,12	0,20
D	0,27	0,25
E	0,29	0,40
F	0,45	0,60

Sumber: Beychok, 2005 dalam Visscher, 2014

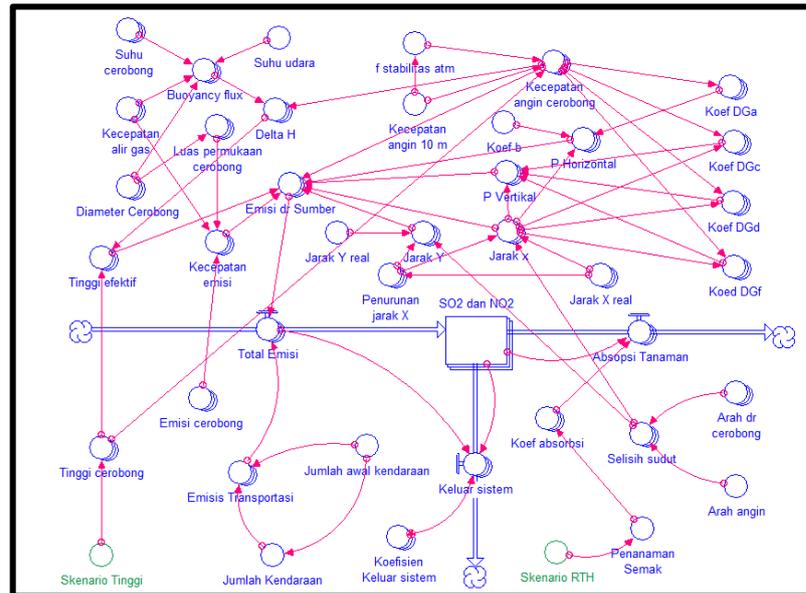
Pengelompokan frekuensi kejadian angin berdasarkan arah dan kecepatan angin untuk diketahui distribusi delapan arah mata angin, sehingga akan mendapatkan distribusi arah angin utama digunakan untuk membuat diagram *windrose* selama periode pengukuran. Diagram *windrose* dibuat dengan perangkat lunak *WRPLOT View*.

#### **F. Instrumen Penelitian**

Instrumen yang digunakan dalam penelitian ini antara lain: seperangkat komputer, alat tulis dan perangkat lunak (*Software Stella 9.0.2, WRPLOT View, Microsoft Excel, Microsoft Word*).

#### **G. Diagram Alir Model**

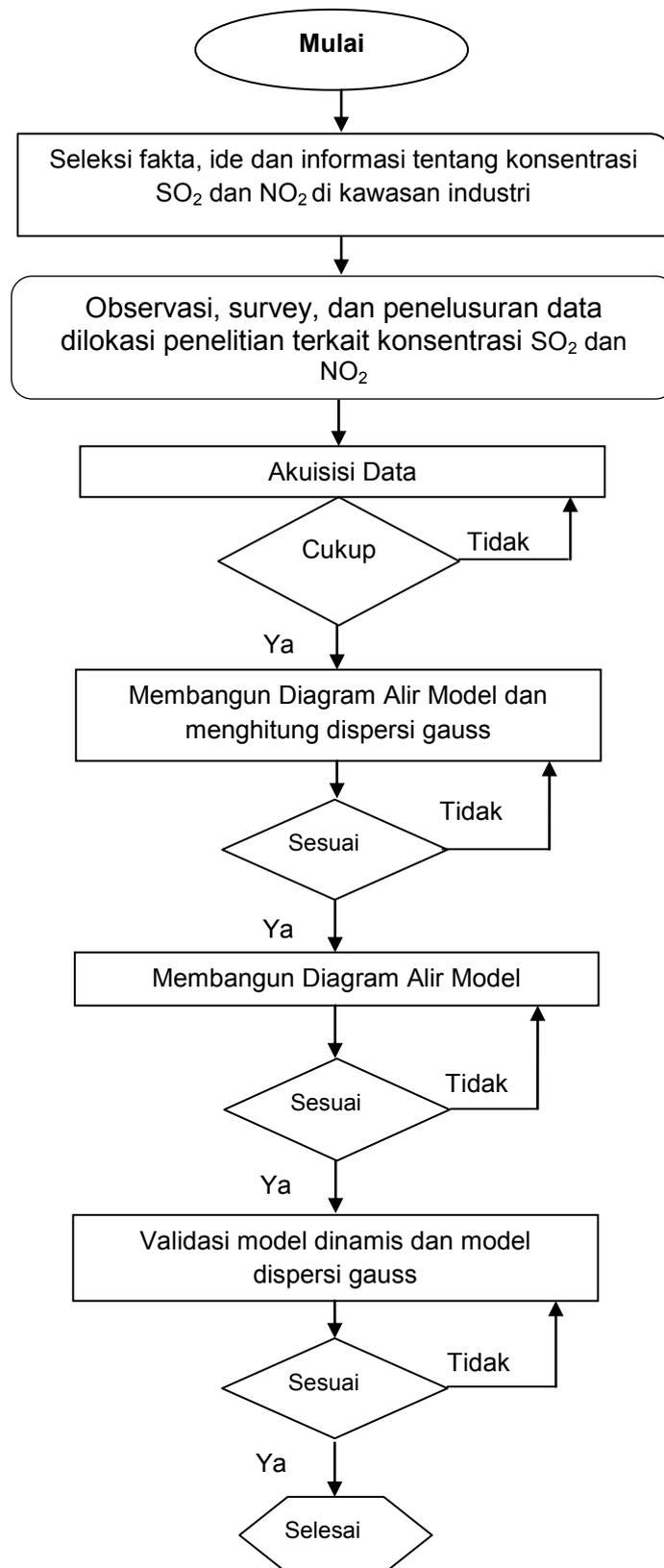
Gambar di bawah ini menunjukkan konsentrasi  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_2$  di kawasan industri yang dipengaruhi oleh aspek meteorologi, transportasi dan karakteristik cerobong. Keberadaan pohon di sekitar jalan dapat menyebabkan penurunan konsentrasi  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_2$  karena beberapa pohon memiliki kemampuan menyerap polutan termasuk gas  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_2$ .



**Gambar 3.1 Diagram Alir Model**

Selain reduksi konsentrasi polutan melalui tumbuhan, reduksi juga dapat dilakukan dengan penambahan tinggi cerobong pabrik. Penambahan tinggi cerobong juga akan menurunkan kontribusi polutan di udara ambient yang berasal dari cerobong. Semakin tinggi cerobong, maka akan semakin jauh akumulasi polutan dari sumber emisi. Hal itu dipengaruhi faktor meteorologi seperti arah, kecepatan angin, temperatur, dan curah hujan.

## H. Alur Penelitian



## I. Kontrol Kualitas

Kontrol kualitas dilakukan guna mengontrol aspek operasional dalam proses penelitian mulai dari persiapan sampai pengolahan data.

### 1. Standarisasi alat ukur

Uji coba alat ukur dilakukan untuk memastikan alat ukur yang digunakan berfungsi baik dan mampu untuk memberikan hasil pengukuran yang diharapkan (kalibrasi). Untuk menjamin alat ukur maka digunakan alat ukur yang digunakan di laboratorium Balai Besar Pengembangan Keselamatan dan Kesehatan Kerja Makassar.

### 2. Standarisasi tenaga laboratorium

Standarisasi tenaga laboratorium, peneliti menggunakan tenaga pengambil sampel dan penguji sampel dari Balai Besar Pengembangan Keselamatan dan Kesehatan Kerja Makassar yang berpengalaman dan bersertifikat Badan Standarisasi Akreditasi Nasional (BASN). Pemeriksaan sampel udara juga akan mengikuti prosedur kerja yang ditetapkan oleh Standar Nasional Indonesia (SNI).

### 3. Validasi model

Validasi model dirancang untuk membandingkan apakah perilaku model yang dibangun untuk variabel - variabel kunci dapat mewakili dan merepresentasikan kondisi nyatanya. Aral (2010) menyebutkan bahwa dalam validasi model, pendekatan tepat yang dapat dilakukan adalah validasi kesesuaian model dengan tujuan model yang

dirumuskan. Representasi model menunjukkan bahwa model tersebut dapat diterima untuk digunakan. Tapi bukan berarti menjadi kebenaran mutlak pada sistem yang dimodelkan. Untuk validasi operasional, gambaran model dapat dibandingkan antara data simulasi dengan data yang diperoleh melalui pengamatan dan pengukuran sistem yang sebenarnya.

Sebuah pemodelan akan diterima jika hasil dari pemodelan tersebut valid. Model dikatakan valid, jika jarak (atau kesalahan) yang diberikan dalam pemodelan antara hasil simulasi dan eksperimen kurang dari nilai kritis (nilai yang telah ditetapkan mula-mula, dapat sebagai error). Sesungguhnya, model yang valid akan menggambarkan fenomena yang pasti, sedangkan model yang tidak valid akan sangat jauh dari fenomena pasti. Oleh karena itu, dalam pembangunan model dibutuhkan sebuah konstanta analisis kritis (critical analysis) sebagai pembanding yang akan meningkatkan performa dan keakuratan model (Iswanto, 2012).

Mengacu pada teori tersebut, dalam penelitian ini, validasi dilakukan bukan dengan membandingkan hasil akhir dari model, namun validasi dilakukan saat membangun model, yakni dengan memastikan bahwa data-data yang diperoleh telah divalidasi dan secara representatif mewakili sistem yang akan dimodelkan.

## **BAB IV**

### **PEMBAHASAN**

#### **A. Hasil Penelitian**

##### **1. Gambaran Umum Lokasi Penelitian**

PT. KIMA (Kawasan industri Makassar) terletak di kecamatan Biringkanaya Kota Makassar mulai dibangun dengan pembebasan lahan pada tahun 1972 dan berlangsung selama sebelas tahun hingga tahun 1983 dengan status menjadi badan pengelola. Statusnya kemudian berubah menjadi Perseroan Terbatas (PT) yang dikelola oleh Badan Usaha Milik Negara (BUMN) yang didirikan dengan nama PT. (Persero) KIMA dengan luas lahan 703 Ha.

Kawasan Industri Makassar ini terletak 15 KM dari pusat kota Makassar, tepatnya di poros jalan utama kota Makassar yakni Jl. Perintis Kemerdekaan dan terhubung dengan jalan tol Ir. Sutami. Bisnis utama PT Kima adalah penjualan lahan industri dan penyewaan bangunan pabrik siap pakai. Status PT. KIMA telah disahkan melalui Keputusan Presiden No. 12 Tahun 1993 sebagai Kawasan Industri Berikat.

Batas - batas Kawasan Industri yang diberikan status Kawasan Berikat sebagaimana dimaksud dalam Keputusan Presiden tersebut adalah:

Batas sebelah Utara : Jln. Kima Raya II

Batas sebelah Barat : Jln. Lingkungan

Batas sebelah Selatan : Jln. Kima Raya I

Batas sebelah Timur : Jln. Kima III



**Gambar 4.1 Peta Wilayah PT. KIMA**

Di sekitar Kawasan Industri Makassar (PT. KIMA) terdapat wilayah pemukiman penduduk dan area pusat bisnis yang secara teritorial merupakan wilayah Kecamatan Biringkanayya. Kecamatan Biringkanayya memiliki 11 kelurahan yakni kelurahan [Bakung](#), [Berua](#), [Bulurokeng](#), [Daya](#), [Katimbang](#), [Laikang](#), [Paccerrakang](#), [Pai](#), [Sudiang](#), [Sudiang Raya](#), dan kelurahan [Untia](#). Kecamatan Biringkanayya merupakan kecamatan yang berbatasan dengan Kabupaten Maros.

## 2. Deskripsi Kegiatan di PT. Kima

Kawasan Industri Makassar dilengkapi dengan berbagai fasilitas dan utilitas pelengkap. Sejumlah sarana dan prasarana tersebut memberikan kenyamanan dan menjadi sarana dan prasarana

pendukung dalam menjalankan aktifitas di dalam kawasan. Beberapa fasilitas yang tersedia dalam Kawasan Industri Makassar adalah sebagai berikut:

a. Kantor Pengelola Kawasan Industri Makassar

Kantor pengelola PT KIMA merupakan kantor pusat pengelolaan kawasan. Bentuk pelayanan satu atap merupakan komitmen pengelola untuk memberikan yang kemudahan dalam pelayanan. Kantor PT KIMA terdiri dari ruang administrasi, keuangan, unit divisi, ruang serba guna, mesjid dan pos pengamanan.

b. Pabrik dan Area Pergudangan

Data yang diperoleh dari situs PT. KIMA dapat diketahui saat ini terdapat 265 perusahaan rekanan yang ada di area PT. KIMA. Perusahaan - perusahaan tersebut merupakan perusahaan, baik dengan kegiatan produksi (pabrik), maupun gudang tanpa kegiatan produksi.

c. Pemukiman

Kawasan industri Makassar (KIMA) memiliki rumah susun sederhana sewa (rusunawa) yang diperuntukkan bagi tenaga kerja yang bekerja di dalam kawasan industri tersebut. Rusunawa yang dibangun pada tahun 2010 dikelola oleh divisi pengelola rusunawa Kawasan Industri Makassar terdiri dari dua bangunan twin block dan terletak di jalan Kima delapan dan jalan Kima Sepuluh.

### 3. Karakteristik Sumber Emisi

Sumber emisi berasal dari beberapa aktivitas industri yang dikeluarkan melalui cerobong. Dari beberapa perusahaan tersebut, telah dikelompokkan beberapa perusahaan yang memiliki cerobong yang menjadi fokus penelitian ini yakni:

**Tabel 4.1 Perusahaan yang Diteliti**

No	Nama Perusahaan	Alamat
1	PT Mars Symbioscience Indonesia	Jl. Kima 10 Kav. A6
2	PT Wahyu Pradana Bina Mulia	Jalan Kima Raya ID-2C
3	PT Indofood Sukses Makmur	Jl. Kima 10 No.Kav A/3
4	PT Samator Gas Industri	Jl Kima 3 Kav.2B

Dari keempat perusahaan tersebut, sumber emisi berasal dari 7 (tujuh) buah cerobong yang memiliki karakteristik yang berbeda-beda.

Profil masing-masing cerobong ditunjukkan dalam tabel berikut:

**Tabel 4.2 Profil Cerobong Perusahaan Tahun 2018**

Komponen	PT.Wahyu Pradana Binamulia	PT.Indofood Sukses Makmur	PT. Mars Symbioscience	PT. Samator Gas Industri			
				B1	B2	B3	B4
Bahan Bakar	Cangkang	Batubara	Batubara	Batubara	Batubara	Batubara	Batubara
Tinggi Cerobong (m)	30,85	45	42,5	20,31	20,4	20,22	50
Diameter Cerobong (m)	2,25	2,75	2.8	1,5	1,5	1,5	3,15
Suhu Cerobong (°C)	94	75	80	187	130	105	171
Kecepatan Alir Gas (m/s)	9,2764	1,4322	12,2912	2,2698	2,237	1,532	12,251
Sulfur Dioksida (mg/m <sup>3</sup> )	40,983	0,611	42,047	0	0	0,321	0,611

Nitrogen Dioksida (mg/m <sup>3</sup> )	43,350	19,036	46,209	3,764	1,8818	0.512	49,036
--	--------	--------	--------	-------	--------	-------	--------

*Sumber: Laporan Hasil Uji Emisi Cerobong Semester 2 Tahun 2018*

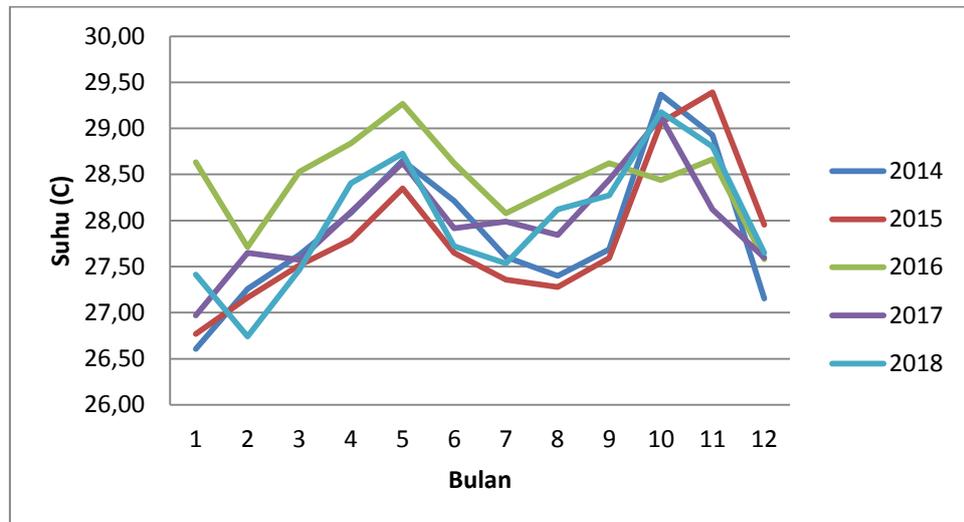
**Keterangan:**

- PT. Wahyu Pradana Bina Mulia, titik koordinat 05°06'44.53" (S) dan 119°30'08.04" (E).
- PT. Indofood Sukses Makmur, titik koordinat 05°06'42.06" (S) dan 119°29'54.48" (E)
- PT. Mars Symbioscience, titik koordinat 05°06'23.19" (S) dan 119°30'42.81" (E)
- B1 = Pabrik Cerobong Boiler; titik koordinat 05°06'17.56" (S) dan 119°30'23.23" (E).
- B2 = Pabrik Cerobong Boiler; titik koordinat 05°06'17.76" (S) dan 119°30'23.08" (E).
- B3 = Pabrik Cerobong Boiler; titik koordinat 05°06'17.96" (S) dan 119°30'23.02" (E).
- B4 = Pabrik Cerobong; titik koordinat 05°06'18.08" (S) dan 119°30'22.93" (E).

#### **4. Analisis Data Meterologi**

Data meteorologi mencakup data meteorologi yang berasal dari stasiun meteorologi terdekat yakni Stasiun Meteorologi Maritim Paotere yang diunduh secara online melalui laman web Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika. Data meteorologi yang digunakan adalah data rata-rata harian yang meliputi suhu udara, radiasi matahari, arah angin, dan kecepatan angin pada tahun 2014, 2015, 2016, 2017, dan 2018.

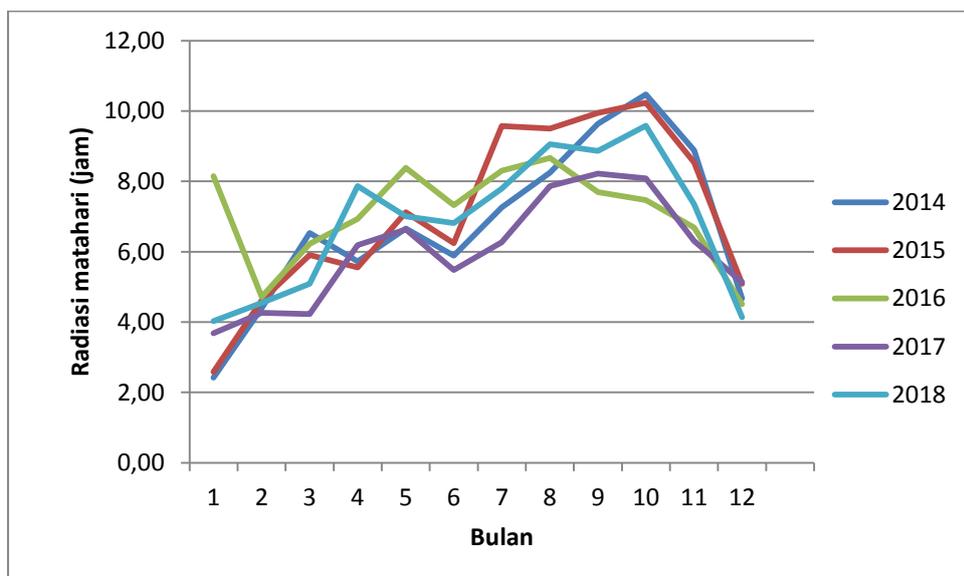
##### **a. Suhu udara**



**Gambar 4.2 Rata-Rata Suhu Udara Tahun 2014-2018**

Gambar 4.2 menunjukkan bahwa rata-rata suhu udara tertinggi pada bulan Oktober yaitu berkisar  $28,44-29,37^{\circ}\text{C}$  dan rata-rata suhu udara terendah pada bulan Januari yaitu berkisar  $26,61-28,63^{\circ}\text{C}$ .

b. Radiasi matahari

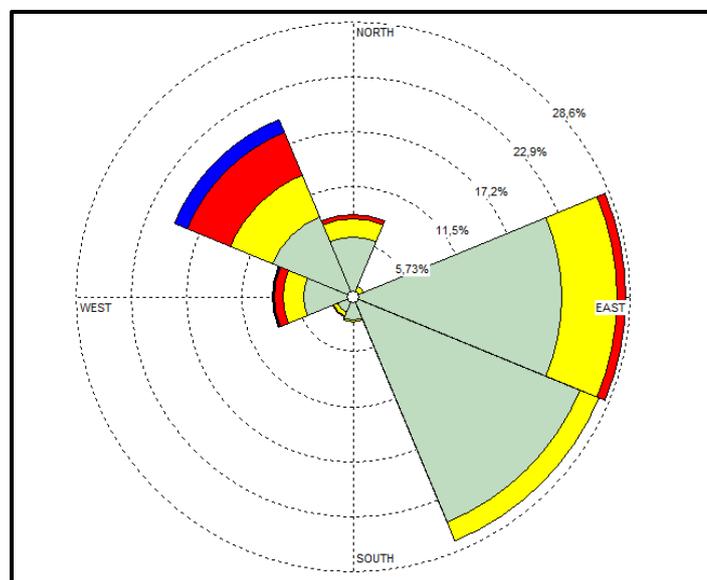


**Gambar 4.3 Rata-Rata Radiasi Matahari Tahun 2014-2018**

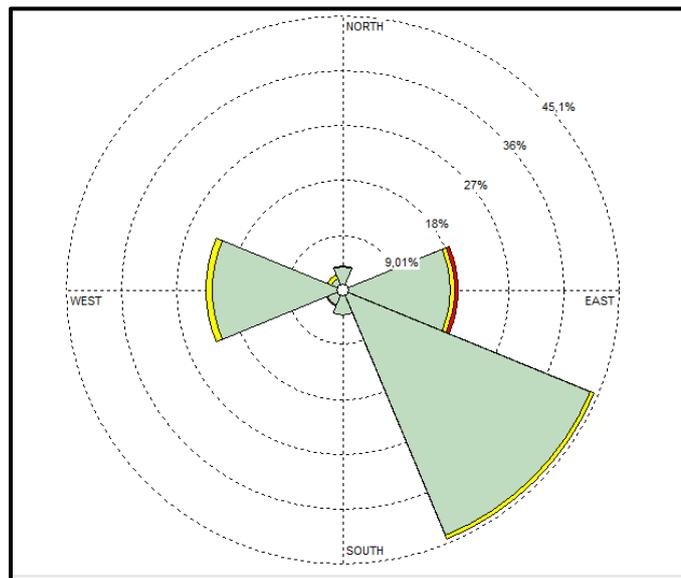
Gambar 4.3 menunjukkan bahwa rata-rata radiasi matahari tertinggi pada bulan Oktober yaitu berkisar 7,46-10,47 jam/hari dan rata-rata radiasi matahari terendah pada bulan Januari yaitu berkisar 2,42-8,15 jam/hari.

c. Arah angin dan kecepatan angin

Arah angin dan kecepatan angin berperan dalam penyebaran polutan. Arah angin menunjukkan arah penyebaran polutan, sementara kecepatan angin menentukan sejauh mana penyebaran polutan. Untuk mengetahui distribusi tersebut data angin dianalisis dan dibuat diagram mawar angin (*windrose*) menggunakan software *WRPLOT View 8.0.2*, seperti yang ditampilkan pada Gambar 4.4 dan Gambar 4.5.



**Gambar 4.4 Diagram Mawar Angin Musim Hujan (Oktober-Maret) Tahun 2014-2018**

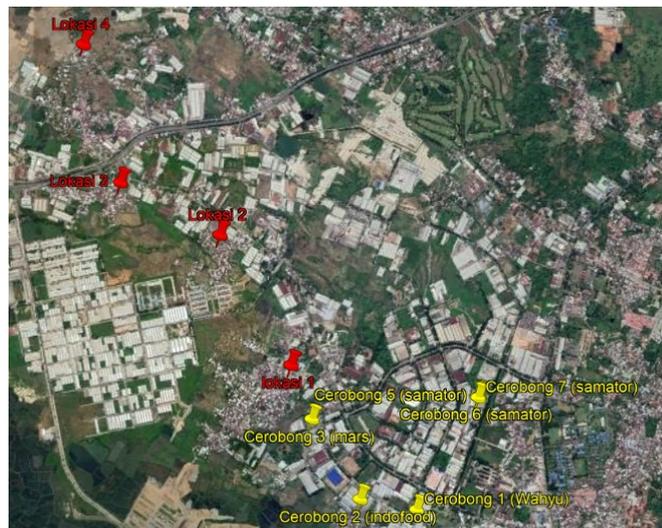


**Gambar 4.5 Diagram Mawar Angin Musim Kemarau (April-September) Tahun 2014-2018**

Hasil analisis diagram mawar angin (*windrose*) menunjukkan pola bervariasi antara periode musim hujan dan musim kemarau. Gambar 4.4 menunjukkan arah pergerakan angin pada musim hujan yang umumnya bergerak dari Timur ke Barat dengan frekuensi sebesar 28,1% juga dari arah Tenggara menuju Barat Daya dengan frekuensi sebesar 27,44%. Kecepatan angin rata-rata pada musim hujan periode tahun 2014-2018 sebesar 2,32 m/s. Sementara Gambar 4.5 menunjukkan pada musim kemarau, arah pergerakan angin umumnya dari Tenggara ke Barat Daya dengan frekuensi sebesar 44,15%. Kecepatan angin rata-rata pada musim kemarau selama periode tahun 2014-2018 sebesar 1,92 m/s.

##### **5. Pengukuran Konsentrasi Sulfur Dioksida (SO<sub>2</sub>) dan Nitrogen Dioksida (NO<sub>2</sub>)**

Setelah melakukan analisa terhadap karakteristik meteorologi di kota Makassar, maka ditentukan 3 (tiga) titik pengukuran parameter  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_2$  di wilayah pemukiman penduduk, berdasarkan gambar:



**Gambar 4.6 Wilayah pengukuran konsentrasi  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_2$  di wilayah pemukiman penduduk yang ditandai dengan titik poin berwarna merah**

Hasil pengukuran langsung konsentrasi  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_2$  udara ambien dan parameter meteorologi pada 4 (empat) titik lokasi di permukiman sekitar kawasan industri PT. KIMA Makassar menunjukkan hasil sebagai berikut:

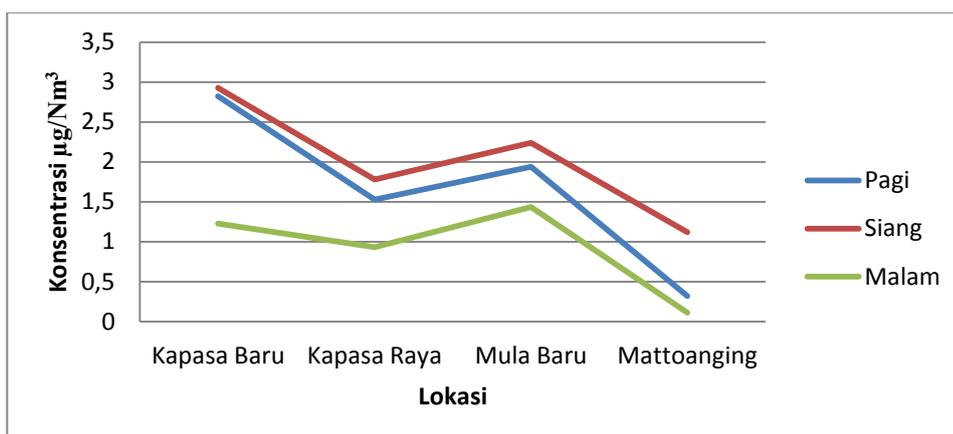
**Tabel 4.3 Parameter Meteorologi di Lokasi Penelitian Tahun 2019**

Lokasi	Tanggal	Jam	Suhu Udara ( $^{\circ}\text{C}$ )	Kecepatan Angin (m/s)	Arah Angin
Jl. Kapasa Baru	26 Juni 2019	09.00-10.00	27,0	0,7	SE
		13.00-14.00	33,2	1,2	S
		20.00-21.00	24,5	0,3	E
Jl. Kapasa Raya Bonto Jai	26 Juni 2019	09.00-10.00	27,2	1,1	S
		13.00-14.00	34,1	1,4	SE

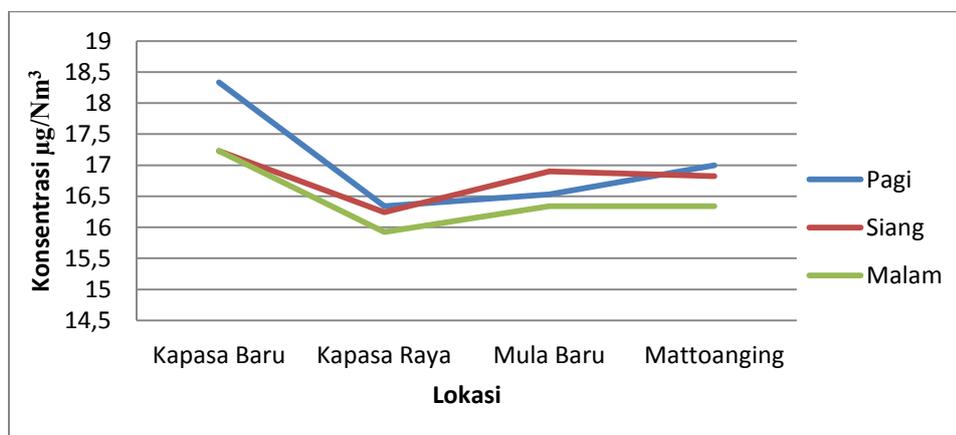
		20.00-21.00	24,5	0,4	S
		09.00-10.00	28,1	0,7	S
Jl. Mula Baru	27 Juni 2019	13.00-14.00	32,7	1,2	W
		20.00-21.00	25,9	0,3	W
		09.00-10.00	27,7	0,4	S
Jl. Lr. Mattoangin	27 Juni 2019	13.00-14.00	33,4	0,7	SW
		20.00-21.00	26,1	0,2	SW

Sumber: Data Primer, 2019

Untuk membandingkan konsentrasi  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_2$  menurut waktu dan lokasi, ditunjukkan melalui grafik berikut:



**Gambar 4.7 Hasil Pengukuran Konsentrasi  $\text{SO}_2$  di Lokasi Penelitian Tahun 2019**



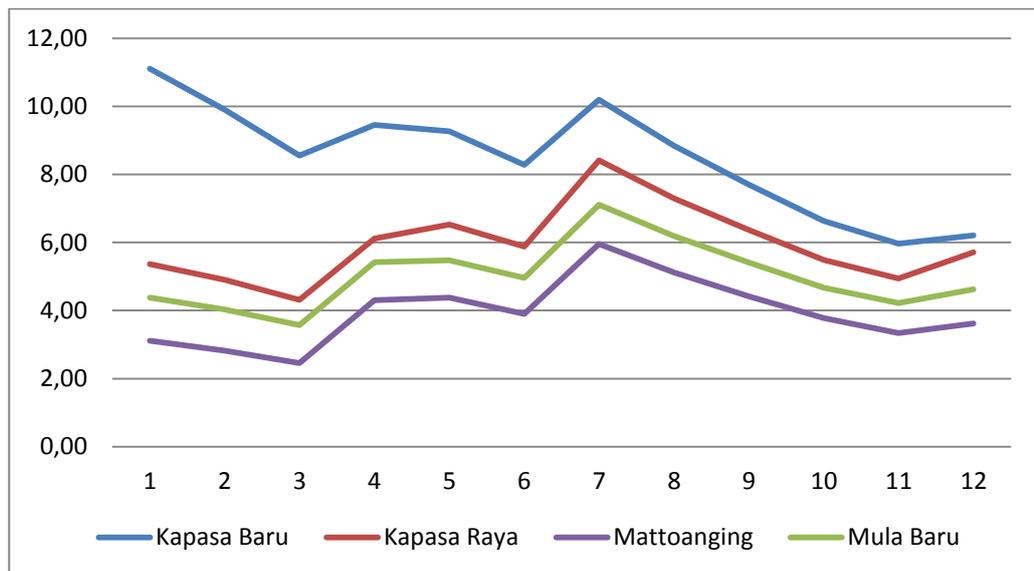
**Gambar 4.8 Hasil Pengukuran Konsentrasi  $\text{NO}_2$  di Lokasi Penelitian Tahun 2019**

Gambar 4.7 menunjukkan konsentrasi  $\text{SO}_2$  tertinggi berada di titik lokasi Kapasa Baru pada siang hari dengan nilai sebesar 2,927  $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$  dan konsentrasi  $\text{SO}_2$  terendah berada di titik lokasi Mattoanging pada malam hari dengan nilai konsentrasi sebesar 0,112  $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ . Gambar 4.7 juga menunjukkan bahwa konsentrasi  $\text{SO}_2$  cenderung tinggi pada waktu siang hari, dan cenderung rendah pada waktu malam hari.

Sementara itu, konsentrasi  $\text{NO}_2$  di lokasi penelitian ditunjukkan oleh Gambar 4.8, dimana konsentrasi tertinggi berada pada titik lokasi Kapasa Baru pada waktu pagi hari dengan nilai konsentrasi 18,335  $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$  dan konsentrasi  $\text{NO}_2$  terendah berada di titik lokasi Kapasa Raya pada waktu malam hari dengan nilai konsentrasi sebesar 15,926  $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ .

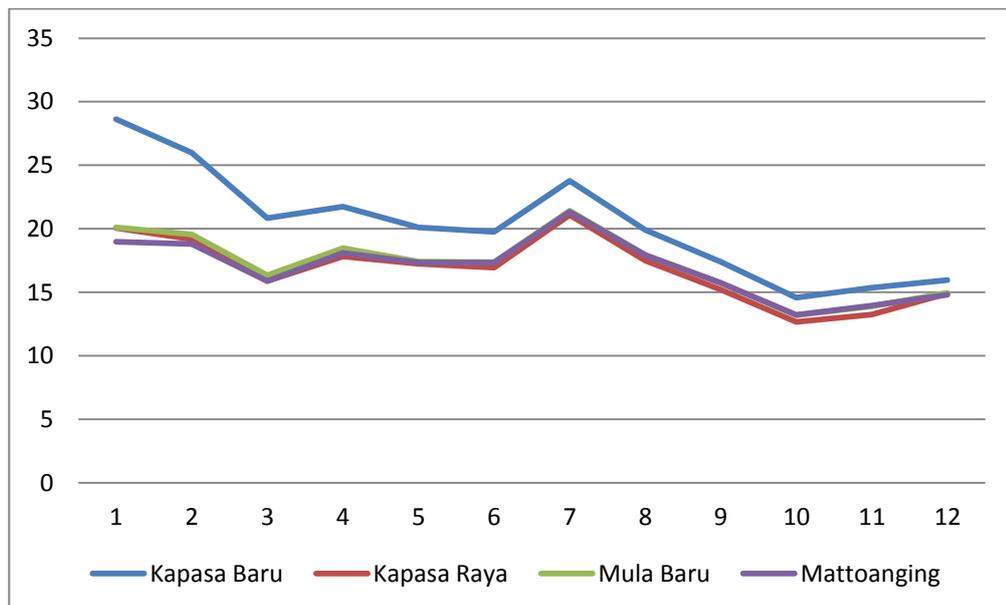
## **6. Estimasi Pola Sebaran Konsentrasi Sulfur Dioksida ( $\text{SO}_2$ ) dan Nitrogen Dioksida ( $\text{NO}_2$ )**

Data karakteristik sumber emisi tahun 2015-2018 dan data meteorologi tahun 2014-2018 dihitung menggunakan model dispersi Gaussian. Persamaan-persamaan yang digunakan untuk menghitung sebaran emisi diterjemahkan ke dalam program pemodelan dinamis menggunakan software *Stella 9.0.2* untuk mengetahui estimasi pola sebaran konsentrasi  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_2$  dalam setahun.



**Gambar 4.9 Estimasi Pola Sebaran Konsentrasi  $SO_2$  di Lokasi Penelitian dalam Setahun**

Gambar 4.9 menunjukkan bahwa pola sebaran konsentrasi  $SO_2$  di lokasi penelitian berbeda-beda menurut lokasi. Secara keseluruhan, wilayah yang memiliki konsentrasi  $SO_2$  tertinggi selama 12 bulan berada di titik lokasi Kapasa Baru. Konsentrasi tertinggi berada di titik lokasi Kapasa Baru pada bulan Januari yakni sebesar  $11,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , dan konsentrasi terendah berada di titik lokasi Mattoanging pada bulan Januari yakni  $3,11 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .



**Gambar 4.10** *Estimasi Pola Sebaran Konsentrasi NO<sub>2</sub> di Lokasi Penelitian dalam Setahun*

Gambar 4.10 menunjukkan bahwa pola sebaran konsentrasi NO<sub>2</sub> di lokasi penelitian berbeda-beda menurut lokasi. Secara keseluruhan, wilayah yang memiliki konsentrasi NO<sub>2</sub> tertinggi selama 12 bulan berada di titik lokasi Kapasa Baru. Konsentrasi tertinggi berada di titik lokasi Kapasa Baru pada bulan Januari yakni sebesar 28,64 µg/m<sup>3</sup>, dan konsentrasi terendah berada di titik lokasi Kapasa Raya pada bulan Oktober yakni 12,68 µg/m<sup>3</sup>.

## 7. Validasi Model

Validasi model dilakukan untuk membandingkan model yang dibangun untuk variabel-variabel kunci dapat mewakili dan merepresentasikan kondisi nyatanya. Representasi model menunjukkan bahwa model tersebut dapat diterima untuk digunakan. Tapi bukan berarti menjadi kebenaran mutlak pada sistem yang

dimodelkan. Metode validasi yang digunakan yakni metode kotak putih (*white box validation*) yang dilakukan dengan mengamati cara kerja interval model simulasi, seperti logika sistem dan input distribusi.

a. Uji struktur model

Uji struktur model memiliki tujuan untuk melihat apakah struktur model sudah sesuai dengan sistem nyata (kondisi real). Pengujian struktur model dalam penelitian ini dilakukan dengan studi literatur untuk memahami konsep maupun kondisi aktual dari model dispersi Gaussian secara umum. Peneliti melakukan penelitian langsung ke lapangan untuk membandingkan dengan kondisi lapangan (kondisi real).

Model dispersi Gaussian digunakan untuk melihat tingkat konsentrasi  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_2$  di beberapa titik lokasi yang dihasilkan dari aktivitas cerobong industri di Kawasan Industri Kota Makassar. Variabel kualitas udara ambien menjadi variabel yang diukur di lokasi penelitian. Selain itu, faktor meteorologi meliputi suhu udara, arah dan kecepatan angin juga diukur di lapangan untuk digunakan dalam model. Karena itu, model sudah valid secara kualitatif.

b. Uji parameter model

Uji parameter model memiliki tujuan untuk menguji nilai parameter dalam model secara sederhana. Uji dapat dilakukan dengan melihat dua variabel yang saling berhubungan, yaitu

membandingkan logika aktual dengan hasil simulasi. Hasil simulasi dikatakan baik bila perilaku yang ada sama dengan logika aktual.

Variabel yang diuji adalah kecepatan angin di ketinggian cerobong dan emisi yang dihasilkan berdasarkan jarak titik lokasi terhadap sumber pencemar. Logikanya, apabila jarak titik lokasi terhadap sumber pencemar dekat, semakin tinggi kecepatan angin, maka semakin rendah emisi yang dihasilkan, dengan kata lain terjadi hubungan yang berbanding terbalik. Logika ini disimulasikan pada Gambar 4.11.



**Gambar 4.11 Uji Parameter Emisi dengan Kecepatan Angin pada Lokasi yang Dekat dengan Sumber Emisi**

## 8. Simulasi Model

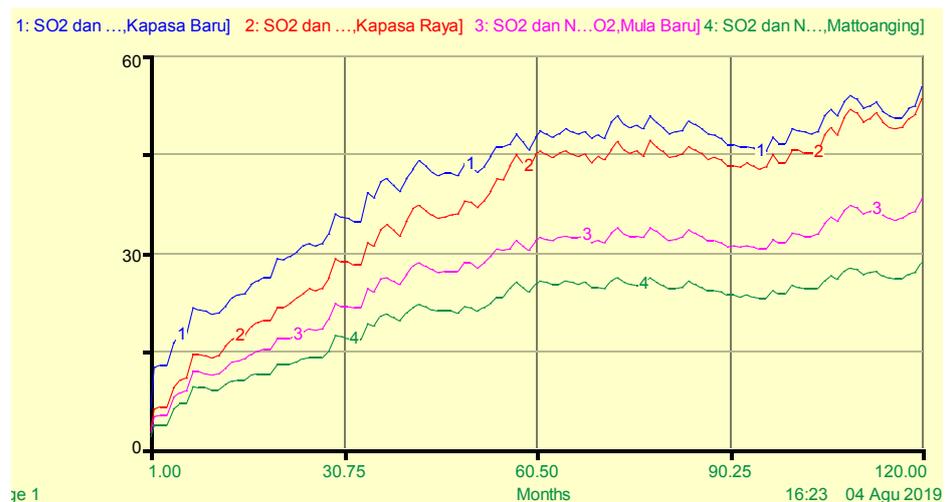
Simulasi bertujuan untuk melihat bagaimana konsentrasi  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_2$  pada titik lokasi penelitian, baik sebelum perlakuan maupun setelah perlakuan. Skenario dilakukan untuk mengetahui efektivitasnya dalam menurunkan konsentrasi  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_2$  di titik lokasi penelitian. Simulasi dilakukan dalam 4 (empat) jenis simulasi yaitu, simulasi kondisi eksisting (tanpa skenario), simulasi skenario

penambahan tinggi cerobong, simulasi skenario penyediaan ruang terbuka hijau (RTH), serta simulasi skenario gabungan antara penambahan tinggi cerobong dan penyediaan RTH. Adapun estimasi konsentrasi  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_2$  pada 10 tahun (2019 – 2028) berdasarkan hasil simulasi model adalah sebagai berikut:

a. Parameter Sulfur Dioksida ( $\text{SO}_2$ )

1) Simulasi I

Parameter  $\text{SO}_2$  yang diperoleh dari data cerobong beberapa perusahaan 5 tahun terakhir kemudian dimodelkan untuk mengestimasi besaran konsentrasi  $\text{SO}_2$  beberapa tahun yang akan datang. Simulasi I adalah simulasi tanpa adanya skenario (*eksisting*). Data hasil simulasi konsentrasi  $\text{SO}_2$  yang diperoleh sampai 10 tahun yang akan datang (2019 – 2028) ditunjukkan pada Gambar 4.12

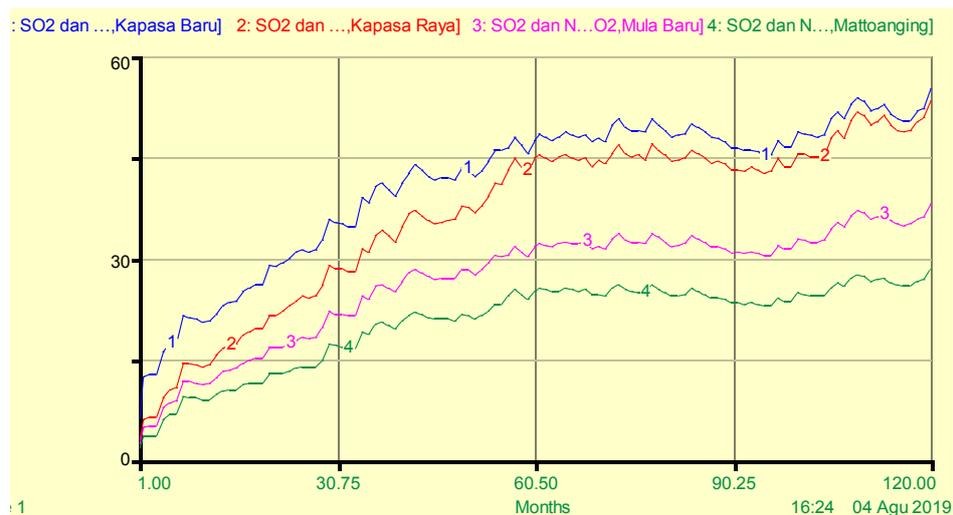


**Gambar 4.12 Hasil Simulasi Konsentrasi  $\text{SO}_2$  di Lokasi Penelitian pada Kondisi Eksisting Tahun 2019 – 2028**

Gambar 4.12 menunjukkan bahwa estimasi konsentrasi  $\text{SO}_2$  tertinggi berada pada lokasi Kapasa Baru. Setelah 10 tahun, estimasi konsentrasi  $\text{SO}_2$  tertinggi masih di wilayah Kapasa Baru. Dari gambar 4.12 juga diketahui bahwa konsentrasi  $\text{SO}_2$  mengalami peningkatan dari tahun ke tahun, meskipun pada bulan tertentu ada penurunan konsentrasi  $\text{SO}_2$ .

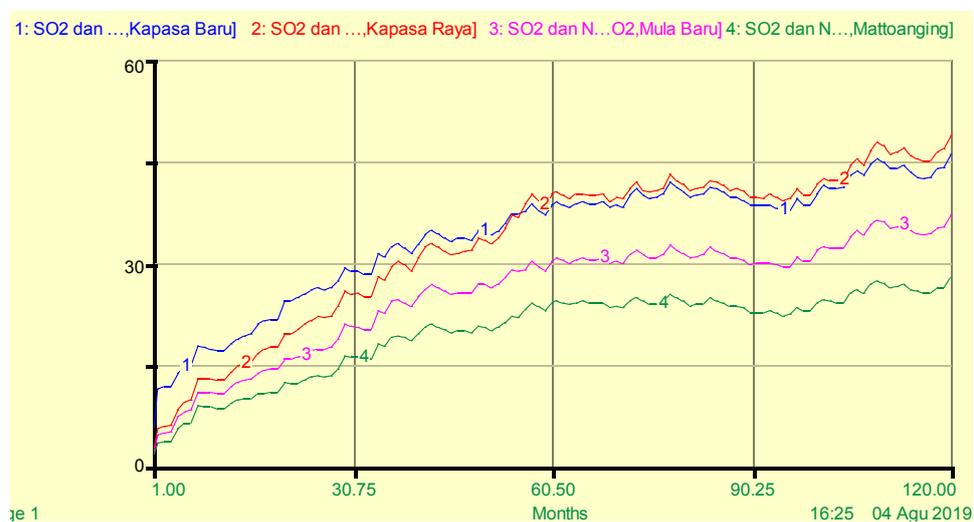
## 2) Simulasi II

Simulasi II adalah simulasi dengan skenario penambahan tinggi cerobong. Dalam simulasi ini, terdapat dua skenario yang dilakukan yakni penambahan tinggi cerobong kategori sedang, yakni 30 meter, dan penambahan tinggi cerobong maksimal yakni menjadi 50 meter. Simulasi tinggi cerobong kategori sedang dilakukan pada tiga cerobong masih memiliki tinggi dibawah 30 meter. Hasil simulasi ditunjukkan oleh gambar 4.13.



**Gambar 4.13 Hasil Simulasi Konsentrasi  $\text{SO}_2$  di Lokasi Penelitian pada Kondisi Penambahan Tinggi Cerobong Sedang Tahun 2019 – 2028**

Gambar 4.13 menunjukkan bahwa setelah penambahan tinggi cerobong sedang menjadi 30 meter, tren penurunan konsentrasi  $\text{SO}_2$  belum maksimal. Hal ini dibuktikan dengan nilai konsentrasi yang ditunjukkan grafik diatas masih berada di range konsentrasi yang sama dengan kondisi *eksisting*. Skenario selanjutnya adalah penambahan tinggi cerobong menjadi 50 meter, estimasi konsentrasi  $\text{SO}_2$  ditunjukkan oleh gambar 4.14.



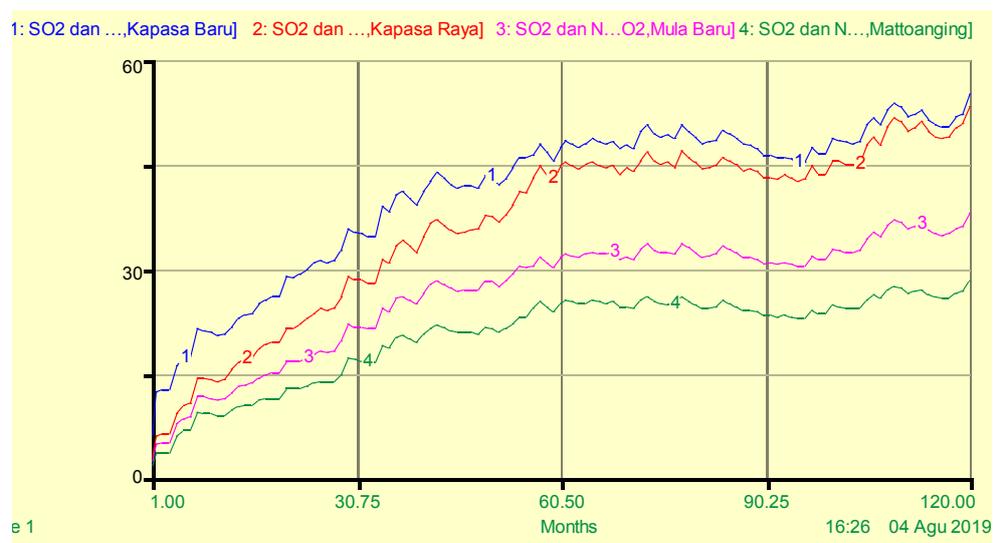
**Gambar 4.14 Hasil Simulasi Konsentrasi  $\text{SO}_2$  di Lokasi Penelitian pada Kondisi Penambahan Tinggi Cerobong Tinggi Tahun 2019 – 2028**

Gambar 4.13 menunjukkan bahwa setelah penambahan tinggi cerobong sedang menjadi 50 meter, terjadi tren penurunan konsentrasi  $\text{SO}_2$  di beberapa titik lokasi penelitian. Lokasi Kapasa Baru yang pada kondisi *eksisting* menjadi wilayah dengan konsentrasi  $\text{SO}_2$  tertinggi, namun dengan penambahan cerobong menjadi 50 meter, di tahun 2028 bukan lagi menjadi wilayah dengan konsentrasi  $\text{SO}_2$  tertinggi. Tampak pada grafik,

konsentrasi  $\text{SO}_2$  masih mengalami peningkatan dari tahun ke tahun di lokasi Kapasa Raya, Mula Baru, dan Mattoanging.

### 3) Simulasi III

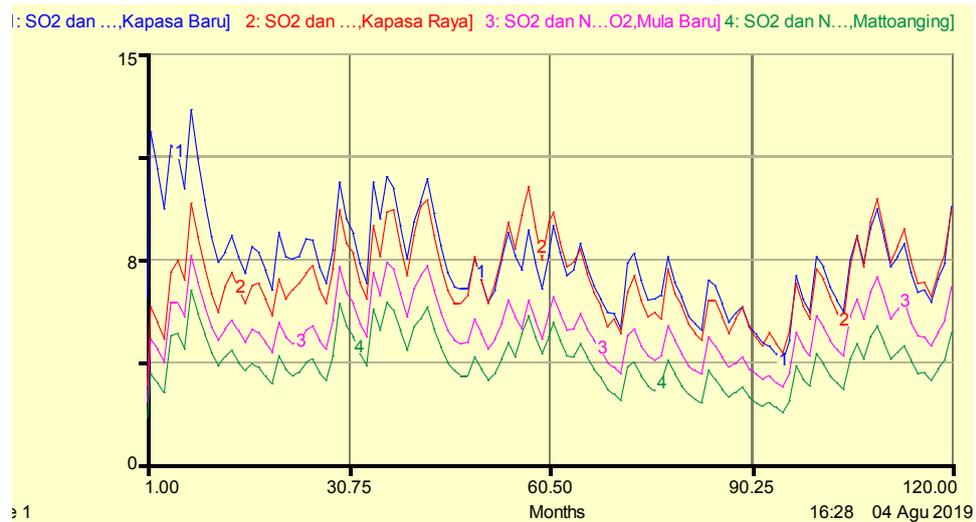
Simulasi III merupakan simulasi dengan skenario penyediaan ruang terbuka hijau. Ruang terbuka hijau yang diskenariokan adalah penanaman tanaman puring (*Codiaeum interruptum*) per luasan area perumahan. Estimasi konsentrasi  $\text{SO}_2$  setelah penanaman 1 tanaman puring (*Codiaeum interruptum*) pada masing-masing lokasi tahun 2019-2028 ditunjukkan pada gambar 4.15



**Gambar 4.15 Hasil Simulasi Konsentrasi  $\text{SO}_2$  di Lokasi Penelitian pada Kondisi Penyediaan Ruang Terbuka Hijau dengan 1 Tanaman Puring Tahun 2019 – 2028**

Gambar 4.15 menunjukkan bahwa setelah simulasi penyediaan ruang terbuka hijau melalui penanaman masing-masing 1 tanaman puring (*Codiaeum interruptum*) per titik lokasi, belum menunjukkan penurunan yang signifikan di empat titik lokasi

pemukiman. Skenario dilanjutkan dengan penanaman 5 tanaman puring (*Codiaeum interruptum*) per luasan area perumahan. Estimasi konsentrasi  $\text{SO}_2$  tahun 2019-2028 ditunjukkan oleh gambar 4.16.



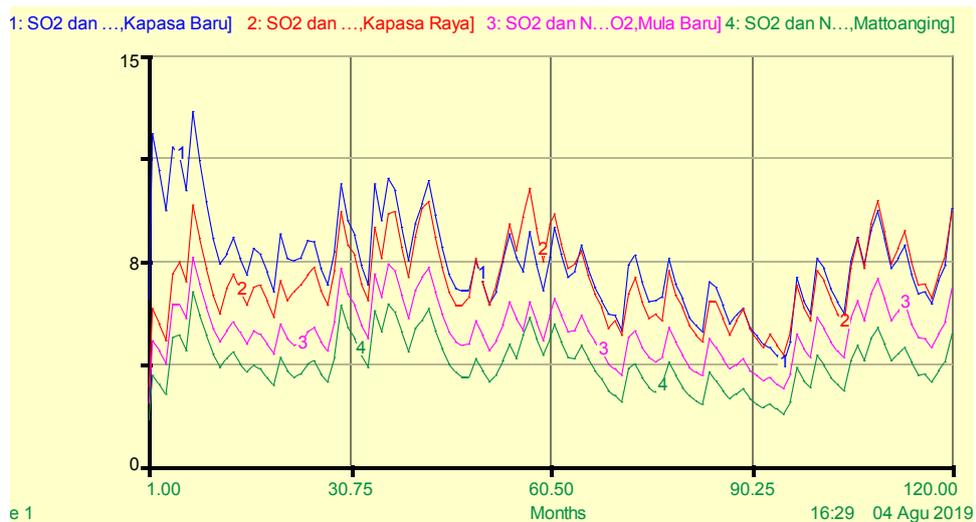
**Gambar 4.16 Hasil Simulasi Konsentrasi  $\text{SO}_2$  di Lokasi Penelitian pada Kondisi Penyediaan Ruang Terbuka Hijau Privat dengan 5 Tanaman Puring Tahun 2019 – 2028**

Gambar 4.16 menunjukkan bahwa setelah simulasi penyediaan Ruang Terbuka Hijau berupa penanaman 5 tanaman Puring per luasan area perumahan, konsentrasi  $\text{SO}_2$  tampak mengalami penurunan di empat titik lokasi. Grafik tersebut juga menunjukkan bahwa polutan di wilayah Kapasa Baru cenderung lebih rendah dibanding dengan wilayah lain.

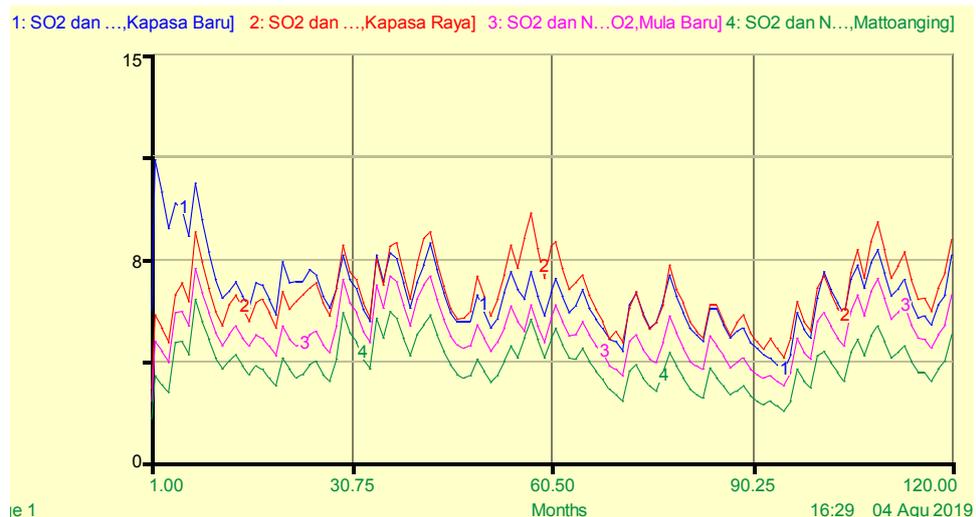
#### 4) Simulasi IV

Simulasi ke IV merupakan simulasi dengan skenario gabungan penambahan tinggi cerobong menjadi 50 meter dan 30

meter, serta penyediaan ruang terbuka hijau privat dengan 5 tanaman Puring per luasan wilayah pemukiman. Hasil simulasi konsentrasi  $\text{SO}_2$  yang diperoleh sampai 10 tahun yang akan datang (2019 – 2028) pada ditunjukkan pada Gambar 4.17 dan 4.18.



**Gambar 4.17 Hasil Simulasi Konsentrasi  $\text{SO}_2$  di Lokasi Penelitian pada Kondisi Penambahan Tinggi Cerobong menjadi 30 meter dan Penyediaan Ruang Terbuka Hijau Tahun 2019–2028**



**Gambar 4.18 Hasil Simulasi Konsentrasi  $\text{SO}_2$  di Lokasi Penelitian pada Kondisi Penambahan Tinggi Cerobong menjadi 50 meter dan Penyediaan Ruang Terbuka Hijau Tahun 2019 – 2028**

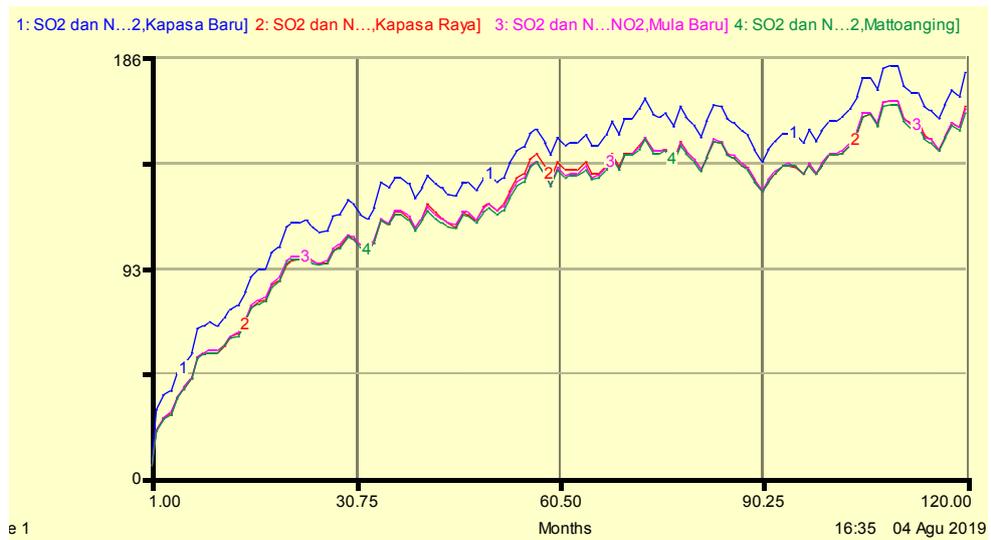
Gambar 4.17 menunjukkan bahwa setelah dilakukan penambahan tinggi cerobong menjadi 30 meter dan penanaman 5 tanaman Puring (*Codiaeum interruptum*) per luasan area pemukiman, semakin jauh lokasi pemukiman menunjukkan konsentrasi  $\text{SO}_2$  yang semakin besar. Wilayah Kapasa Baru yang paling dekat dengan lokasi cerobong mengalami penurunan konsentrasi  $\text{SO}_2$ .

Sementara gambar 4.18 menunjukkan bahwa setelah dilakukan penambahan tinggi cerobong menjadi 50 meter dan penanaman 5 tanaman Puring (*Codiaeum interruptum*) per luasan area pemukiman, konsentrasi  $\text{SO}_2$  di lokasi pemukiman yang dekat dengan cerobong (Kapasa Baru) mengalami penurunan. Namun, wilayah pemukiman Kapasa Raya mengalami peningkatan konsentrasi  $\text{SO}_2$ .

## b. Parameter Nitrogen Dioksida ( $\text{NO}_2$ )

### 1) Simulasi I

Parameter  $\text{NO}_2$  yang diperoleh dari data cerobong beberapa perusahaan 5 tahun terakhir kemudian dimodelkan untuk mengestimasi besaran konsentrasi  $\text{NO}_2$  beberapa tahun yang akan datang. Simulasi I adalah simulasi tanpa adanya skenario (*eksisting*). Data hasil simulasi konsentrasi  $\text{NO}_2$  yang diperoleh untuk 10 tahun (2019 – 2028) ditunjukkan pada Gambar 4.19

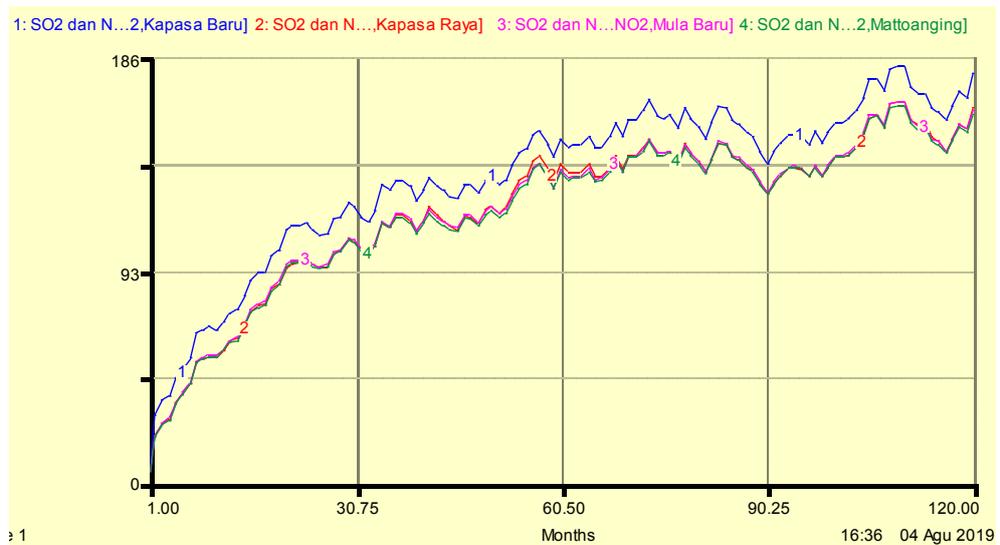


**Gambar 4.19 Hasil Simulasi Konsentrasi NO<sub>2</sub> di Lokasi Penelitian pada Kondisi Eksisting Tahun 2019 – 2028**

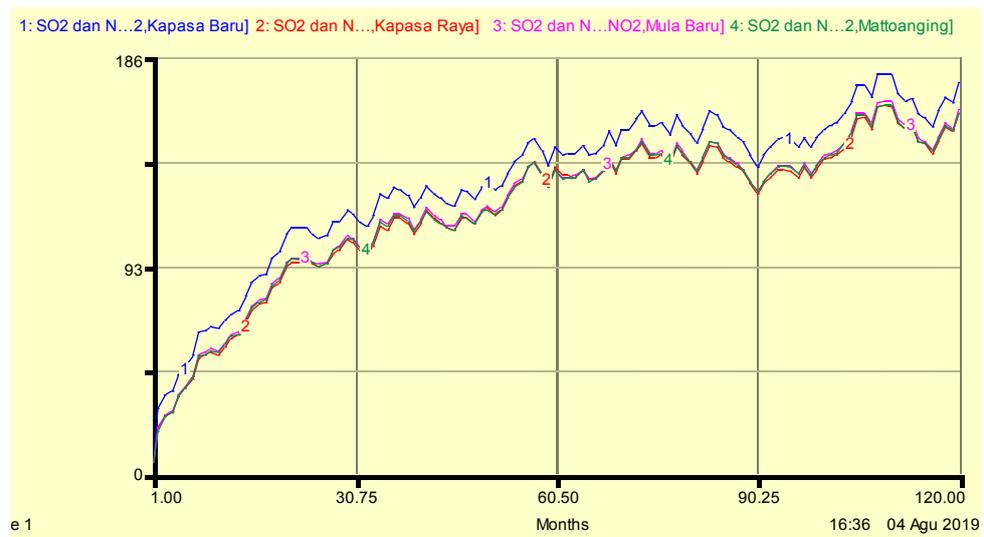
Gambar 4.19 menunjukkan bahwa estimasi konsentrasi NO<sub>2</sub> yang mengalami peningkatan dari tahun ke tahun pada 10 tahun (2019-2028). Estimasi konsentrasi polutan tertinggi berada pada lokasi Kapasa Baru.

## 2) Simulasi II

Simulasi II adalah simulasi dengan skenario penambahan tinggi cerobong. Dalam simulasi ini, terdapat dua skenario yang dilakukan yakni penambahan tinggi cerobong kategori sedang, yakni 30 meter, dan penambahan tinggi cerobong maksimal yakni menjadi 50 meter. Simulasi tinggi cerobong kategori sedang dilakukan pada tiga cerobong masih memiliki tinggi dibawah 30 meter. Hasil estimasi konsentrasi NO<sub>2</sub> ditunjukkan oleh gambar 4.20 dan gambar 4.21.



**Gambar 4.20 Hasil Simulasi Konsentrasi NO<sub>2</sub> di Lokasi Penelitian pada Kondisi Penambahan Tinggi Cerobong Sedang Tahun 2019 – 2028**



**Gambar 4.21 Hasil Simulasi Konsentrasi NO<sub>2</sub> di Lokasi Penelitian pada Kondisi Penambahan Tinggi Cerobong Tinggi Tahun 2019 – 2028**

Gambar 4.20 dan gambar 4.21 menunjukkan bahwa setelah penambahan tinggi cerobong sedang menjadi 30 meter dan penambahan tinggi cerobong tinggi 50 meter, tren penurunan konsentrasi NO<sub>2</sub> belum maksimal. Hal ini dibuktikan dengan nilai

konsentrasi yang ditunjukkan kedua grafik diatas masih berada di range konsentrasi yang sama dengan kondisi *eksisting*.

### 3) Simulasi III

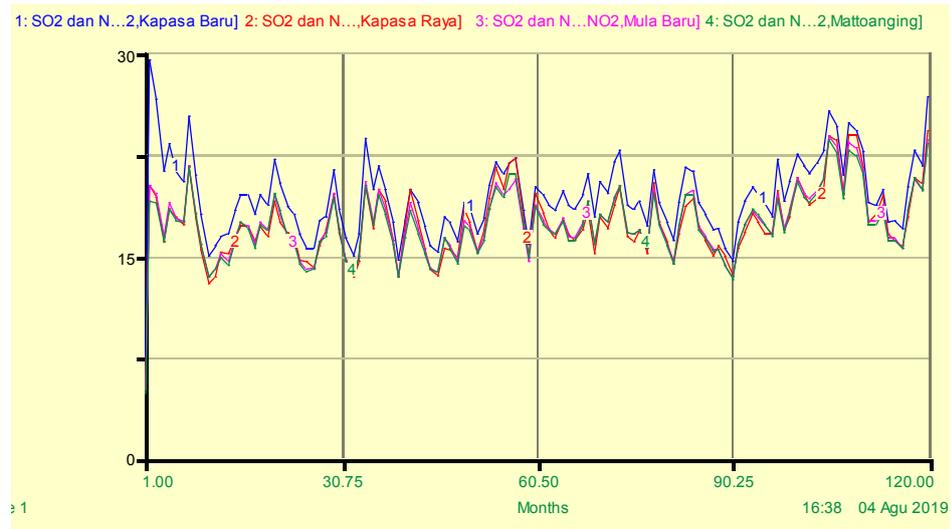
Simulasi III merupakan simulasi dengan skenario penyediaan ruang terbuka hijau. Ruang terbuka hijau yang diskenariokan adalah penanaman tanaman alkalipa merah (*Acalypa wilkesiana*) per luasan area perumahan. Estimasi konsentrasi  $\text{NO}_2$  setelah penanaman 1 tanaman alkalipa merah (*Acalypa wilkesiana*) pada masing-masing lokasi tahun 2019-2028 ditunjukkan pada gambar 4.22.



**Gambar 4.22 Hasil Simulasi Konsentrasi  $\text{NO}_2$  di Lokasi Penelitian pada Kondisi Penyediaan Ruang Terbuka Hijau dengan 1 Tanaman Puring Tahun 2019 – 2028**

Gambar 4.22 menunjukkan bahwa setelah simulasi penyediaan ruang terbuka hijau melalui penanaman masing-masing 1 tanaman alkalipa merah (*Acalypa wilkesiana*) per titik lokasi, belum menunjukkan penurunan yang signifikan di empat titik lokasi

pemukiman. Skenario dilanjutkan dengan penanaman 5 tanaman tanaman alkalipa merah (*Acalypa wilkesiana*) per luasan area perumahan. Estimasi konsentrasi NO<sub>2</sub> tahun 2019-2028 ditunjukkan oleh gambar 4.23.



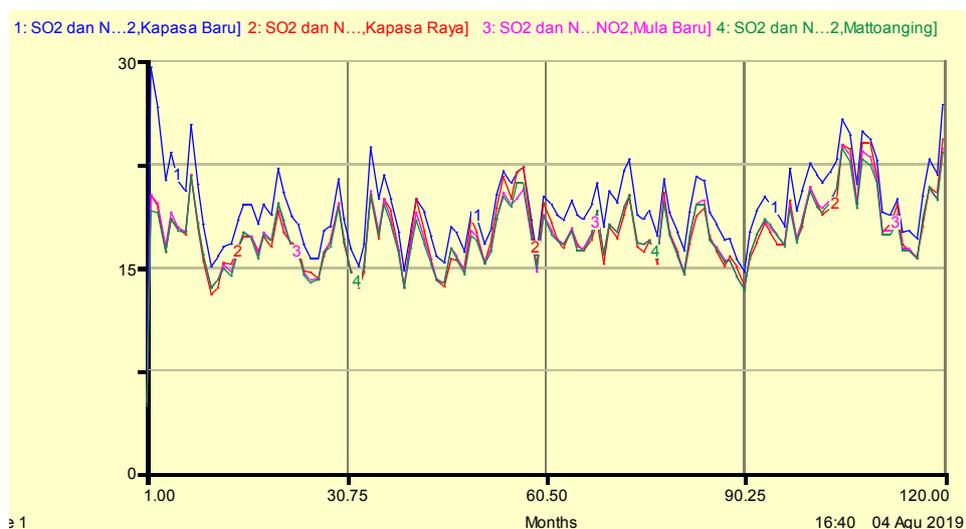
**Gambar 4.23 Hasil Simulasi Konsentrasi NO<sub>2</sub> di Lokasi Penelitian pada Kondisi Penyediaan Ruang Terbuka Hijau Privat dengan 5 Tanaman Alkalipa Merah (*Acalypa wilkesiana*) Per Luasan Wilayah Tahun 2019 – 2028**

Gambar 4.23 menunjukkan bahwa setelah simulasi penyediaan Ruang Terbuka Hijau berupa penanaman 5 tanaman Puring per luasan area perumahan, konsentrasi NO<sub>2</sub> tampak mengalami penurunan di empat titik lokasi. Grafik tersebut juga menunjukkan bahwa polutan di wilayah Kapasa Baru cenderung lebih rendah dibanding dengan wilayah lain.

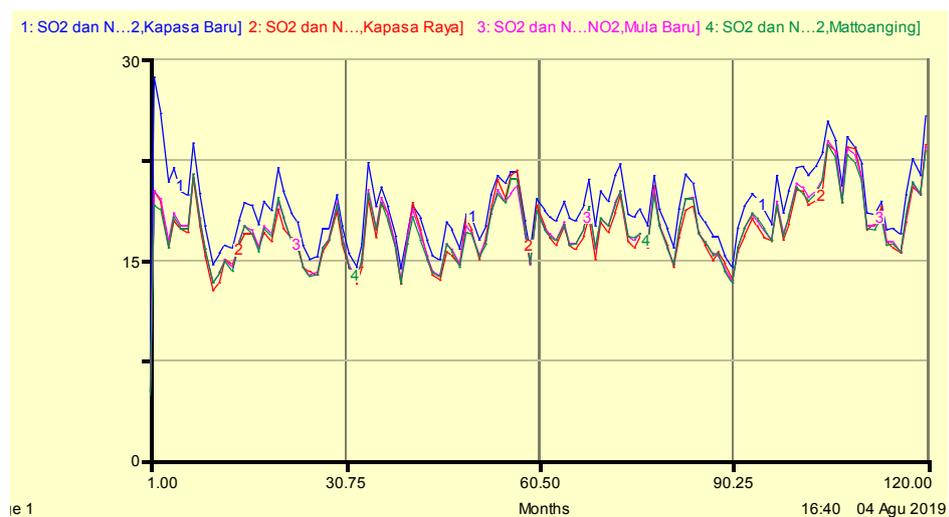
#### 4) Simulasi IV

Simulasi ke IV merupakan simulasi dengan skenario gabungan penambahan tinggi cerobong menjadi 50 meter dan 30

meter, serta penyediaan ruang terbuka hijau privat dengan 5 tanaman alkalipa merah (*Acalypha wilkesiana*) per luasan wilayah pemukiman. Hasil simulasi konsentrasi  $\text{NO}_2$  yang diperoleh sampai 10 tahun yang akan datang (2019 – 2028) pada ditunjukkan pada Gambar 4.24 dan 4.25.



**Gambar 4.24 Hasil Simulasi Konsentrasi  $\text{NO}_2$  di Lokasi Penelitian pada Kondisi Penambahan Tinggi Cerobong menjadi 30 meter dan Penyediaan Ruang Terbuka Hijau Tahun 2019–2028**



**Gambar 4.25 Hasil Simulasi Konsentrasi  $\text{NO}_2$  di Lokasi Penelitian pada Kondisi Penambahan Tinggi Cerobong menjadi 50 meter dan Penyediaan Ruang Terbuka Hijau Tahun 2019 – 2028**

Gambar 4.24 menunjukkan bahwa setelah dilakukan penambahan tinggi cerobong menjadi 30 meter dan penanaman 5 tanaman alkalipa merah (*Acalypha wilkesiana*) per luasan area pemukiman, semakin jauh lokasi pemukiman menunjukkan konsentrasi NO<sub>2</sub> yang semakin besar. Wilayah Kapasa Baru yang paling dekat dengan lokasi cerobong mengalami penurunan konsentrasi SO<sub>2</sub>.

Sementara gambar 4.25 menunjukkan bahwa setelah dilakukan penambahan tinggi cerobong menjadi 50 meter dan penanaman 5 tanaman alkalipa merah (*Acalypha wilkesiana*) per luasan area pemukiman, konsentrasi NO<sub>2</sub> di lokasi pemukiman yang dekat dengan cerobong (Kapasa Baru) juga mengalami penurunan. Kedua skenario gabungan ini menunjukkan konsentrasi NO<sub>2</sub> yang hampir sama di tiap-tiap lokasi.

## **B. Pembahasan**

Penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk mengestimasi konsentrasi gas SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub> untuk 10 tahun kedepan (2019-2028) di pemukiman sekitar Kawasan Industri Kota Makassar, sekaligus menemukan alternatif solusi atau strategi yang tepat untuk menekan laju peningkatan konsentrasi gas SO<sub>2</sub> dan gas NO<sub>2</sub> di Kawasan Industri Kota Makassar berdasarkan beberapa simulasi skenario yang telah dilakukan dengan memperhatikan beberapa faktor yang mempengaruhi SO<sub>2</sub> dan

NO<sub>2</sub>. Adapun faktor yang mempengaruhi konsentrasi SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub> adalah karakteristik sumber emisi yang meliputi tinggi cerobong, diameter cerobong, suhu cerobong, kecepatan alir gas buang, dan emisi yang dihasilkan, koefisien emisi dari transportasi, serta faktor dari meteorologi di titik lokasi penelitian. Emisi lain dari pembakaran rumah tangga tidak dimasukkan ke dalam model.

Beberapa faktor yang turut mempengaruhi konsentrasi SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub> seperti proses serapan oleh tanaman yang sudah ada di Kawasan Industri Makassar tidak dimasukkan dalam model dikarenakan keterbatasan data dan informasi. Penelitian ini menggunakan data sekunder dari berbagai instansi seperti data dari Dinas Lingkungan Hidup Provinsi Sulawesi Selatan berupa Laporan Pelaksanaan RKL-RPL Pengembangan perusahaan yang diteliti, data dari Laporan Hasil Pengujian Emisi Tidak Bergerak dari Balai Besar Pengembangan K3 Makassar, dan data meteorologi yang meliputi suhu udara, radiasi matahari, arah angin, dan kecepatan angin tahun 2014-2018 diperoleh dari stasiun BMKG terdekat yaitu Stasiun Klimatologi Paotere Makassar.

Penelitian ini menggunakan 4 (empat) simulasi skenario yakni, simulasi kondisi eksisting (tanpa skenario), simulasi skenario penambahan tinggi cerobong, simulasi skenario penyediaan Ruang Terbuka Hijau (RTH), serta simulasi skenario gabungan antara penambahan tinggi cerobong dan penyediaan Ruang Terbuka Hijau (RTH). Hasil dari

skenario ini disimulasikan per tahun sampai rentang waktu 10 tahun (2019-2028).

### **1. Konsentrasi Sulfur Dioksida dan Nitrogen Dioksida**

Untuk mengestimasi konsentrasi  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_2$  di Permukiman sekitar Kawasan Industri Makassar, maka perlu dilakukan pengambilan sampel kualitas udara ambien. Pengambilan sampel kualitas udara ambien dilakukan di 4 (empat) titik lokasi permukiman sekitar Kawasan Industri Makassar yaitu pada titik lokasi Jl. Kapasa Baru, Jl. Kapasa Raya, Jl. Mula Baru, Jl. Lr. Mattoanging dengan masing-masing pengukuran kualitas udara sesaat (60 menit) dalam 3 waktu (Pagi, Siang, Malam).

Menurut Peraturan Gubernur Sulawesi Selatan No. 69 Tahun 2010 Tentang Baku Mutu dan Kriteria Kerusakan Lingkungan Hidup, Baku mutu pengukuran kualitas udara sesaat (60 menit) untuk  $\text{SO}_2$  yakni sebesar  $900 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$  dan untuk  $\text{NO}_2$  sebesar  $400 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$ . Hasil pengukuran kualitas udara ambien yang dilakukan di 4 (empat) titik lokasi permukiman sekitar Kawasan Industri Makassar yaitu pada titik lokasi Jl. Kapasa Baru, Jl. Kapasa Raya, Jl. Mula Baru, Jl. Lr. Mattoanging keseluruhannya masih di bawah baku mutu yang ditetapkan.

Hasil pengukuran tersebut dipengaruhi oleh beberapa faktor yakni, pengukuran kualitas udara yang menggunakan metode pengambilan sesaat, dimana durasi waktu pengukuran selama 60 menit

dengan waktu pengambilan sampel udara pagi, siang, dan malam hari, sehingga apabila terjadi perubahan faktor meteorologi, misalnya suhu dan kecepatan angin, akan mempengaruhi konsentrasi yang dihasilkan.

Hasil pengukuran konsentrasi  $\text{SO}_2$  di wilayah Kapasa Baru yakni  $2,824 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$  pada pagi hari,  $2,927 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$  pada siang hari, dan  $1,229 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$  pada malam hari. Sementara untuk wilayah terjauh dari cerobong, hasil pengukuran konsentrasi  $\text{SO}_2$  di wilayah Mattoanging yakni  $0,32 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$  pada pagi hari,  $1,121 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$  pada siang hari, dan  $0,112 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$  pada malam hari.

Penelitian serupa pernah dilakukan Suryani (2010) yang memodelkan pencemaran pada wilayah industri PT. Semen Tonasa, menunjukkan bahwa jarak antara lokasi dengan cerobong menunjukkan pola sebaran  $\text{SO}_2$  yang berbeda. Semakin kecil jarak antara lokasi dengan cerobong, semakin besar polutannya, pada kecepatan angin  $1,54 \text{ m/s}$ . Hal ini juga sesuai dengan yang peneliti dapatkan bahwa lokasi terdekat dari cerobong memiliki konsentrasi  $\text{SO}_2$  yang lebih besar dibanding dengan lokasi lainnya.

Untuk konsentrasi  $\text{NO}_2$ , hasil pengukuran konsentrasi di wilayah Kapasa Baru menunjukkan nilai  $18,335$  pada pagi hari,  $17,231 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$  pada siang hari, dan  $17,322 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$  pada malam hari. Sementara untuk wilayah terjauh dari cerobong, hasil pengukuran konsentrasi  $\text{NO}_2$  di wilayah Mattoanging yakni  $16,997 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$  pada

pagi hari, 16,821  $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$  pada siang hari, dan 16,34  $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$  pada malam hari.

Dari hasil pengukuran tersebut, diketahui bahwa jauh tidaknya lokasi dari cerobong menunjukkan rentang konsentrasi  $\text{NO}_2$  yang tidak jauh berbeda. Terkait hal ini, Huang (2017) pernah melakukan penelitian dan hasilnya menunjukkan bahwa diantara 4 parameter kualitas udara,  $\text{NO}_2$  banyak berasal dari sumber emisi lain wilayah perkotaan dibandingkan dengan sumber emisi dari pabrik. Hal ini diprediksi akan semakin meningkat seiring dengan peningkatan jumlah penduduk.

Hal ini juga terkait dengan hasil penelitian lainnya di kawasan utara Kota Semarang yang menjelaskan bahwa kontribusi terbanyak  $\text{NO}_2$  dihasilkan oleh sumber transportasi yaitu sekitar 91,68 %, sektor industri sebesar 8,31 %, dan sisanya adalah sektor domestik yaitu sekitar 0,01 % (Hadiwidodo and Huboyo, 2006).

Penelitian oleh Hapsah (2013) di Kawasan Industri KIMA Makassar mengemukakan bahwa peningkatan pencemaran udara disebabkan oleh penambahan volume kendaraan, pertumbuhan industri, pertambahan jumlah penduduk di sekitar kawasan industri, dan besarnya penggunaan listrik.

## **2. Penerapan Skenario**

Pemodelan dispersi atmosfer memainkan peran penting untuk memprediksi perilaku polutan di udara. Pemodelan memungkinkan

untuk mengembangkan skenario, menguji teori dan memahami dampaknya dengan tingkat emisi yang berbeda. Misalnya, dampak modifikasi tertentu dalam operasi industri akan menghasilkan seberapa banyak perubahan tingkat pencemaran udara, dan sebagainya. Selanjutnya, tingkat emisi ini dapat dimasukkan ke dalam model, yang dapat mensimulasikan skenario pada kondisi riil sehingga tingkat polusi diukur untuk menentukan tindakan pencegahan yang perlu diadopsi (Sachdeva & Baksi, 2018).

Berdasarkan hasil temuan di lokasi penelitian, maka disusun skenario berdasarkan kondisi sehingga bisa diketahui efektivitas skenario dalam menekan laju peningkatan konsentrasi

#### a. Simulasi I

Simulasi I merupakan skenario pada kondisi eksisting. Kondisi tersebut adalah kondisi terkini tanpa adanya upaya perbaikan kualitas udara, sehingga konsentrasi SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub> meningkat dari tahun ke tahun.

Hasil simulasi I menunjukkan bahwa dalam jangka waktu 10 tahun yang akan datang (2019 – 2028), konsentrasi SO<sub>2</sub> adalah sebesar 51,99 µg/m<sup>3</sup> pada Bulan Desember 2028 di wilayah Kapasa Baru. Konsentrasi NO<sub>2</sub> adalah sebesar 170,58 µg/m<sup>3</sup> pada Bulan Desember 2028, dengan asumsi bahwa jumlah waktu operasional cerobong sama tiap tahunnya.

Peningkatan konsentrasi pencemar udara di lingkungan biasanya bukan hasil dari peningkatan mendadak dalam emisi, melainkan dari kondisi meteorologi. Kombinasi variabel meteorologi yang penting memengaruhi baik secara langsung maupun tidak langsung emisi, transportasi, formasi, dan pengendapan polutan udara adalah suhu, kelembaban, radiasi matahari, curah hujan, kecepatan dan arah angin, stabilitas atmosfer serta tinggi kepulan (Rahmadhani, 2017).

b. Simulasi II

Simulasi II merupakan skenario terkait dengan penambahan tinggi cerobong. Tinggi cerobong berpengaruh terhadap nilai tinggi efektif cerobong. Semakin tinggi cerobong maka sebaran emisi akan lebih meluas karena ketinggian cerobong mempengaruhi kecepatan angin pada sepanjang kepulan (Lazaridis, 2011). Skenario penambahan tinggi cerobong disimulasikan pada penambahan tinggi cerobong menjadi 30 meter dan 50 meter.

Penambahan tinggi cerobong menjadi 30 meter didasari pada Keputusan Kepala Bappedal Nomor 205 Tahun 1996 yang masih menjadi landasan pembuatan cerobong yakni cerobong disarankan memiliki tinggi 2-2,5 kali tinggi bangunan tertinggi di sekitarnya, dengan asumsi bahwa tinggi bangunan tertinggi di sekitar kawasan Industri Makassar mencapai 15 meter (bangunan

rukan atau ruko berlantai 3). Sementara pemilihan 50 meter merupakan tinggi dari cerobong tertinggi diantara 4 perusahaan yang menjadi objek penelitian ini.

Hasil simulasi II skenario tinggi cerobong 30 meter menunjukkan bahwa dalam jangka waktu 10 tahun yang akan datang, konsentrasi  $\text{SO}_2$  untuk wilayah Kapasa Baru adalah sebesar  $51,99 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , sementara untuk wilayah Kapasa Raya, konsentrasi  $\text{SO}_2$  sebesar  $50,67 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , di wilayah Mula baru sebesar  $35,62 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , dan di wilayah Mattoanging sebesar  $26,65 \mu\text{g}/\text{m}^3$  pada Desember 2028. Jika dibandingkan dengan hasil simulasi I, hasil estimasi konsentrasi  $\text{SO}_2$  dengan penambahan tinggi cerobong 30 meter belum dapat menurunkan konsentrasi  $\text{SO}_2$  di keempat lokasi.

Untuk parameter  $\text{NO}_2$  konsentrasi untuk wilayah Kapasa Baru, Kapasa Raya, Mula Baru dan Mattoanging masing-masing sebesar  $170,68 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $155,37 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $155,14 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , dan  $153,97 \mu\text{g}/\text{m}^3$  pada Desember 2028. Jika dibandingkan dengan hasil simulasi I, simulasi II skenario tinggi cerobong 30 meter juga belum dapat menurunkan konsentrasi  $\text{NO}_2$ .

Sementara untuk penambahan tinggi cerobong 50 meter, konsentrasi  $\text{SO}_2$  untuk wilayah Kapasa Baru, Kapasa Raya, Mula Baru dan Mattoanging masing-masing sebesar  $42,59 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $45,64 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $34,08 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , dan  $25,26 \mu\text{g}/\text{m}^3$  pada Desember 2028. Untuk

parameter NO<sub>2</sub> konsentrasi untuk wilayah Kapasa Baru, Kapasa Raya, Mula Baru dan Mattoanging masing-masing sebesar 88,67 µg/m<sup>3</sup>, 152,59 µg/m<sup>3</sup>, 154,30 µg/m<sup>3</sup>, dan 153,44 µg/m<sup>3</sup> pada Desember 2028. Jika dibandingkan dengan hasil simulasi I, simulasi II skenario tinggi cerobong 50 meter sudah dapat menurunkan konsentrasi SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub>. Hanya saja penurunannya belum maksimal.

Penurunan konsentrasi tertinggi berada di titik-titik lokasi yang berada dekat dari sumber emisi. Hal itu dikarenakan penambahan tinggi cerobong menyebabkan polutan terbawa oleh angin lebih jauh. Hasil penelitian juga pernah dilakukan oleh Dewi (2018) yang melakukan simulasi penambahan tinggi cerobong PT. Holcim Tbk. Hasil simulasi tersebut menunjukkan bahwa penambahan tinggi cerobong dapat menurunkan konsentrasi polutan hingga 57% di sekitar industri.

c. Simulasi III

Simulasi III menekankan skenario penyediaan Ruang Terbuka Hijau (RTH) privat dengan sasaran pemukiman penduduk di sekitar kawasan KIMA, dengan asumsi tanaman yang sudah ada belum mampu mereduksi secara maksimal konsentrasi SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub> yang ada. Simulasi dilakukan dengan skenario penanaman masing-masing 5 tanaman per luasan area pemukiman.

Setelah dilakukan simulasi III, konsentrasi SO<sub>2</sub> untuk wilayah Kapasa Baru, Kapasa Raya, dan Mula Baru, dan Mattoanging masing-masing menunjukkan nilai 7,96 µg/m<sup>3</sup>, 7,52 µg/m<sup>3</sup>, 5,43 µg/m<sup>3</sup>, dan 4,07 µg/m<sup>3</sup> pada bulan Desember 2028. Bila dibandingkan dengan simulasi I, pada simulasi III ini, konsentrasi SO<sub>2</sub> mengalami penurunan hampir 9 kali lipat.

Sementara itu untuk konsentrasi NO<sub>2</sub>, untuk wilayah Kapasa Baru, Kapasa Raya, dan Mula Baru, dan Mattoanging masing-masing menunjukkan nilai 23,50 µg/m<sup>3</sup>, 20,68 µg/m<sup>3</sup>, 20,61 µg/m<sup>3</sup>, dan 20,53 µg/m<sup>3</sup> pada bulan Desember 2028. Hasil ini menunjukkan bahwa terdapat penurunan hampir 10 kali lipat bila dibandingkan dengan simulasi I.

Berbagai strategi yang ada telah dikembangkan untuk memantau kontribusi industri terhadap pencemaran udara lokal dalam menentukan upaya pengendalian pencemaran udara. Salah satu cara alami terbaik adalah menggunakan tanaman untuk membersihkan atmosfer dengan menyediakan area daun yang sangat besar untuk penyerapan dan akumulasi polutan udara di lingkungan dengan berbagai tingkat. Tanaman bertindak sebagai akseptor awal pencemaran udara dengan kinerja yang lebih baik berasal dari spesies toleran polusi (Mahecha et al., 2013, Patel & Kumar, 2018).

Peran spesies tanaman dalam penangkapan dan penghilangan polutan udara telah dilaporkan secara luas. Vailshery et al (2013) melaporkan penurunan konsentrasi SO<sub>2</sub> hingga 65% di jalan-jalan dengan pohon dibandingkan dengan jalan yang tidak memiliki pohon di kota tropis. Selmi et al (2016) perkiraan penghapusan 14 ton NO<sub>2</sub>, 56 ton O<sub>3</sub>, 12 ton PM<sub>10</sub>, 5 ton PM<sub>2.5</sub> dan 1 ton SO<sub>2</sub> oleh pohon-pohon perkotaan di kota Strasbourg, Prancis.

Penelitian oleh Kusminingrum (2016) mengemukakan bahwa tanaman yang memiliki efektifitas menurunkan polutan SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub> merupakan tanaman yang masuk kategori tanaman semak, yang dalam hal ini banyak digunakan sebagai tanaman hias. Dalam penelitian ini, tanaman yang digunakan sebagai simulasi untuk menurunkan polutan SO<sub>2</sub> adalah tanaman puring (*Codiaeum interruptum*), dan untuk menurunkan NO<sub>2</sub> digunakan tanaman alkalipa merah (*Acalypha wilkesiana*).

Hal ini juga sesuai dengan penelitian oleh Santoso (2012) yang menyebutkan bahwa 5 buah tanaman puring dapat mereduksi 0,001 ppm SO<sub>2</sub> setelah 7 jam, dan 5 buah tanaman alkalipa merah dapat menurunkan konsentrasi NO<sub>2</sub> sebesar 0,2 ppm setelah paparan selama 7 jam.

d. Simulasi IV

Simulasi IV merupakan gabungan antara simulasi II dan simulasi III, dimana skenarioya menggabungkan antara

penambahan tinggi cerobong menjadi 30 meter dan 50 meter serta penyediaan ruang terbuka hijau privat melalui penanaman masing-masing 5 pohon puring (*Cordia allamanda*) dan alkalipa merah (*Acalypha wilkesiana*) per luasan pemukiman penduduk di sekitar Kawasan Industri Makassar.

Setelah simulasi IV untuk ketinggian cerobong 30 meter dilakukan, konsentrasi  $\text{SO}_2$  untuk masing-masing wilayah Kapasa Baru, Kapasa Raya, Mula Baru, dan Mattoanging masing-masing sebesar  $7,96 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $7,52 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $5,43 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , dan  $4,07 \mu\text{g}/\text{m}^3$  pada bulan Desember 2028. Apabila dibandingkan dengan simulasi I, terdapat penurunan hampir 10 kali lipat konsentrasi  $\text{SO}_2$  di bulan Desember 2028. Untuk konsentrasi  $\text{NO}_2$ , di Desember 2028, estimasi  $\text{NO}_2$  turun menjadi  $23,50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  untuk wilayah Kapasa Baru. Sementara untuk wilayah Kapasa Raya, Mula Baru, dan Mattoanging masing-masing  $20,68 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $20,61 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , dan  $20,53 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Konsentrasi  $\text{NO}_2$  turun lebih dari 8 kali lipat dibandingkan simulasi I.

Untuk simulasi IV dengan ketinggian cerobong 50 meter dan penyediaan Ruang Terbuka Hijau privat menunjukkan hasil konsentrasi  $\text{SO}_2$  untuk masing-masing wilayah Kapasa Baru, Kapasa Raya, Mula Baru, dan Mattoanging masing-masing sebesar  $6,40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $6,65 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $5,16 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , dan  $3,89 \mu\text{g}/\text{m}^3$  pada bulan Desember 2028. Apabila dibandingkan dengan simulasi I, terdapat

penurunan hampir 10 kali lipat konsentrasi  $\text{SO}_2$  di bulan Desember 2028.

Untuk konsentrasi  $\text{NO}_2$ , di Desember 2028, estimasi  $\text{NO}_2$  turun menjadi  $22,65 \mu\text{g}/\text{m}^3$  untuk wilayah Kapasa Baru. Sementara untuk wilayah Kapasa Raya, Mula Baru, dan Mattoanging masing-masing  $20,11 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $20,40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , dan  $20,39 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Konsentrasi  $\text{NO}_2$  turun lebih dari 8 kali lipat dibandingkan simulasi I.

Selisih penurunan konsentrasi  $\text{NO}_2$  untuk tinggi 30 meter dan 50 meter yang dikombinasikan dengan penyediaan ruang terbuka hijau publik tidak jauh berbeda. Namun secara umum, skenario paling baik dalam menurunkan konsentrasi  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_2$  adalah skenario gabungan antara penambahan tinggi cerobong 50 meter dan penyediaan ruang terbuka hijau privat.

Penambahan ketinggian cerobong akan memperbesar volume pencampuran polutan dengan udara ambien sehingga konsentrasi polutan yang sampai di permukaan lebih rendah dibandingkan cerobong dengan ketinggian yang lebih rendah (Dewi, 2018), sementara penyediaan RTH akan menyerap polutan yang ada dan memenuhi kebutuhan oksigen di sekitar kawasan industri (Hapsah, 2013).

Hal ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Anwar (2018) yang melakukan penelitian model dinamis polutan CO dan TSP mengemukakan bahwa pada kondisi skenario

gabungan, rata-rata penurunan konsentrasi CO sebesar 1101,43  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  per tahunnya dan konsentrasi TSP sebesar 240,48  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  per tahunnya. Efektivitas penurunan total konsentrasi CO sebesar 34,45% dan total konsentrasi TSP sebesar 27,74%. Skenario gabungan merupakan skenario terbaik dalam menurunkan total konsentrasi CO dan TSP.

Penelitian model dinamis yang dilakukan oleh Yuddin (2018) di kawasan Industri juga menunjukkan bahwa dalam pengembangan model dinamis untuk memilih kebijakan penurunan konsentrasi polutan, khususnya  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_2$  skenario yang paling baik adalah skenario gabungan antara penambahan tinggi cerobong dan penyediaan ruang terbuka hijau.

### **3. Pengaruh Polutan Bagi Kesehatan Manusia**

Polutan udara diketahui memiliki dampak terhadap kesehatan manusia, misalnya karbon monoksida (CO), nitrogen dioksida ( $\text{NO}_2$ ), sulfur dioksida ( $\text{SO}_2$ ), ozon ( $\text{O}_3$ ), *particulate matters* (TSP dan PM), dan timbal (Pb) (Ali & Athar, 2010, Habibi et al., 2017). Seorang dewasa rata-rata menghirup udara sekitar 11,4 $\text{m}^3$  udara setiap hari. Oleh karena itu, udara dapat menjadi berbahaya bagi kelangsungan hidup manusia apabila udara mengandung polutan melebihi batas yang telah ditetapkan (Mallongi, 2015).

$\text{SO}_2$  adalah gas beracun yang tidak berwarna dan berdampak buruk pada manusia, hewan dan tumbuhan. Gas  $\text{SO}_2$  mempengaruhi

kesehatan manusia dengan menyebabkan iritasi mata parah dan gangguan saluran pernafasan pada tingkat 2,5 ppm. SO<sub>2</sub> yang terserap oleh sistem hidung dapat menimbulkan pembengkakan dan tersendatnya sekresi lendir dimana sangat sensitif terhadap penderita penyakit kronis. Peningkatan SO<sub>2</sub> di atmosfer menyebabkan kanker paru-paru, gejala bronkitis, emfisema dan penyakit paru-paru lainnya. Hal ini dianggap sebagai polutan udara tunggal yang paling serius menyebabkan bahaya kesehatan karena mengganggu sistem pernapasan (Attri & Kalia, 2017).

Studi klinis manusia secara konsisten menunjukkan morbiditas pernapasan di antara penderita asma yang berolahraga setelah paparan puncak (5 – 10 menit) pada konsentrasi SO<sub>2</sub> sama dengan 0,4 ppm, dengan efek pernapasan yang terjadi pada konsentrasi serendah 0,2 ppm pada beberapa penderita asma (Neidell, 2012). Selain itu, diperkirakan sekitar 4,56% kasus rawat inap karena infark miokard akut yang diakibatkan dengan dampak tertinggi dari pemaparan SO<sub>2</sub> Urmia, Iran (Kermani et al., 2016).

NO<sub>2</sub> memiliki efek iritasi pada selaput lendir. Dosis tinggi NO<sub>2</sub> menyebabkan bronkitis dan masalah pernapasan. Misalnya, paparan NO<sub>2</sub> sebesar 150 – 200 ppm menyebabkan "*Bronchiolitis Fibrosa Obliterans*", penyakit berbahaya yang terjadi dalam 3 sampai 5 minggu setelah pemaparan sedangkan paparan NO<sub>2</sub> sebesar 500 –

600 ppm selama 2 sampai 10 hari dapat mengakibatkan kematian (Attri & Kalia, 2017).

Studi epidemiologi telah mengaitkan efek kesehatan yang buruk dengan polusi udara. Peningkatan rata-rata konsentrasi  $O_3$  dan  $NO_2$   $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  selama 2 hari sebelumnya dikaitkan dengan 0,81% dan 1,95% peningkatan mortalitas total, dengan efek perkiraan yang lebih kuat untuk mortalitas kardiovaskular dan pernapasan (Tao et al., 2012).

Sebuah studi menyelidiki paparan jangka pendek pada  $NO_2$  di udara ambien dikaitkan dengan peningkatan risiko kematian pada orang yang lebih tua. Berdasarkan *China Air Pollution and Health Effects Study* (CAPES), konsentrasi harian rata-rata  $NO_2$  pada 17 kota di Cina berkisar dari  $26 \mu\text{g}/\text{m}^3$  hingga  $67 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Hasil analisis menunjukkan hubungan linier peningkatan rata-rata  $NO_2$   $10\mu\text{g}/\text{m}^3$  dalam dua hari bergerak terhadap 1,63% peningkatan total kematian, 1,80% kematian akibat kardiovaskular, dan 2.52% kematian akibat gangguan pernapasan (Chen et al., 2012)

### **C. Keterbatasan Penelitian**

Berdasarkan pengamatan pada saat penelitian, terdapat keterbatasan yang dimiliki, yaitu sebagai berikut:

1. Penelitian ini hanya mengukur emisi di 4 perusahaan yang memiliki cerobong, tidak dilakukan pada semua perusahaan yang memiliki cerobong di kawasan industri Makassar. Penelitian ini pun hanya

mengukur konsentrasi polutan di beberapa titik (lokasi) pemukiman, tidak secara keseluruhan. Konsentrasi pada kondisi riil mungkin berbeda dikarenakan akumulasi beberapa sumber yang tidak diperhitungkan dalam penelitian ini.

2. Terdapat beberapa faktor yang mempengaruhi tingkat konsentrasi  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_2$  yang tidak dimasukkan ke dalam model, seperti data terkait peningkatan jumlah kendaraan, rata-rata penggunaan kendaraan di Kawasan Industri Makassar, data jumlah polutan yang terserap ke tanah, dan jumlah polutan yang terdispersi oleh angin karena keterbatasan data dan informasi.
3. Asumsi persebaran polutan dari aspek meteorologi, misalnya efek ketika hujan, atau perbedaan efek ketika musim hujan dan musim kemarau tidak dimasukkan di dalam model.

## **BAB V**

### **PENUTUP**

#### **A. Kesimpulan**

1. Pola sebaran konsentrasi  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_2$  selama setahun di wilayah permukiman sekitar kawasan industri Makassar (PT.KIMA) bervariasi di tiap lokasi yang dipengaruhi faktor meteorologi. Faktor meteorologi tersebut mencakup suhu udara, radiasi matahari, arah dan kecepatan angin. Jarak dari sumber pencemar mempengaruhi besaran konsentrasi di tiap lokasi, sehingga memunculkan perbedaan konsentrasi di masing-masing lokasi permukiman penduduk.
2. Estimasi konsentrasi  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_2$  pada 4 (empat) titik di permukiman sekitar kawasan industri Makassar (PT. KIMA) selama 10 tahun yang akan datang dengan skenario pertama yaitu kondisi tanpa ada upaya dalam menekan laju konsentrasi emisi, terjadi peningkatan konsentrasi  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_2$  dari tahun ke tahun.
3. Estimasi konsentrasi  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_2$  pada 4 (empat) titik di permukiman sekitar kawasan industri Makassar (PT. KIMA) selama 10 tahun yang akan datang dengan skenario penambahan tinggi cerobong menjadi 30 meter dan 50 meter. Dengan penambahan tinggi cerobong menjadi 50 meter, terjadi penurunan  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_2$ , namun belum maksimal.
4. Estimasi konsentrasi  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_2$  pada 4 (empat) titik di permukiman sekitar kawasan industri Makassar (PT. KIMA) selama 10

tahun yang akan datang dengan skenario ketiga yaitu penyediaan ruang terbuka hijau (RTH). Dengan penanaman tanaman puring (*Codiaeum interruptum*), dan tanaman alkalipa merah (*Acalypha wilkesiana*) per luasan pemukiman, terdapat penurunan konsentrasi  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_2$  8-9 kali lipat.

5. Estimasi konsentrasi  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_2$  pada 4 (empat) titik di permukiman sekitar kawasan industri Makassar (PT. KIMA) selama 10 tahun yang akan datang dengan skenario keempat yaitu penambahan tinggi cerobong dan penyediaan ruang terbuka hijau (RTH). Dengan kondisi tinggi cerobong menjadi 50 meter dan penyediaan ruang terbuka hijau, penurunan konsentrasi  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_2$  mencapai hampir 10 kali lipat dibanding kondisi eksisting.

## **B. Saran**

1. Diharapkan adanya penelitian lanjutan terkait polutan di kawasan industri Makassar (PT.KIMA), baik itu terkait polutan diluar parameter  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_2$  yang berasal dari emisi cerobong industri, maupun polutan yang berasal dari sumber lain.
2. Diharapkan adanya penelitian mendalam terkait efektifitas ruang terbuka hijau dalam menurunkan konsentrasi polutan, misalnya penelitian yang dapat mengukur laju serapan  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_2$  ataupun polutan lain, sehingga dapat digunakan untuk simulasi dalam permodelan dinamis.

3. Diharapkan adanya penelitian terkait dampak kesehatan akibat polutan yang mungkin akan dirasakan, khususnya bagi masyarakat yang tinggal dan bermukim di sekitar kawasan industri Makassar (PT. KIMA).
4. Bagi masyarakat yang tinggal di permukiman sekitar kawasan industri Makassar (PT.KIMA) agar melakukan penanaman tanaman puring (*Codiaeum interruptum*), dan untuk menurunkan NO<sub>2</sub> digunakan tanaman alkalipa merah (*Acalypha wilkesiana*).
5. Bagi pemerintah daerah Kota Makassar, Pengelola kawasan industri Makassar (PT.KIMA) dan instansi perusahaan yang beroperasi dalam kawasan industri agar melakukan pengukuran rutin kualitas udara ambien terutama konsentrasi SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub>, serta melakukan upaya yang perlu dilakukan untuk mengurangi emisi SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub> yang dihasilkan oleh aktivitas industri sehingga dapat meminimalisir dampak kesehatan pada masyarakat yang tinggal di permukiman sekitar kawasan industri Makassar. Upaya tersebut bisa berupa penambahan tinggi cerobong, penyediaan RTH, atau upaya lain berupa efisiensi bahan bakar.

## DAFTAR PUSTAKA

- Ahrens CD. 2007. *Meteorology Today : An Introduction to Weather, Climate, and the Environment*. Ed. 8th. Canada (CA): Thomson Brooks/Cole.
- Aji, S.B., 2010. Simulation of Pollutant Dispersion from Industrial Zone using TAPM (The Air Pollution Model).
- Ali, M. & Athar, M. 2010. Impact of Transport and Industrial Emissions on the Ambient Air Quality of Lahore City, Pakistan. *Environmental monitoring and assessment*, 171, 353-363.
- Anwar, F.S. (2018). Dispersion modelling of carbon monoxide and total suspended particulate emission from cement stacks: case study of PT. Semen Tonasa in Indonesia. *International Journal of Scientific Reports*, 4(11).
- Attri, P. K. & Kalia, S. 2017. Study of Environmental Health Status in Vicinity of ACC Cement Plant Barmana, Bilaspur District (HP). *EPH-International Journal of Agriculture and Environmental Research (ISSN: 2208-2158)*, 3, 08-23.
- Axella, O. & Suryani, E. 2012. Aplikasi Model Sistem Dinamik Untuk Menganalisis Permintaan Dan Ketersediaan Listrik Sektor Industri (Studi Kasus : Jawa Timur). *Jurnal Teknik ITS*, Vol 1 No. 1.
- Beychok MR. 2003. *Error Propagation in Air Dispersion Modelling*. <http://www.air-dispersion.com/>
- Bohari. 2014. *Pendekatan Model Dinamik Dalam Mengestimasi Kejadian Diabetes Mellitus Tipe 2 Di Sulawesi Selatan*. Postgraduate, Universitas Hasanuddin.
- Borge García, R., Paz Martín, D.D.L., Lumbreras Martín, J., Pérez Rodríguez, J. and Vedrenne, M., 2014. Analysis of contributions to NO<sub>2</sub> ambient air quality levels in Madrid City (Spain) through modeling. implications for the development of policies and air quality monitoring. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 2(1), pp.6-11.
- Chen, Fei., Dkk. 2017. The effects of Sulphur dioxide on acute mortality and years of life lost are modified by temperature in Chengdu, China. <http://www.sciencedirect.com>.
- Chen, R., Huang,W.,Wong, C.M.,Wang, Z., Thach, T.Q., Chen, B., Kan, H., 2012. Shortterm exposure to sulfur dioxide and daily mortality in 17 Chinese cities: the China air pollution and health effects study (CAPES). *Environ. Res.* 118, 65-71
- Chusai, C., Manomaiphiboon, K., Saiyasitpanich, P. and Thepanondh, S., 2012. NO<sub>2</sub> and SO<sub>2</sub>dispersion modeling and relative roles of emission sources over Map Ta Phut industrial area, Thailand. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 62(8), pp.932-945.
- Clark, N.A., Demers, P.A., Karr, C.J., Koehoorn, M., Lencar, C., Tamburic, L., Brauer, M., 2010. Effect of early life exposure to air-pollution on

- development of childhood asthma. *Environ. Health Perspect.* 118, 284-290.
- Dauhi, Y. 2014. Analisis Kadar Nitrogen Dioksida (NO<sub>2</sub>) Dan Karbon Monoksida (CO) Di Udara Ambien Kota Gorontalo. Department of Climate Change Australia. 2007. *Climate Change Science*. Australia (AU):Commonwealth.
- Dewi, N. W. S. P. (2018). Estimasi Pola Dispersi Debu, SO<sub>2</sub> dan NO<sub>x</sub> dari PT Holcim Indonesia Tbk, Bogor Menggunakan Model Gauss. *Jurnal Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan*, 8(1), 109-119.
- Dinkes. 2017. *Laporan 10 Penyakit Tertinggi Kota Makassar*. Makassar.
- Grigoras, G., Cuculeanu, V., Ene, G., Mocioaca, G. and Deneanu, A., 2012. Air pollution dispersion modeling in a polluted industrial area of complex terrain from Romania. *Romanian Reports in Physics*, 64(1), pp.173-186.
- Hadiwododo, M. and Huboyo, H.S., 2006. POLA PENYEBARAN GAS NO<sub>2</sub> DI UDARA AMBIEN KAWASAN UTARA KOTA SEMARANG PADA MUSIM KEMARAU MENGGUNAKAN PROGRAM ISCST3. *Jurnal Presipitasi: Media Komunikasi dan Pengembangan Teknik Lingkungan*, 1(1), pp.19-24.
- Hapsah. (2013). Analisis Tingkat Kebutuhan dan Ketersediaan Ruang Terbuka Hijau pada Kawasan Industri Makassar (Skripsi). Makassar: Universitas Hasanuddin.
- Huang, L., Zhang, C. and Bi, J., 2017. Development of land use regression models for PM<sub>2.5</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> and O<sub>3</sub> in Nanjing, China. *Environmental research*, 158, pp.542-552.
- Hutapea, R.H., 2015. Potensi Pajanan Sulfur Dioksida (SO<sub>2</sub>) pada Masyarakat di Sekitar Wilayah Industri di Musim Kemarau.
- Iswanto, R. J. (2012). *Pemodelan Matematika (Aplikasi dan Terapannya)*. Yogyakarta: Graha Ilmu.
- Jacobson, M.Z., 2002. *Atmospheric Pollution*, Cambridge University Press, UK.
- Jayadipraja, E.A., Daud, A., Assegaf, A.H. and Maming, M., 2016. Applying Spatial Analysis Tools in Public Health: The Use of AERMOD in Modeling the Emission Dispersion of SO<sub>2</sub> and NO<sub>2</sub> to Identify Exposed Area to Health Risks. *Public Health of Indonesia*, 2(1), pp.20-27.
- Kermani, M., Jokandan, S. F., Aghaei, M., Asl, F. B., Karimzadeh, S. & Dowlati, M. 2016. Estimation of the Number of Excess Hospitalizations Attributed to Sulfur Dioxide in Six Major Cities of Iran. *Health Scope*, 5.
- Klimont, Z., Cofala, J., Xing, J., Wei, W., Zhang, C., Wang, S., Kejun, J., Bhandari, P., Mathur, R., Purohit, P. and Rafaj, P., 2009. Projections of SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> and carbonaceous aerosols emissions in Asia. *Tellus B*, 61(4), pp.602-617.

- Kumar, A., Patil, R.S., Dikshit, A.K., Islam, S. and Kumar, R., 2016. Evaluation of control strategies for industrial air pollution sources using American Meteorological Society/Environmental Protection Agency Regulatory Model with simulated meteorology by Weather Research and Forecasting Model. *Journal of Cleaner Production*, 116, pp.110-117.
- Kusminingrum, Nanny. 2016. Efektifitas Reduksi Polusi Udara dengan Metode *Vertical Garden*. *Jurnal Jalan-Jembatan*, Volume 33 No. 2 Juli-Desember 2016: 102-114.
- Lazaridis, M. (2011). *First Principles of Meteorology and Air Pollution*. New York: Springer.
- M.M. Aral. 2010. Environmental modelling and Health Risk.
- Mahecha, G., Bamniya, B., Nair, N. & Saini, D. 2013. Air Pollution Tolerance Index of Certain Plant Species—A Study of Madri Industrial Area, Udaipur (Raj.), India. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 2, 7926-7929.
- Mahan, V. 2009. *Simulasi Penyebaran Gas SO<sub>2</sub> dari Emisi Cerobong Menggunakan Computational Fluid Dynamics (CFD)*. Bogor: Departemen Geofisika dan Meteorologi, Institut Pertanian Bogor.
- Mallongi A. (2015). *Bahan Pencemar Toxic Di Udara Dan Upaya Pengendaliannya*. Yogyakarta: WR.
- Mallongi, A. 2012. *Modul Pemodelan Kesehatan : Pemodelan Dinamik Kesehatan Masyarakat Dengan Menggunakan Software Stella*.
- Mickley L. (2014). *Interaction Between CLimate Change And U.S Air Quality*.
- Muhaimin. 2003. *Pemodelan Dispersi Polusi Udara Dari Aktivitas PLTU Cirebon Pada Musim Kemarau dan Hujan Serta Penggunaan 2 Cerobong Asap*. Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam UGM Jogjakarta.
- Mukono. 2011. *Aspek Kesehatan Pencemar Udara*. Surabaya: Airlangga University Press.
- Paerunan, J. (2017). Analisis Kualitas Udara pada Kawasan Terminal Regional Daya di Kota Makassar (Jurnal). Makassar: Universitas Hasanuddin.
- Patel, D. & Kumar, J. N. 2018. An Evaluation of Air Pollution Tolerance Index and Anticipated Performance Index of Some Tree Species Considered for Green Belt Development: A Case Study of Nandesari Industrial Area, Vadodara, Gujarat, India. *Open Journal of Air Pollution*, 7, 1.
- Peraturan Pemerintah. 1999. Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 41 Tahun 1999 tentang Pengendalian Pencemaran Udara. Jakarta (ID): Pemerintah RI.
- Popescu, F. & Ionel, I. 2010. Anthropogenic Air Pollution Sources. In: Kumar, A. (Ed.) *Air Quality*. Intech.

- Puspitasari, Dwi Anita. 2011. "Pola Spasial Pencemaran Udara Dari Sumber Pencemar PLTU dan PLTG Muara Karang". Skripsi Fakultas Matematika Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Indonesia. Depok.
- R.D. Ratnani. 2008. Teknik Pengendalian Pencemaran Udara Yang Diakibatkan oleh Partikel. *Momentum*, Vol. 4, No. 2, Oktober 2008: 27 – 32.
- Rahmadhani, A. 2017. *Pemodelan Dispersi Pencemaran Udara Sumber Majemuk Industri Semen di Kabupaten Tuban Jawa Timur*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Ruhat, Y., 2009. Model Prediksi Distribusi Laju Penyebaran Sulfur Dioksida (SO<sub>2</sub>) dan Debu dari Kawasan Industri (Studi Kasus di Kota Cilegon).
- S.K. Oni. P.J. Dillon. R.A. Metcalfe. M.N. Futter. 2014. Dynamic Modelling of the Impact of Climate Change and Power Flow Management Options using STELLA: Application to the Steephill Falls Reservoir, Ontario, Canada. *Canadian Water Resources Journal / Revue canadienne des ressources hydriques*. 125-148.
- Sachdeva, S. & Bakshi, S. 2018. Air Pollutant Dispersion Models: A Review. *Advances in Health and Environment Safety*. Springer.
- Santoso, Suci Normaliani. 2012. Penggunaan Tumbuhan sebagai Pereduksi Pencemaran Udara. *Jurnal Teknik Lingkungan*.
- Sarudji, Kuncoro. 2010. *Global Warming, Food, and Water Problems, Solutions, and The Changes of World Geopolitical Constellation*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- Savage, N.H., Agnew, P., Davis, L.S., Ordóñez, C., Thorpe, R., Johnson, C.E., O'Connor, F.M. and Dalvi, M., 2013. Air quality modelling using the Met Office Unified Model (AQUM OS24-26): model description and initial evaluation. *Geoscientific Model Development*, 6(2), p.353.
- Selmi, W., Weber, C., Rivière, E., Blond, N., Mehdi, L. & Nowak, D. 2016. Air Pollution Removal by Trees in Public Green Spaces in Strasbourg City, France. *Urban Forestry & Urban Greening*, 17, 192-201
- SNI 19-7119.2-2017
- SNI 19-7119.7.2017
- Soemarno 2003. Pendekatan Dan Pemodelan Sistem. Malang: Program Pascasarjana Universitas Brawijaya.
- Soemirat. 2011. *Kesehatan Lingkungan*. Yogyakarta: Gajah Mada Press.
- Sugiarti. 2009. Gas Pencemar Udara Dan Pengaruhnya Bagi Kesehatan Manusia. *Jurnal Chemica Vo/ 10 Nomor 1 Juni 2009*, 50-58
- Sterman, J. 2000. Business dynamic: system thinking and modelling for a complex world. Irsin/Mac. Grawhill
- Suryani S., Gunawan, Ambo Upe. (2010). Model Sebaran Polutan SO<sub>2</sub> pada Cerobong Asap PT. Semen Tonasa. *Jurnal Fusi*, 14(6): 23-39.

- Tao, Y., Huang, W., Huang, X., Zhong, L., Lu, S.-E., Li, Y., Dai, L., Zhang, Y. & Zhu, T. 2012. Estimated Acute Effects of Ambient Ozone and Nitrogen Dioxide on Mortality in the Pearl River Delta of Southern China. *Environmental Health Perspectives*, 120, 393.
- Türk YA, Kavraz M. 2011. Air pollutants and its effects on human healthy: the case of the city of Trabzon. Moldoveanu AM. *Advanced Topics in Environmental Health and Air Pollution Case Studies*. Croatia(HR): InTech. hlm 251-268; [Internet]. [diunduh 2014 Feb 17]. Tersedia pada: <http://www.interchopen.com/books/advanced-topics-in-environmental-health-and-air-pollution-case-studies/air-pollutants-and-its-effects-on-human-healthy-the-case-of-the-city-of-trabzon>.
- Turyanti, A. and Santikayasa, I.P., 2006. Analisis Pola Unsur Meteorologi Dan Konsentrasi Polutan Di Udara Ambien Studi Kasus: Jakarta Dan Bandung (Analysis Of Pattern Of Meteorology Variable And Ambient Pollutant Concentration Case Study: Bandung And Jakarta). *Jurnal Agromet Indonesia*, 20(2).
- Turyanti, A., June, T., Aldrian, E. and Noor, E., 2016. Analisis Pola Dispersi Partikulat Dan Sulfurdioksida Menggunakan Model Wrfchem Di Sekitar Wilayah Industri Tangerang Dan Jakarta (Analysis of Particulate and Sulfurdioxide Pattern Dispersion Using Wrfchem Model Over Industrial Area in Tangerang). *Jurnal Manusia dan Lingkungan*, 23(2), pp.169-178.
- Vailshery, L. S., Jaganmohan, M. & Nagendra, H. 2013. Effect of Street Trees on Microclimate and Air Pollution in a Tropical City. *Urban Forestry & Urban Greening*, 12, 408-415.
- Wahyuddin, P. P. 2016. Risiko Paparan Sulfur Dioksida (SO<sub>2</sub>) pada Masyarakat yang Bermukim di Sekitar PT. PLN (Persero) Sektor Tello Tahun 2014. *Higiene*, 8-14.
- Yorkor, B., Leton, T.G. and Ugbebor, J.N., PREDICTION AND MODELING OF SEASONAL CONCENTRATIONS OF AIR POLLUTANTS IN SEMI-URBAN REGION EMPLOYING ARTIFICIAL NEURAL NETWORK ENSEMBLES.
- Yuddin M. (2018). Model Dinamis Persebaran Emisi Nitrogen Dioksida dan Sulfur Dioksida di Pemukiman Sekitar Kawasan Industri PT. Semen Tonasa (Tesis). Makassar: Universitas Hasanuddin.
- Zhao, Z., Zhang, Z., Wang, Z., Ferm, M., Liang, Y., Norbäck, D., 2008. Asthmatic symptoms among pupils in relation to winter indoor and outdoor air pollution in schools in Taiyuan, China. *Environ. Health Perspect.* 116, 90-97.

# LAMPIRAN

Lampiran 2                      Rekap Data Bulanan Meteorologi Tahun 2014-2018

Tahun	Bulan	Suhu Minimum (°C)	Suhu Maksimum (°C)	Suhu Rata-rata (°C)	Kelembaban Rata-rata (%)	Curah Hujan (mm)	Lama Penyinaran (jam)	Kecepatan Angin Rata-rata (knot)	Arah Angin Terbanyak (deg)	Kecepatan Angin Terbesar (knot)	Arah Angin Saat Kecepatan Maksimum (deg)
2018	Januari	24,64	30,67	27,41	86,48	25,16	4,03	2,16	168,39	5,35	262,06
	Februari	24,56	30,88	26,74	86,69	28,91	4,54	1,79	155,89	4,93	260,46
	Maret	24,69	31,56	27,46	84,35	19,41	5,09	2,00	155,32	4,74	259,35
	April	25,38	32,86	28,40	80,83	5,50	7,87	2,00	139,50	3,93	247,67
	Mei	25,20	32,95	28,73	80,35	1,07	7,00	1,84	137,90	4,13	203,23
	Juni	24,91	31,90	27,72	82,77	3,24	6,82	1,53	169,50	3,63	227,67
	Juli	24,46	31,89	27,54	78,68	1,45	7,79	1,77	139,35	3,68	206,45
	Agustus	24,58	32,70	28,12	70,87	0,04	9,05	2,03	149,52	4,32	211,29
	September	24,84	33,05	28,27	73,83	0,02	8,86	2,00	193,50	4,60	212,00
	Oktober	25,39	34,06	29,18	72,23	0,38	9,58	2,03	159,68	4,65	220,39
	November	25,80	32,96	28,80	80,30	5,16	7,35	2,03	133,50	4,37	247,00
	Desember	24,94	31,18	27,65	84,96	28,19	4,14	2,23	149,52	5,32	256,29
2017	Januari	24,74	30,98	26,97	88,21	23,60	3,68	2,68	153,87	7,03	271,94
	Februari	24,94	31,66	27,65	85,89	14,28	4,26	3,50	197,68	7,93	285,36

Tahun	Bulan	Suhu Minimum (°C)	Suhu Maksimum (°C)	Suhu Rata-rata (°C)	Kelembaban Rata-rata (%)	Curah Hujan (mm)	Lama Penyinaran (jam)	Kecepatan Angin Rata-rata (knot)	Arah Angin Terbanyak (deg)	Kecepatan Angin Terbesar (knot)	Arah Angin Saat Kecepatan Maksimum (deg)
	Maret	25,06	31,28	27,57	88,16	14,48	4,22	2,19	150,97	5,39	262,90
	April	25,26	32,36	28,09	85,29	7,50	6,18	1,83	129,00	4,40	255,00
	Mei	25,49	32,64	28,63	82,68	1,45	6,63	1,77	150,97	3,61	244,29
	Juni	25,24	32,14	27,91	82,37	6,47	5,48	1,63	117,00	3,57	234,67
	Juli	25,08	32,20	27,99	76,50	0,69	6,27	1,81	156,77	4,35	242,26
	Agustus	24,50	31,85	27,84	71,71	1,67	7,86	1,94	177,10	4,26	229,68
	September	25,20	32,91	28,44	73,54	2,27	8,22	1,93	208,50	4,53	228,67
	Oktober	25,79	33,20	29,12	76,28	2,91	8,08	2,00	146,61	4,48	251,77
	November	25,37	32,42	28,12	83,38	16,53	6,30	2,10	171,00	4,77	263,70
	Desember	25,16	31,01	27,60	86,69	30,83	5,13	2,10	177,10	5,45	303,87
2016	Januari	25,59	32,62	28,63	83,85	12,54	8,15	2,43	133,50	6,40	262,00
	Februari	25,18	31,78	27,71	87,60	24,92	4,72	2,45	295,86	6,00	265,17
	Maret	25,96	32,61	28,53	86,48	7,13	6,22	2,13	145,16	4,81	270,00
	April	25,83	33,18	28,84	84,87	3,86	6,93	2,00	130,50	4,23	271,67
	Mei	26,51	33,51	29,27	79,71	1,41	8,38	2,03	155,32	4,77	254,52

Tahun	Bulan	Suhu Minimum (°C)	Suhu Maksimum (°C)	Suhu Rata-rata (°C)	Kelembaban Rata-rata (%)	Curah Hujan (mm)	Lama Penyinaran (jam)	Kecepatan Angin Rata-rata (knot)	Arah Angin Terbanyak (deg)	Kecepatan Angin Terbesar (knot)	Arah Angin Saat Kecepatan Maksimum (deg)
	Juni	25,47	33,22	28,62	79,73	1,58	7,32	2,03	153,00	4,03	244,67
	Juli	24,89	32,91	28,08	78,81	0,42	8,30	2,00	148,06	4,35	223,87
	Agustus	24,97	32,83	28,35	76,29	0,00	8,66	2,06	187,26	4,74	246,42
	September	25,50	33,38	28,62	75,86	2,64	7,69	2,20	193,50	5,40	248,00
	Oktober	25,30	32,30	28,44	80,38	13,71	7,46	2,13	156,77	5,23	239,03
	November	25,71	33,01	28,66	82,37	4,96	6,69	2,23	145,50	5,20	259,33
	Desember	25,31	31,16	27,58	85,96	18,86	4,51	3,55	165,48	7,81	295,16
2015	Januari	24,79	29,78	26,77	89,68	34,01	2,58	2,94	182,90	7,39	256,61
	Februari	24,59	30,94	27,16	87,68	12,64	4,61	2,21	194,46	5,32	247,14
	Maret	24,87	31,60	27,51	86,97	10,11	5,91	1,97	156,77	4,58	268,71
	April	24,85	32,25	27,79	84,53	7,23	5,55	1,67	135,00	4,67	256,33
	Mei	25,20	32,73	28,35	77,94	0,27	7,12	1,87	158,23	4,29	253,39
	Juni	24,78	31,74	27,65	79,70	1,83	6,24	1,70	178,50	3,97	233,50
	Juli	23,94	32,34	27,36	72,61	0,00	9,57	1,90	172,74	4,71	204,52
	Agustus	23,61	32,10	27,28	71,13	0,00	9,50	2,03	169,84	5,10	238,39

Tahun	Bulan	Suhu Minimum (°C)	Suhu Maksimum (°C)	Suhu Rata-rata (°C)	Kelembaban Rata-rata (%)	Curah Hujan (mm)	Lama Penyinaran (jam)	Kecepatan Angin Rata-rata (knot)	Arah Angin Terbanyak (deg)	Kecepatan Angin Terbesar (knot)	Arah Angin Saat Kecepatan Maksimum (deg)
2014	September	23,87	32,62	27,59	71,69	0,00	9,94	2,00	186,00	5,33	243,00
	Oktober	24,94	33,74	29,06	70,38	0,00	10,24	2,16	148,06	5,35	218,39
	November	26,36	33,11	29,39	79,04	4,99	8,54	1,90	162,00	4,83	262,33
	Desember	25,53	31,72	27,95	86,19	20,31	5,09	2,52	150,97	6,06	273,23
	Januari	24,53	30,13	26,61	88,74	23,87	2,42	3,29	198,87	7,61	269,35
	Februari	24,67	30,84	27,26	86,39	12,16	4,40	2,46	135,00	6,21	300,71
	Maret	24,94	31,69	27,63	85,65	10,02	6,53	2,10	143,71	4,81	250,65
	April	25,15	32,13	28,08	84,40	9,27	5,73	2,13	124,50	5,10	277,67
	Mei	25,70	389,04	28,65	81,08	3,26	6,65	1,87	130,65	5,03	207,10
	Juni	25,13	32,23	28,21	82,17	4,45	5,89	1,83	162,00	4,47	204,33
	Juli	24,22	32,11	27,61	77,28	0,99	7,26	2,00	151,50	4,33	204,33
	Agustus	23,83	31,80	27,40	75,17	0,17	8,25	2,10	194,52	4,68	204,19
September	23,26	32,67	27,69	68,67	0,00	9,63	2,10	202,50	5,43	215,00	
Oktober	24,50	33,79	29,37	67,92	0,00	10,47	2,33	169,20	5,50	231,25	
November	25,69	33,22	28,93	78,29	3,08	8,88	2,30	154,50	5,53	235,67	

Tahun	Bulan	Suhu Minimum (°C)	Suhu Maksimum (°C)	Suhu Rata-rata (°C)	Kelembaban Rata-rata (%)	Curah Hujan (mm)	Lama Penyinaran (jam)	Kecepatan Angin Rata-rata (knot)	Arah Angin Terbanyak (deg)	Kecepatan Angin Terbesar (knot)	Arah Angin Saat Kecepatan Maksimum (deg)
	Desember	25,45	30,25	27,15	87,59	21,19	4,67	2,79	144,64	6,50	252,14

## Lampiran 3      Formula Model

**Rumus Gauss untuk Lokasi 1 Parameter SO<sub>2</sub>:**

```

(IF(Jarak_x[1,Kapasa_Baru]>0) AND (Jarak_Y[1,Kapasa_Baru]>0) THEN
(Kecepatan_emisi[SO2,1]/((2*3.14*Kecepatan__angin_cerobong[1]*P_Horizont
al[1,Kapasa_Baru]*P_Vertikal[1,Kapasa_Baru]))*(EXP(-
(Jarak_Y[1,Kapasa_Baru]^2)/(2*P_Horizontal[1,Kapasa_Baru]^2)))*((EXP(-((1-
Tinggi_efektif[1]^2)/(2*P_Vertikal[1,Kapasa_Baru]^2)))+EXP(-
((1+Tinggi_efektif[1]^2)/(2*P_Vertikal[1,Kapasa_Baru]^2)))) ELSE 0) +
(IF(Jarak_x[2,Kapasa_Baru]>0) AND (Jarak_Y[2,Kapasa_Baru]>0) THEN
(Kecepatan_emisi[SO2,2]/((2*3.14*Kecepatan__angin_cerobong[2]*P_Horizont
al[2,Kapasa_Baru]*P_Vertikal[2,Kapasa_Baru]))*(EXP(-
(Jarak_Y[2,Kapasa_Baru]^2)/(2*P_Horizontal[2,Kapasa_Baru]^2)))*((EXP(-((1-
Tinggi_efektif[2]^2)/(2*P_Vertikal[2,Kapasa_Baru]^2)))+EXP(-
((1+Tinggi_efektif[2]^2)/(2*P_Vertikal[2,Kapasa_Baru]^2)))) ELSE 0) +
(IF(Jarak_x[3,Kapasa_Baru]>0) AND (Jarak_Y[3,Kapasa_Baru]>0) THEN
(Kecepatan_emisi[SO2,3]/((2*3.14*Kecepatan__angin_cerobong[3]*P_Horizont
al[3,Kapasa_Baru]*P_Vertikal[3,Kapasa_Baru]))*(EXP(-
(Jarak_Y[3,Kapasa_Baru]^2)/(2*P_Horizontal[3,Kapasa_Baru]^2)))*((EXP(-((1-
Tinggi_efektif[3]^2)/(2*P_Vertikal[3,Kapasa_Baru]^2)))+EXP(-
((1+Tinggi_efektif[3]^2)/(2*P_Vertikal[3,Kapasa_Baru]^2)))) ELSE 0) +
(IF(Jarak_x[4,Kapasa_Baru]>0) AND (Jarak_Y[4,Kapasa_Baru]>0) THEN
(Kecepatan_emisi[SO2,4]/((2*3.14*Kecepatan__angin_cerobong[4]*P_Horizont
al[4,Kapasa_Baru]*P_Vertikal[4,Kapasa_Baru]))*(EXP(-
(Jarak_Y[4,Kapasa_Baru]^2)/(2*P_Horizontal[4,Kapasa_Baru]^2)))*((EXP(-((1-
Tinggi_efektif[4]^2)/(2*P_Vertikal[4,Kapasa_Baru]^2)))+EXP(-
((1+Tinggi_efektif[4]^2)/(2*P_Vertikal[4,Kapasa_Baru]^2)))) ELSE 0) +
(IF(Jarak_x[5,Kapasa_Baru]>0) AND (Jarak_Y[5,Kapasa_Baru]>0) THEN
(Kecepatan_emisi[SO2,5]/((2*3.14*Kecepatan__angin_cerobong[5]*P_Horizont
al[5,Kapasa_Baru]*P_Vertikal[5,Kapasa_Baru]))*(EXP(-
(Jarak_Y[5,Kapasa_Baru]^2)/(2*P_Horizontal[5,Kapasa_Baru]^2)))*((EXP(-((1-
Tinggi_efektif[5]^2)/(2*P_Vertikal[5,Kapasa_Baru]^2)))+EXP(-
((1+Tinggi_efektif[5]^2)/(2*P_Vertikal[5,Kapasa_Baru]^2)))) ELSE 0) +
(IF(Jarak_x[6,Kapasa_Baru]>0) AND (Jarak_Y[6,Kapasa_Baru]>0) THEN
(Kecepatan_emisi[SO2,6]/((2*3.14*Kecepatan__angin_cerobong[6]*P_Horizont
al[6,Kapasa_Baru]*P_Vertikal[6,Kapasa_Baru]))*(EXP(-
(Jarak_Y[6,Kapasa_Baru]^2)/(2*P_Horizontal[6,Kapasa_Baru]^2)))*((EXP(-((1-
Tinggi_efektif[6]^2)/(2*P_Vertikal[6,Kapasa_Baru]^2)))+EXP(-
((1+Tinggi_efektif[6]^2)/(2*P_Vertikal[6,Kapasa_Baru]^2)))) ELSE 0) +
(IF(Jarak_x[7,Kapasa_Baru]>0) AND (Jarak_Y[7,Kapasa_Baru]>0) THEN

```

```
(Kecepatan_emisi[SO2,7]/((2*3.14*Kecepatan__angin_cerobong[7]*P_Horizont
al[1,Kapasa_Baru]*P_Vertikal[7,Kapasa_Baru]))*(EXP(-
(Jarak_Y[7,Kapasa_Baru]^2)/(2*P_Horizontal[7,Kapasa_Baru]^2)))*((EXP(-((1-
Tinggi_efektif[7]^2)/(2*P_Vertikal[7,Kapasa_Baru]^2)))+EXP(-
((1+Tinggi_efektif[7]^2)/(2*P_Vertikal[7,Kapasa_Baru]^2)))) ELSE 0)
```

### **Rumus Buoyancy Flux**

```
((9.8*Kecepatan_alir_gas[Cerobong]*Diameter_Cerobong[Cerobong]^2)*(Suhu
_cerobong[Cerobong]-Suhu_udara))/(4*Suhu_cerobong[Cerobong])
```

### **Rumus Kecepatan Angin Cerobong**

```
Kecepatan_angin_10_m*((Tinggi_cerobong[Cerobong]/10)^f_stabilitas_atm)
```

### **Rumus Keluar Sistem**

```
IF(SO2_dan_NO2[Parameter,Lokasi]>0) THEN
Total_Emisi[Parameter,Lokasi]*Koefisien_Keluar_sistem[Parameter,Lokasi]
ELSE 0
```

## Lampiran 4 Surat Ijin Penelitian



PEMERINTAH PROVINSI SULAWESI SELATAN  
**DINAS PENANAMAN MODAL DAN PELAYANAN TERPADU SATU PINTU**  
 BIDANG PENYELENGGARAAN PELAYANAN PERIZINAN

Nomor : 17592/S.01/PTSP/2019  
 Lampiran : -  
 Perihal : Izin Penelitian

**KepadaYth.**

1. Walikota Makassar
2. Pimpinan PT KIMA Makassar
3. Kepala Dinas Pengelolaan Lingkungan Hidup  
Prov. Sulsel

di-

Tempat

Berdasarkan surat Dekan Fak. Kesehatan Masyarakat UNHAS Makassar Nomor : 4623/UN4.14/PL.00.00/2019 tanggal 10 Juni 2019 perihal tersebut diatas, mahasiswa/peneliti dibawah ini:

N a m a : **RAHMI MULYANI AGUS**  
 Nomor Pokok : P1801216003  
 Program Studi : Kesehatan Masyarakat  
 Pekerjaan/Lembaga : Mahasiswa(S2)  
 Alamat : Jl. P. Kemerdekaan Km. 10, Makassar

Bermaksud untuk melakukan penelitian di daerah/kantor saudara dalam rangka penyusunan Tesis, dengan judul :

**" MODEL PREDIKSI PENCEMAR SULFUR DIOKSIDA (SO<sub>2</sub>) DAN NITROGEN DIOKSIDA (NO<sub>2</sub>) DI  
 KAWASAN INDUSTRI DAN PERMUKIMAN KOTA MAKASSAR TAHUN 2019 "**

Yang akan dilaksanakan dari : Tgl. **24 Juni s/d 05 Juli 2019**

Sehubungan dengan hal tersebut diatas, pada prinsipnya kami *menyetujui* kegiatan dimaksud dengan ketentuan yang tertera di belakang surat izin penelitian.

Demikian Surat Keterangan ini diberikan agar dipergunakan sebagaimana mestinya.

Diterbitkan di Makassar

Pada tanggal : 13 Juni 2019

**A.n. GUBERNUR SULAWESI SELATAN  
 KEPALA DINAS PENANAMAN MODAL DAN PELAYANAN TERPADU SATU  
 PINTU PROVINSI SULAWESI SELATAN**

Selaku Administrator Pelayanan Perizinan Terpadu

**A. M. YAMIN, SE., MS.**  
 Pangkat : Pembina Utama Madya  
 Nip : 19610513 199002 1 002

Tembusan Yth

1. Dekan Fak. Kesehatan Masyarakat UNHAS Makassar di Makassar;
2. *Perlinggal*.

Lampiran 5 Dokumentasi



**Peralatan analisa lapangan**



**Proses analisa sampel di laboratorium**



**Proses sampling di pemukiman**



**Peralatan sampling kualitas udara ambien**



**Pengecekan flow meter sesuai SNI**



**Gambaran sekitaran Jalan Kapasa Raya**