

DISERTASI

**MODEL INTERVENSI POTENSI RISIKO EKSPOSURE SO₂, NO₂, CO DAN
PM_{2,5} DARI EMISI KENDARAAN SERTA STRATEGI MITIGASI DI KOTA
TANGERANG SELATAN**

**INTERVENTION MODEL POTENTIAL RISK OF SO₂, NO₂, CO AND PM_{2.5}
EXPOSURE FROM VEHICLE EMISSIONS AND MITIGATION STRATEGY IN
TANGERANG SELATAN CITY**

ERNYASIH

K013211012



**PROGRAM DOKTOR ILMU KESEHATAN MASYARAKAT
SEKOLAH PASCASARJANA
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2023**

DISERTASI

**MODEL INTERVENSI POTENSI RESIKO EKSPOSURE SO₂, NO₂, CO
DAN PM_{2.5} DARI EMISI KENDARAAN SERTA STRATEGI MITIGASI
DI KOTA TANGERANG SELATAN**

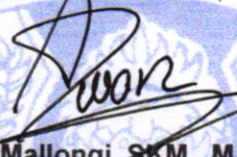
Disusun dan diajukan oleh

ERNYASIH
Nomor Pokok K013211012

Telah dipertahankan di depan Panitia Ujian Disertasi
pada tanggal 21 Agustus 2023
dan dinyatakan telah memenuhi syarat

Menyetujui

Komisi Penasehat,



Prof. Anwar Mallongi, SKM., M.Sc., Ph.D
Promotor



Prof. Dr. Anwar Daud, SKM., M.Kes
Ko-Promotor



Prof. Sukri Palutturi, SKM., M.Kes., M.Sc.PH., Ph.D
Ko-Promotor

Dekan Fakultas Kesehatan Masyarakat
Universitas Hasanuddin,



Prof. Sukri Palutturi, SKM., M.Kes, M.Sc.PH., Ph.D

Ketua Program Studi Doktor (S3)
Ilmu Kesehatan Masyarakat



Prof. Dr. Amnuddin Syam, SKM, M.Kes, M.Med.Ed

PERNYATAAN KEASLIAN DISERTASI

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Ernyasih

NIM : K013211012

Program Studi : Doktor Ilmu Kesehatan Masyarakat

Menyatakan dengan sebenarnya bahwa disertasi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya sendiri, bukan merupakan pengambil alihan tulisan atau pemikiran orang lain. Adapun bagian-bagian tertentu dalam penulisan disertasi yang saya kutip dari hasil karya orang lain telah dituliskan dengan sumbernya secara jelas sesuai dengan norma, kaidah, dan etika pedoman penulisan disertasi.

Apabila di kemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan disertasi ini hasil karya orang lain, saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Makassar, Agustus 2023

Yang Menyatakan,



Ernyasih

PRAKATA

Puji syukur senantiasa dipanjatkan kehadirat Allah SWT, atas berkat dan rahmat-Nya serta salawat dan salam kepada Nabi Muhammad SAW sehingga penulis dapat menyelesaikan penyusunan disertasi dengan judul “Model Intervensi Potensi Risiko Exposure SO_2 , NO_2 , CO Dan $PM_{2.5}$ Dari Emisi Kendaraan Serta Mitigasi Di Kota Tangerang Selatan”

Penyusunan disertasi merupakan bagan persyaratan untuk mendapatkan gelar Doktor Kesehatan Masyarakat pada Program Studi Doktor Ilmu Kesehatan Masyarakat, Fakultas Kesehatan Masyarakat, Universitas Hasanuddin, Makassar.

Disertasi ini dapat terselesaikan berkat bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, dalam kesempatan ini secara tulus penulis sampaikan rasa hormat dan terimakasih yang setinggi-tingginya kepada semua pihak, terutama kepada :

1. Rektor Universitas Hasanuddin Makassar yang telah memberikan kesempatan kepada penulis untuk belajar di Program Doktor Ilmu Kesehatan Masyarakat, Fakultas Kesehatan Masyarakat.
2. Prof. Sukri Palutturi., M.ScPH., PhD, Dekan Fakultas Kesehatan Masyarakat, sekaligus Ko-Promotor II yang telah memberikan pengarahan dan bimbingan kepada penulis dalam menyelesaikan penelitian dan penulisan disertasi ini.
3. Prof. Dr. Aminuddin Syam, SKM., M.Med.Ed, Ketua program Studi Doktor Ilmu Kesehatan Masyarakat yang telah memberikan ijin dan dukungan demi terlaksananya penelitian dalam rangka disertasi ini.
4. Prof. Anwar Mallongi., SKM., M.Sc.PhD, selaku promotor dan Prof. Dr. Anwar Daud, SKM., M.Kes, selaku Ko-Promotor I yang dengan tulus dan ikhlas meluangkan waktunya untuk memberikan bimbingan sehingga disertasi ini dapat diselesaikan.
5. Dr. Wesam Al Madhoun, selaku penguji Eksternal, Prof. Dr. dr. Razak Thaha., M.Sc., Prof. Dr. Stang, M.Kes., dan Dr. Erniwati Ibrahim, SKM., M.Kes, selaku penguji Internal yang telah banyak memberikan masukan sehingga disertasi ini dapat diselesaikan dengan baik.
6. Seluruh dosen pengajar S3 Ilmu Kesehatan Masyarakat Universitas Hasanuddin yang telah memberikan bekal ilmu yang sangat bermanfaat bagi penulis.

7. Dinas Kesehatan Kota Tangerang Selatan yang telah memberikan izin dalam pengambilan data penelitian.
8. Staff Administrasi Prodi S3 Ibu Syamsiah Malik dan Irma Suryani yang telah memberikan dukungan dan saran yang bermanfaat bagi penulis
9. Suami, anak, orang tua dan seluruh keluarga yang telah memberikan sumbangsih moril dan materi dalam menyelesaikan studi.
10. Dr. Andriyani, M.Kes., Dr. Munaya Fauziah, SKM., M.Kes, Nurmalia Lusida, SKM., MKM., Atrio, S.Kom dan Universitas Muhammadiyah Jakarta yang selalu memberikan dukungan dalam menyelesaikan studi.
11. Saudara seperjuangan Bintang Petralina, SST., M.Keb dan rekan-rekan mahasiswa program doktor Ilmu Kesehatan Masyarakat angkatan 2021 atas semangat dan dukungan dalam menyelesaikan studi.

Ucapan terimakasih dan penghargaan yang tulus kepada orang tua saya tercinta, ayahanda Drs. H. Aslibun Hardjo Atmodjo, Ibunda (almh) Suginah Hartini, Suami tercinta Capt. Chalid., M.T, anak-anak tersayang Muhammad Rifqi Anas, Rofifah Aliyah, Muhammad Ihsan dan Muhammad Akmal serta semua keluarga, sahabat dan kerabat yang telah mendukung sepenuhnya atas pengertian, kesabaran, dukungan doa dan cinta kasih yang tidak ternilai serta memberi dukungan mori dalam menjalankan studi ini.

Penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan di dalam penyusunan disertasi ini, untuk itu penulis sangat mengharapkan kritik dan saran yang membangun demi perbaikan dan kesempurnaan disertasi ini.

Akhir kata, semoga semua bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak menjadi amal kebaikan dan mendapat imbalan yang setimpal dari Allah SWT. Aamiin.

Makassar, Juli 2023
Penyusun

ERNYASIH

ABSTRAK

ERNYASIH. *Model Intervensi Potensi Resiko Exposure SO₂, NO₂, CO Dan PM_{2.5} Dari Emisi Kendaraan Serta Strategi Mitigasi Di Kota Tangerang Selatan* (Dibimbing oleh **Anwar Mallongi, Anwar Daud, dan Sukri Palutturi**)

Pencemaran udara menjadi masalah yang cukup serius karena adanya peningkatan gas polutan yang sangat pesat setiap harinya. Jumlah kendaraan menjadi faktor yang sangat mempengaruhi konsentrasi pencemaran udara akibat emisi kendaraan bermotor sehingga mengakibatkan dampak yang merugikan bagi kesehatan manusia dan lingkungan sekitarnya. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan model intervensi potensi resiko exposure SO₂, NO₂, CO dan PM_{2.5} dari emisi kendaraan serta strategi mitigasi di Kota Tangerang Selatan.

Penelitian ini menggunakan metode observasional analitik dengan rancangan *cross-sectional* studi melalui pendekatan model dinamis yang dipadukan dengan Penilaian Risiko Kesehatan dan Lingkungan (ARKL) yang dilanjutkan dengan Simulasi *Monte Carlo* (MCS).

Skenario yang paling efektif dalam pencegahan penyakit ISPA akibat polusi udara adalah penggunaan masker dan skenario yang efektif dalam menurunkan kadar polutan diudara dengan menerapkan penanaman pohon dan penerapan *smart transportation*. Hasil perhitungan ARKL *life time* (30 tahun) dapatkan bahwa intake kadar CO sebesar 3.17, (RQ > 1), sehingga disimpulkan pemajanan *risk agent* dapat menimbulkan dampak berbahaya atau gangguan kesehatan bagi kesehatan orang dewasa dan anak-anak. Penerapan kebijakan dan strategi mitigasi dengan penggunaan masker secara rutin jika beraktivitas diluar ruangan, penanaman pohon, penerapan penerapan *smart transportation* yang diaplikasikan dapat menurunkan konsentrasi SO₂, NO₂, CO dan PM_{2.5} di Tangerang selatan dan menekan kejadian ISPA.

Kata Kunci: Model Rekayasa Lingkungan, Polusi Udara, ISPA, Analisis Resiko Kesehatan Lingkungan.



ABSTRACT

ERNYASIH. *Intervention Model Of Potential SO₂, NO₂, CO, And PM_{2.5} Exposure Risks From Vehicle Emissions And Mitigation Strategies In South Tangerang City* (Supervised by **Anwar Mallongi, Anwar Daud, and Sukri Palutturi**)

Air pollution is a serious problem because of the rapid increase in pollutant gases every day. The number of vehicles is a factor that greatly influences the concentration of air pollution due to motorized vehicle emissions resulting in adverse impacts on human health and the surrounding environment. This study aims to determine the potential risk intervention models for exposure to SO₂, NO₂, CO, and PM_{2.5} from vehicle emissions as well as mitigation strategies in South Tangerang City.

This study used an analytic observational method with a cross-sectional study design through a dynamic modeling approach combined with Health and Environmental Risk Assessment (ARKL) followed by Monte Carlo Simulation (MCS).

The most effective scenario in preventing ARI due to air pollution is using masks and scenarios that effectively reduce pollutant levels in the air by implementing tree planting and smart transportation. The results of the ARKL lifetime calculation (30 years) found that the intake level of CO was 3.17, (RQ > 1), so it was concluded that exposure to a risk agent could cause harmful effects or health problems for the health of adults and children. Implementing policies and mitigation strategies by using masks regularly during outdoor activities, planting trees, and implementing smart transportation applications can reduce SO₂, NO₂, CO, and PM_{2.5} concentrations in South Tangerang and reduce the incidence of ARI.

Keywords: Environmental Engineering Model, Air Pollution, ARI, Environmental Health Risk Analysis



DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN DISERTASI	ii
PRAKATA	iii
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR TABEL	ix
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR SINGKATAN	xiv
BAB I PENDAHULUAN UMUM	1
A. Latar Belakang	1
B. Rumusan Masalah	8
C. Tujuan Penelitian	9
1. Umum	9
2. Tujuan Khusus	9
D. Manfaat Penelitian	9
1. Manfaat Ilmiah	9
2. Manfaat Aplikatif	10
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	11
A. Tinjauan Pencemaran Udara	11
1. Sumber Pencemaran udara	12
2. Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Penyebaran Pencemar	12
3. Dampak Pencemaran Udara	13
B. Emisi Kendaraan Bermotor	14
1. Pengertian Emisi Kendaraan Bermotor	14
2. Zat-Zat Emisi Kendaraan Bermotor	14
C. Bahan Pencemar SO₂, NO₂, CO dan PM_{2.5}	15
D. Analisis Resiko Kesehatan Lingkungan	25
1. Konsep dan Definisi ARKL	25
2. Prinsip Penilaian Paparan	26
3. Langkah Penilaian Risiko Kesehatan	28
E. Tinjauan Umum Tentang Pemodelan Dinamis	34
1. Model	34

2. Membangun Model	35
3. Sistem Sebagai Black Box.....	37
4. Sistem Dinamik.....	37
5. <i>Black Box Testing</i>	41
6. Analisis Simulasi.....	41
7. Validasi Model.....	41
F. Aplikasi STELLA 9.0.2	42
1. Menu Model Aplikasi STELLA.....	43
2. Komponen Model STELLA	44
3. Umpan Balik Model.....	44
G. Tinjauan Tentang Monte Carlo	45
H. Kajian Kebijakan Transportasi.....	48
1. Konsep Kebijakan	48
2. Kebijakan Transportasi.....	49
3. <i>Policy Brief</i>	51
I. Perbedaan Analisis Monte Carlo dengan Analisis Stella.....	53
J. Tinjauan Tentang Penelitian Terdahulu.....	56
K. Kerangka Teori Penelitian	69
L. Kerangka Konsep Penelitian	70
M. Hipotesis Penelitian	71
BAB III METODE PENELITIAN	72
A. Jenis dan Desain Penelitian.....	72
B. Waktu dan Lokasi Penelitian	73
C. Populasi dan Sampel.....	74
D. Metode Pengumpulan Data.....	81
1. Jenis dan sumber Data	81
2. Batasan Model.....	82
3. Analisis Data/Model	82
E. Penyajian Data.....	83
F. Instrumen Penelitian.....	84
G. Causal Loop Penelitian	85
H. Alur Penelitian	87
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	88
A. Hasil Penelitian.....	88

1) Gambaran Umum Lokasi Penelitian.....	88
2) Hasil.....	89
B. Pembahasan	129
KESIMPULAN DAN SARAN	197
DAFTAR PUSTAKA.....	201

DAFTAR TABEL

Tabel	Judul	Hal
2.1	Aspek penting dan perlu diperhatikan dalam analisis paparan	48
2.2	Perbedaan Pemodelan Monte Carlo dan Stella	87
2.3	Sintesa Penelitian Terdahulu	88
4.1	Sebaran Kandungan Logam SO ₂ , NO ₂ , CO dan PM _{2,5} di Tangerang selatan	125
4.2	Nilai Dosis Respon Risk	127
4.3	Nilai Antropometri	127
4.4	Variasi Iklim di Tangerang Selatan	128
4.5	Perhitungan Polusi lingkungan akibat akumulasi SO ₂ , NO ₂ , CO dan PM _{2,5} di Tangerang selatan selama 30 tahun yang akan datang	132
4.6	Nilai paparan Harian polutan (RQ) di Tangerang selatan	133
4.7	Target Hazard Quotient (THQ)	135
4.8	Perbandingan Strategi Mitigasi Pemerintah Kota Tangerang dan Rekomendasi Hasil Penelitian	165

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Judul	Hal
2.1.1	Menu Utama Program Stella	68
2.1.2	Bentuk objek rangkaian program STELLA	70
2.1.3	Contoh visualisasi kausal loop antara kelahiran, populasi dan kematian	71
2.1.4	Kerangka Teori	99
2.1.5	Kerangka Konsep	100
3.1.1	Peta Kota Tangerang Selatan	104
3.1.2	Gas air Sampler Impinger	107
3.1.3	CO meter	109
3.1.4	HVAS	111
3.1.5	titik sampel lingkungan di Kota Tangerang Selatan	113
3.1.6	Causa Loop Penelitian	121
3.1.7	Alur Penelitian	122
4.1.1	Kondisi Angin di Kota Tangerang Selatan	130
4.1.2	Model Prediksi risiko ekologis dan beban total polusi lingkungan akibat akumulasi SO ₂ , NO ₂ , CO dan PM _{2,5} di Tangerang selatan selama 30 tahun yang akan datang	130
4.1.3	Grafik risiko ekologis dan beban total polusi lingkungan akibat akumulasi SO ₂ , NO ₂ , CO dan PM _{2,5} di Tangerang selatan selama 30 tahun yang akan datang	132
4.1.4	Model dan Penerapan Tanpa Skenario yang berisiko meningkatkan kejadian penyakit akibat pencemaran udara di Tangerang Selatan dari 2023-2052	138
4.1.5	Grafik Prediksi Kejadian ISPA Tanpa Skenario Akibat Kadar SO ₂ di Tangerang Selatan Selama 30 Tahun	137
4.1.6	Grafik Prediksi Kejadian ISPA Tanpa Skenario akibat kadar NO ₂ di Tangerang Selatan Selama 30 Tahun	139
4.1.7	Grafik Prediksi Kejadian ISPA Tanpa Skenario akibat kadar CO di Tangerang Selatan Selama 30 Tahun	140
4.1.8	Grafik Kejadian ISPA Tanpa Skenario Akibat Polutan PM _{2,5} di Tangerang Selatan Selama 30 Tahun	141

4.1.9	Model dan Penerapan Skenario II dengan Penggunaan Masker sebagai upaya penurunan kejadian ISPA	142
4.1.10	Grafik penerapan skenario II Penggunaan Masker yang diaplikasikan untuk menurunkan Kejadian ISPA akibat Polutan NO ₂	143
4.2.1	Grafik penerapan skenario II Penggunaan Masker yang diaplikasikan untuk menurunkan Kejadian ISPA akibat Polutan SO ₂	143
4.2.3	Grafik penerapan skenario Penggunaan Masker yang diaplikasikan untuk menurunkan Kejadian ISPA akibat Polutan CO	144
4.2.4	Model dan Penerapan Skenario III dengan Penanaman Pohon dan Rumah Sehat sebagai upaya penurunan Polutan Udara dalam mencegah kejadian ISPA	145
4.2.5	Grafik penerapan skenario III dengan Penanaman Pohon dan Rumah Sehat yang diaplikasikan untuk menurunkan Kejadian ISPA akibat Polutan NO ₂	146
4.2.6	Grafik penerapan skenario III dengan Penanaman Pohon dan Rumah Sehat yang diaplikasikan untuk menurunkan Kejadian ISPA akibat Polutan SO ₂	147
4.2.7	Grafik penerapan skenario III dengan Penanaman Pohon dan Rumah Sehat yang diaplikasikan untuk menurunkan Kejadian ISPA akibat Polutan CO	148
4.2.8	Grafik penerapan skenario III dengan Penanaman Pohon dan Rumah Sehat yang diaplikasikan untuk menurunkan Kejadian ISPA akibat Polutan PM _{2.5}	149
4.2.9	Model dan Penerapan Skenario VI dengan Penerapan <i>smart transportation</i> sebagai upaya penurunan Polutan Udara dan mencegah kejadian ISPA di Kota Tangerang Selatan	150
4.2.10	Grafik penerapan skenario IV dengan Penerapan <i>smart transportation</i> diaplikasikan untuk menurunkan Polutan NO ₂ dan Kejadian ISPA di Kota Tangerang Selatan	152

4.3.1	Grafik penerapan skenario IV dengan Penerapan <i>smart transportation</i> diaplikasikan untuk menurunkan Polutan SO ₂ dan Kejadian ISPA di Kota Tangerang Selatan	153
4.3.2	Grafik penerapan skenario IV dengan Penerapan <i>smart transportation</i> diaplikasikan untuk menurunkan Polutan CO dan Kejadian ISPA di Kota Tangerang Selatan	154
4.3.3	Grafik penerapan skenario IV dengan Penerapan <i>smart transportation</i> diaplikasikan untuk menurunkan Polutan PM _{2.5} dan Kejadian ISPA di Kota Tangerang Selatan	155
4.3.4	Model dan Penerapan Skenario V dengan Penerapan Sertifikat uji emisi sebagai upaya penurunan Polutan Udara dan mencegah kejadian ISPA di Kota Tangerang Selatan	156
4.3.5	Grafik penerapan skenario V dengan Penerapan sertifikasi uji emisi diaplikasikan untuk menurunkan Polutan SO ₂ dan NO ₂ terhadap Kejadian ISPA di Kota Tangerang Selatan	158
4.3.6	Grafik penerapan skenario IV dengan Penerapan sertifikasi uji emisi diaplikasikan untuk menurunkan Polutan CO dan PM _{2.5} dan Kejadian ISPA di Kota Tangerang Selatan	159
4.3.7	Probabilitas SO ₂ pada orang Dewasa	167
4.3.8	Sensitivitas SO ₂ pada orang Dewasa	168
4.3.9	Probabilitas SO ₂ pada anak-anak	169
4.3.10	Sensitivitas SO ₂ pada anak-anak	169
4.4.1	Probabilitas NO ₂ pada orang Dewasa	170
4.4.2	Sensitivitas NO ₂ pada orang Dewasa	171
4.4.3	Probabilitas NO ₂ pada anak-anak	172
4.4.4	Sensitivitas NO ₂ pada anak-anak	172
4.4.5	Probabilitas CO pada orang Dewasa	173
4.4.6	Sensitivitas CO pada orang dewasa	174
4.4.7	Probabilitas CO pada anak	175
4.4.8	Sensitivitas CO pada anak-anak	175
4.4.9	Probabilitas PM _{2.5} pada orang Dewasa	176
4.4.10	Sensitivitas PM _{2.5} pada orang dewasa	177

4.5.1	Probabilitas PM_{2.5} pada anak-anak	177
4.5.2	Sensitivitas PM_{2.5} pada anak-anak	178

DAFTAR SINGKATAN

ARKL	Analisis Resiko Kesehatan Lingkungan
BW	<i>Body Weight</i>
C	<i>Contrentration</i>
Cal EPA	<i>California Environmental Protection Agency</i>
CCR	<i>Cancer Unit Risk</i>
CO	<i>Karbon Monoksida</i>
COHb	Carboxyhemoglobin
CSF	<i>Cancer Slope Factor</i>
CuFeS ₂	<i>Copper Iron Sulfide</i>
Cu ₂ S	<i>Copper Sulfide</i>
Dt	<i>Duration Time</i>
ECR	<i>Excess Cancer Risk</i>
ED	<i>Exposure Duration</i>
EF	<i>Exposure Frequency</i>
EHRA	<i>Environmental Health Risk Assessment</i>
fE	<i>Frequency Exposure</i>
FeS ₂	Besi disulfida
GPS	<i>Global Positioning System</i>
HC	<i>Hydrocarbon</i>
HI	<i>Hazard Index</i>
HgS	Mercury sulfide
HQ	<i>Hazard Quetient</i>
H ₂	<i>Hydrogen</i>
I	<i>Intake</i>
IRIS	<i>Integrated Risk Information System</i>
ISPA	Infeksi Saluran Pernafasan Atas
MCS	<i>Monte Carlo Simulation</i>
NOAEL	<i>No Observed Adverse Effect Leve</i>
NO ₂	<i>Nitrogen Oksida</i>
O ₃	<i>Ozon</i>
OR	<i>Odd Ratio</i>
PAN	<i>Peroxyacyl Nitrates</i>
PbS	timbal sulfide

PHA	<i>Public Health Assessment</i>
PM _{2.5}	<i>Particulate Matter 2,5</i>
ppm	<i>Parts Per Million</i>
R	<i>Rate</i>
RfD	<i>Reference dose</i>
RR	<i>Risk Ratio</i>
RQ	<i>Risk Quotient</i>
SMR	<i>Standardized Mortality Ratio</i>
SNI	<i>Standar Nasional Indonesia</i>
SO ₂	<i>Sulfur Dioksida</i>
Tavg	<i>Time Average</i>
TCR	<i>Target Cancer Risk</i>
THQ	<i>Target Hazard Quetient</i>
TSS	<i>Total Suspended Solid</i>
tE	<i>Time Exposure</i>
US-UEPA	<i>United State - Environmentanl Protection Agency</i>
WHO	<i>World Health Organization</i>
ZnS	<i>Zinc Sulfide</i>
µg/Nm ³	<i>Mikrogram Per Meter Kubik</i>

BAB I

PENDAHULUAN UMUM

A. Latar Belakang

Pencemaran udara merupakan salah satu kerusakan pada komponen udara karena terjadinya kepadatan dan emisi udara yang cukup tinggi yang disebabkan oleh kegiatan industri atau kegiatan transportasi yang mengganggu keseimbangan ekologi dan berpengaruh negatif dalam kehidupan manusia (Krzyzanowski, Kuna-Dibbert and Schneider, 2005; Guo *et al.*, 2016; Keyte, Albinet and Harrison, 2016; Lee, Miller and Shah, 2018; Carlsten *et al.*, 2020; Waseq, 2020)

Beberapa tahun terakhir ini dampak pencemaran udara menjadi masalah yang cukup serius karena adanya peningkatan gas polutan yang sangat pesat setiap harinya. Penyumbang pencemaran udara terbesar pada daerah perkotaan terletak pada sektor transportasi (Chaney *et al.*, 2017; Zhou *et al.*, 2019; deSouza, 2020), transportasi darat merupakan sumber terbesar gas rumah kaca yang menyumbang sekitar 77% dari total emisi transportasi yang dimana sebagian besar bersumber dari kendaraan mobil pribadi dan kendaraan bermotor (Cepeda *et al.*, 2017). Mobil pribadi menghasilkan emisi sebesar 80% dari total kendaraan lalu lintas. Pencemaran udara pada sektor transportasi disebabkan karena kualitas standar kendaraan yang rendah, kualitas bahan bakar yang rendah, infrastruktur transportasi umum yang tidak efektif dan manajemen kebijakan yang kurang terkontrol (Krzyzanowski, Kuna-Dibbert and Schneider, 2005; Fatin Izzatuljannah and Zakiah, 2021).

Jumlah kendaraan menjadi faktor yang sangat mempengaruhi konsentrasi pencemaran udara akibat emisi kendaraan bermotor (Chin *et al.*, 2019). Tingkat pendapatan masyarakat yang meningkat membuat kecenderungan untuk memiliki kendaraan pribadi, sehingga jumlah kendaraan bermotor pun terus meningkat. Emisi gas buang yang dihasilkan setiap kendaraan bermotor itu pun tidak semuanya memenuhi ambang batas emisi gas buang kendaraan bermotor, seperti yang terdapat dalam Kepmenlh No. 35/MENLH/10/1993 (Ma'rufi, 2018).

Kegiatan transportasi yang berkembang pesat di area perkotaan secara signifikan menimbulkan emisi dari berbagai gas polutan (Brohi *et al.*, 2018; Xue *et al.*, 2020). Polutan yang dikeluarkan oleh kendaraan bermotor antara lain karbon monoksida (CO), nitrogen oksida (NO_x), hidrokarbon (HC), sulfur

dioksida (SO₂), timah hitam (Pb) dan karbon dioksida (CO₂) dan PM_{2.5} (Pratama, Arliansyah and Agustien, 2019; Cottrell, 2020; Li and Managi, 2021).

Udara ambien adalah udara bebas di permukaan bumi pada lapisan troposfer yang berada di dalam suatu wilayah yang dibutuhkan dan mempengaruhi kesehatan manusia, makhluk hidup dan unsur lingkungan hidup lainnya. Baku mutu udara ambien nasional ditetapkan sebagai batas maksimum mutu udara ambien untuk mencegah terjadinya pencemaran udara sebagaimana terlampir dalam PP No 41 Tahun 1999. Zat-zat seperti karbon monoksida, debu/partikel, sulfur dioksida (SO₂), nitrogen oksida (NO₂), hidrokarbon dan hidrogen sulfida (H₂S) serta partikel (PM_{2.5}, PM₁₀, TSP) dapat mengakibatkan dampak yang merugikan bagi kesehatan manusia seperti sakit kepala, sesak nafas, iritasi mata, batuk, iritasi saluran pernafasan, rusaknya paru-paru, bronkhitis, dan menimbulkan kerentanan terhadap virus influenza. Selain manusia zat-zat tersebut juga dapat menimbulkan kerusakan pada tanaman, misalnya zat NO₂ dapat menimbulkan bintik-bintik pada daun sampai mengakibatkan rusaknya tulang-tulang daun. Pencemaran udara juga akan menimbulkan kerusakan pada bangunan, misalnya asam sulfat yang terbentuk sebagai hasil reaksi antara SO₃ dengan uap air yang dapat menyebabkan terjadinya hujan asam (Carlsten *et al.*, 2020; Fatin Izzatuljannah and Zakiah, 2021).

Polusi yang berasal dari kegiatan transportasi yang terjadi setiap hari dilingkungan dikaitkan dengan terjadinya gangguan Kesehatan seperti gangguan saluran pernafasan dan keluhan gangguan pada jantung (Hansel, McCormack and Kim, 2016; Çapraz, Deniz and Doğan, 2017; Ren *et al.*, 2017; Dehghan *et al.*, 2018; Khilnani and Tiwari, 2018; Khaltaev and Axelrod, 2019; S, Bagepally and Rakesh, 2022). Berdasarkan hasil studi epidemiologi, keluhan yang berhubungan dengan pencemaran udara antara lain asma, *bronchitis*, serangan jantung dan stroke, data lain juga menunjukkan pencemaran udara khusus dari kegiatan transportasi diperkirakan telah mengakibatkan kematian 200.000 orang sampai 570.000 orang setiap tahun di seluruh belahan Bumi (Atkinson *et al.*, 2016; Carlsten *et al.*, 2020).

World Health Organization memperkirakan bahwa polusi udara ambien berkontribusi terhadap kematian 165.8 per 100.000 populasi di Asia Tenggara-Mediterrania dan menjadi yang tertinggi kedua setelah Afrika dengan 190.8 per 100.000 populasi (World Health Organization, 2018). Sebagian besar kematian

tersebut diakibatkan oleh dampak penyakit kardiovaskular gangguan pernapasan dan kanker. Pencemaran udara berkontribusi pada kematian 85.0 per 100.000 populasi di Indonesia pada tahun 2017 dan naik hingga 112.4 per 100.000 populasi di tahun 2019 (World Health Organization, 2020).

PM_{2.5} yang berasal dari transportasi, di Amerika menyumbang 28% terhadap 107.000 kematian. (Goodkind et.al, 2019). Konsentrasi PM_{2.5} sebesar 5µg dan SO₂ berdampak terhadap kejadian asma pada anak-anak di Denmark. Sedangkan di Kamboja, PM_{2.5} menyebabkan 245 – 724 kematian bayi (Malley *et al.*, 2022) dan 17.000 kematian prematur pada tahun 2019 (Abbatati *et al.*, 2020) dan 52% atau 0,82 juta di Tiongkok (Nawaz *et al.*, 2023).

Kualitas udara yang buruk akibat tingginya konsentrasi CO, SO₂, NO₂ dan PM_{2.5} menyebabkan 26.034 kasus kardiovaskuler, 7404 kasus kematian akibat pernapasan dari total 33.438 kematian di Korea (Oak *et al.*, 2023). Selain itu, PM_{2.5} dan NO₂ yang dihasilkan dari transportasi sangat berhubungan erat dengan hipertensi di Glasgow, Inggris (Adza *et al.*, 2022)

Polusi udara berupa SO₂, PM_{2.5}, NO₂, CO di Cina Barat telah berdampak nyata terhadap lingkungan dan Kesehatan manusia terkait pernapasan sampai dengan kematian. Polutan ini semakin meningkat di wilayah perkotaan dengan penduduk padat di Guanzhong dan Sichuan yang dipengaruhi oleh suhu dan kecepatan angin. (Yang et.al., 2020). Di Anhui, Cina, kualitas udara ambien ditemukan berasosiasi dengan kualitas permukaan tanah, ruang hijau dan kasus hipertensi (Li *et al.*, 2022). Kontaminasi tanah dan polusi mikroplastik di permukiman perkotaan kecil di India juga menunjukkan tingkat keparahan akibat aktivitas manusia yang tidak dikelola dan menyebabkan risiko kesehatan akibat pencemaran udara (Sarkar *et al.*, 2022).

Partikulat dan gas pencemar yang dihasilkan kendaraan bermotor tersebut di atas, dapat masuk dan mengendap dalam paru-paru manusia, yaitu partikulat dengan diameter $\leq 10 \mu\text{m}$. Polutan yang terpapar itu dapat membahayakan kesehatan manusia, apalagi jika diakumulasikan dalam rentang waktu yang cukup lama. Contoh gas emisi kendaraan bermotor yang sangat berbahaya adalah gas CO (karbon monoksida). CO merupakan gas yang tidak memiliki aroma yang khusus. Senyawa CO dapat bereaksi dengan hemoglobin darah membentuk karboksi hemoglobin (Hb-CO). Hb-CO tersebut menyebabkan darah tidak bisa mengangkut oksigen dalam sirkulasi darah. Kemampuan CO dalam mengikat hb ternyata 210 kali lebih kuat di bandingkan

oksigen, sehingga oksigen akan kalah bersaing. Seseorang yang teracuni gas CO akan mengalami gejala sakit kepala, gangguan mental (*mental dullness*), pusing, lemah, mual, muntah, kehilangan kontrol otot, diikuti dengan penurunan denyut nadi dan frekuensi pernapasan, pingsan, dan bahkan meninggal. Kasus pingsan atau bahkan meninggal akan terjadi bila kadar Hb-CO dalam darah mencapai 60% dari total hb darah atau lebih. Penelitian menyebutkan, CO dengan konsentrasi 250 ppm dapat membuat orang pingsan. Bahkan pada konsentrasi 1.000 ppm, dapat menyebabkan kematian seketika (Jiang, Mei and Feng, 2016).

Kota Tangerang Selatan merupakan daerah penyangga ibukota Jakarta juga menjadi daerah yang menjadi perbatasan antara provinsi Jawa Barat dan Banten. Kota ini telah berkembang menjadi suatu kawasan yang memiliki tingkat kepadatan pemukiman yang tinggi, kawasan industri dan daerah pertumbuhan perdagangan yang pesat. Seiring dengan perkembangan fungsi kawasan tersebut, hal-hal tersebut ternyata memicu adanya isu lingkungan di kota Tangerang Selatan. Salah satunya adalah isu polusi udara yang salah satu penyebabnya yaitu terjadinya peningkatan moda transportasi. Polusi udara menjadi isu yang tengah ada di Kota Tangerang Selatan saat ini.

Berdasarkan rilis IQ Air tahun 2019, Kota Tangerang Selatan menjadi kota dengan rata-rata setahun paling berpolusi di Indonesia. Menurut data-data yang didapat terdapat banyak faktor yang menjadi penyebab bertingkatnya polusi udara ini. Terjadinya peningkatan moda transportasi bermotor di kawasan Tangerang Selatan menjadi salah satu penyumbang polusi udara. Tribun Jakarta melaporkan; Menurut Peneliti Komunikasi Lingkungan, polusi udara di kota Tangerang sudah tercemar dan meningkat. Sesuai data tahun 2017-2018 tentang adanya peningkatan pencemaran udara yang berbanding lurus dengan peningkatan transportasi dan kegiatan industri (Fatin Izzatuljannah and Zakiah, 2021).

Organisasi Kesehatan Dunia (WHO) pada September 2021, menetapkan standar PM 2.5 rata-rata tahunan yang aman dihirup sebesar 5 mikrogram per meter kubik. Jika melebihi angka ini maka kondisi udara suatu daerah dinilai buruk. Jika terhirup, PM_{2.5} bisa berbahaya khususnya pada sistem pernapasan. Menurut data Nafas Indonesia, jika kedua wilayah tersebut dibandingkan dengan DKI Jakarta, maka pada bulan Juni 2022 akan mendapatkan hasil rata-rata: DKI Jakarta: PM_{2.5} sebesar 36 mikrogram per

kubik. Tangsel bagian utara: $PM_{2.5}$ sebesar 32 mikrogram per kubik, Tangsel bagian selatan: $PM_{2.5}$ sebesar 49 mikrogram per kubik. Maka terlihat di bulan Juni 2022, udara di daerah Tangsel utara lebih baik dibandingkan DKI Jakarta. Sementara Tangsel selatan, justru lebih buruk kualitas Udaranya dibanding DKI Jakarta.

Tangerang Selatan menjadi kota paling berpolusi udara di Indonesia menurut survei IQ Air 2019. Kualitas udara di Tangerang Selatan mencapai 81,3 permeter kubik ($\mu g/m^3$) yang tergolong tidak sehat. Selain Tangerang Selatan, udara di Bekasi juga dinyatakan tidak sehat dengan indeks AQI mencapai 62,6 $\mu g/m^3$. Udara yang tidak sehat dapat berdampak buruk bagi paru-paru hingga jantung. Lima kota lain di Indonesia juga memiliki kualitas udara yang tidak sehat bagi kelompok sensitif. Kota-kota tersebut adalah Pekanbaru, Pontianak, Jakarta, Sawahlunto, dan Surabaya. Meski sebagian besar disebabkan oleh kendaraan, polusi udara juga dapat disebabkan oleh keberadaan PLTU seperti yang terjadi di Sawahlunto. Adapun indeks kualitas di Sawahlunto sebesar 42,7 $\mu g/m^3$, lebih tinggi daripada Surabaya yang indeksnya sebesar 40,6 $\mu g/m^3$. Sementara kualitas udara di kota besar seperti Jakarta mencapai 49,4 $\mu g/m^3$. Tiga kota besar lainnya yang termasuk 10 kota paling berpolusi di Tanah Air berada di Ubud, Badung, dan Denpasar dengan kualitas udara sedang. Di Ubud indeks kualitas udaranya mencapai 27,9 $\mu g/m^3$. Sedangkan dua kota lainnya, Badung dan Denpasar indeks udaranya masing-masing 24,4 dan 22 $\mu g/m^3$.

Berdasarkan data yang didapat dari Lingkungan Hidup Republik Indonesia Nomor 10 Tahun 2012 menjelaskan bahwa gas buang kendaraan bermotor merupakan salah satu penyebab pencemaran udara yang penting. Jenis gas buang diantaranya Karbon Monoksida (CO) sebesar 70,5%, Hidrokarbon (HC) sebesar 18,34%, Oksida Nitrogen (NO_x) sebesar 8,89%, Partikulat sebesar 1,33% dan *Oksida Sulfida (Sox)* sebesar 0,88%. Sedangkan *Total Suspended Particulate* (TSP) merupakan salah satu polutan yang dihasilkan oleh kendaraan bermotor berbentuk campuran semua partikel dari beragam senyawa organik dan anorganik yang menjalar di udara dengan ukuran berdiameter mulai dari yang sangat kecil yakni 1 μm hingga 100 μm . *Total Suspended Particulate* (TSP) yang ada di udara dengan waktu yang relatif lama akan masuk ke dalam tubuh manusia melalui pernafasan manusia dan dapat menyebabkan gangguan kesehatan pada manusia.

Rekomendasi yang dibutuhkan untuk mengurangi adanya emisi udara diperlukan strategi pengelolaan. Strategi pengelolaan pengurangan emisi udara bertujuan untuk melaksanakan sistem transportasi yang lebih baik, standar emisi kendaraan yang lebih ketat dan insentif ekonomi untuk penggunaan teknologi udara bersih. Strategi pengelolaan yang digunakan dapat dilihat dari aspek teknis, aspek lingkungan maupun aspek peraturan. Salah satu solusi strategi pengelolaan untuk meningkatkan kualitas udara berupa pembuatan kebijakan- kebijakan lalu lintas (Jing *et al.*, 2016; Liu *et al.*, 2017; Song *et al.*, 2018; Cheng, Lu and Peng, 2020; Pařil and Tóthová, 2020) . Salah satu langkah kebijakan yang dilakukan berupa penggunaan angkutan umum, pemanfaatan jalan lingkar, perbaikan arus lalu lintas, mengurangi batas kecepatan bermotor dan implementasi daerah rendah emisi (Khardi and Bernoud-Hubac, 2022).

Perundang-undangan lingkungan hidup pada Undang-undang nomor 23 tahun 1997 telah menentukan sanksi yang berkaitan dengan penyebab terjadinya pencemaran udara, hal ini merupakan kebijakan Pemerintah dalam mengatur pola pengendalian dan masalah-masalah tersebut yang pada dasarnya merupakan akibat dari kegiatan manusia. Adapun penyebab permasalahannya, antara lain meliputi :

1. Kebijakan pengendalian pencemaran (udara) yang di dalamnya mengandung aturan, norma, etika, mekanisme dan prosedur, belum mampu mengendalikan, mengawasi dan menindaklanjuti pengurangan pencemaran udara SO_2 , $PM_{2,5}$, CO dan NO_2 .
2. Kualitas sumber daya manusia baik sebagai aparat birokrat, pemilik mobil, industriawan, maupun masyarakat yang berada di sekitar lokasi, belum memahami akibat pencemaran SO_2 , $PM_{2,5}$, CO dan NO_2 yang dapat mengganggu terhadap kegiatan sosial, ekonomi dan lingkungan kesehatan.
3. Kondisi lingkungan di kota mengalami penurunan kualitas baik secara fisika maupun kimia. Hal ini akibat kegiatan manusia dalam mengelola penghidupannya serta membuang sampah dan limbah sampai merusak dan mencemari udara khususnya oleh SO_2 , $PM_{2,5}$, CO dan NO_2 .

Pengurangan emisi yang dikeluarkan oleh kendaraan sangat penting dilakukan terutama melalui kebijakan Pemerintah Kota Tangerang Selatan. Saat ini belum ada kebijakan menyeluruh dan tegas dari pemerintah setempat untuk mengurangi emisi untuk mengurangi polusi udara, walaupun demikian

kebijakan yang secara tidak langsung mengurangi emisi bukannya tidak ada. Beberapa kebijakan yang dapat diusulkan antara lain pengaturan rute lalu lintas, pembatasan truk dan bus, pengembangan sistem angkutan massal dan uji emisi kendaraan.

Penelitian yang dilakukan oleh Ismiyati dkk. tahun 2014 mengenai Pencemaran Udara Akibat Gas Buang Kendaraan Bermotor merekomendasikan upaya yang dapat dilakukan menurunkan emisi gas buang antara lain: 1) Pemberian izin bagi angkutan umum kecil lebih dibatasi, sementara, kendaraan angkutan massal, diperbanyak; 2). Kontrol jumlah kendaraan pribadi; 3) Pembatasan usia kendaraan; 4) Pembangunan MRT dan pembuatan *Electronic Road Pricing*; 5). Pengaturan lalu lintas, rambu-rambu, dan tindakan tegas terhadap pelanggaran berkendara; 6). Uji emisi harus dilakukan secara berkala pada kendaraan umum maupun pribadi; dan 7) Penanaman pohon berdaun lebar di pinggir jalan yang lalu lintasnya padat serta di sudut-sudut kota. Menurut Joko Winarno (2014) umur ideal kendaraan umum adalah 7-10 tahun. Kendaraan dengan umur kisaran 7-10 tahun masih memenuhi ambang batas emisi gas buang yang diperbolehkan untuk kendaraan.

Strategi pengelolaan yang dipilih mempertimbangkan tingkat pencemaran dan penyebaran emisi untuk didapatkan strategi yang tepat guna mencegah penyakit akibat polusi udara. Secara teori untuk mengetahui tingkat pencemaran dan penyebaran emisi udara diperlukan sebuah model.

Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan (ARKL) merupakan suatu pendekatan untuk menghitung atau memprakirakan risiko pada kesehatan manusia, termasuk identifikasi terhadap adanya faktor ketidakpastian, penelusuran pada pajanan tertentu, memperhitungkan karakteristik yang melekat pada agen yang menjadi perhatian dan karakteristik dari sasaran yang spesifik. Dalam peraturan perundang-undangan Indonesia ARKL merupakan pendekatan ADKL. Landasan hukum ARKL untuk ADKL antara lain yaitu PerMenLH No.08/2006 tentang Pedoman Penyusunan Amdal, dan KepMenKes No. 876/Menkes/SK/ VIII/2001 tentang Pedoman Teknis ADKL. ARKL yang digunakan sebagai pendekatan ADKL merupakan alat untuk mengenal, memahami, dan meramalkan kondisi dan karakteristik lingkungan yang berpotensi menimbulkan risiko kesehatan sebagai dasar untuk menyusun atau mengembangkan pengelolaan dan pemantauan risiko

kesehatan lingkungan. ARKL juga merupakan suatu metode yang *adequate* untuk melakukan kajian dampak kesehatan kasus-kasus pencemaran secara umum (Ma'rufi, 2018).

Penggunaan model diharapkan dapat mengurangi adanya emisi udara sehingga dapat mencegah ataupun mengurangi efek penyakit dari pencemaran udara terhadap manusia dan lingkungan. Sedangkan Analisis Risiko kesehatan dan Lingkungan akan menjadi barometer risiko yang di dapatkan oleh individu maupun pada lingkungan akan besarnya beban pencemar yang ter ekspose oleh masyarakat dan pada Lingkungan.

B. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, dapat dirumuskan beberapa permasalahan, antara lain:

1. Bagaimana tingkat konsentrasi dan sebaran distribusi SO_2 , NO_2 , CO dan $\text{PM}_{2,5}$ di Tangerang selatan ?
2. Bagaimana pengaruh kelembaban, suhu dan arah angin terhadap konsentrasi SO_2 , NO_2 , CO dan $\text{PM}_{2,5}$ di Tangerang selatan ?
3. Bagaimana kondisi ekologis dan beban total polusi lingkungan akibat akumulasi SO_2 , NO_2 , CO dan $\text{PM}_{2,5}$ di Tangerang selatan selama 30 tahun yang akan datang ?
4. Bagaimana tingkat risiko kesehatan non-karsinogenik dan karsinogenik pada penduduk akibat ekspose SO_2 , NO_2 , CO dan $\text{PM}_{2,5}$ dengan menggunakan perhitungan (RQ) di Tangerang selatan ?
5. Bagaimana Menghitung tingkat risiko kesehatan non-karsinogenik dan karsinogenik pada penduduk akibat ekspose SO_2 , NO_2 , CO dan $\text{PM}_{2,5}$ Dengan *Target Hazard Quotient* (THQ) dan *Target Cancer Risks*?
6. Bagaimana model dan efek penerapan skenario dan rekayasa lingkungan yang diaplikasikan untuk menurunkan konsentrasi SO_2 , NO_2 , CO dan $\text{PM}_{2,5}$ di Tangerang selatan ?
7. Bagaimana estimasi risiko multi variabel faktor exposure akibat dampak bahan pencemar di udara (SO_2 , NO_2 , CO dan $\text{PM}_{2,5}$) dengan aplikasi Monte Carlo Simulation (MCS)?
8. Bagaimana rekomendasi scenario kebijakan terkait risiko kesehatan dan lingkungan yang dihadapi penduduk akibat ekspose SO_2 , NO_2 , CO dan $\text{PM}_{2,5}$ di Tangerang selatan ?

C. Tujuan Penelitian

1. Umum

Pengembangan model intervensi potensi risiko exposure melalui prediksi tingkat pencemaran SO₂, NO₂, CO dan PM_{2,5} di Udara selama 30 tahun dari emisi kendaraan serta strategi mitigasi di Kota Tangerang Selatan.

2. Tujuan Khusus

- a) Mengetahui tingkat konsentrasi dan sebaran distribusi SO₂, NO₂, CO dan PM_{2,5} di Tangerang selatan.
- b) Menganalisis pengaruh kelembaban, suhu dan arah angin terhadap konsentrasi SO₂, NO₂, CO dan PM_{2,5} di Tangerang selatan.
- c) Menganalisis risiko ekologis dan beban total polusi lingkungan akibat akumulasi SO₂, NO₂, CO dan PM_{2,5} di Tangerang selatan selama 30 tahun yang akan datang.
- d) Menghitung tingkat risiko kesehatan non-karsinogenik dan karsinogenik pada penduduk akibat ekspose SO₂, NO₂, CO dan PM_{2,5} akibat paparan Harian (RQ) di Tangerang selatan.
- e) Menghitung tingkat risiko kesehatan non-karsinogenik dan karsinogenik pada penduduk akibat ekspose SO₂, NO₂, CO dan PM_{2,5} akibat paparan *Target Hazard Quotient* (THQ) dan *Target Cancer Risks* (TCR) di Tangerang selatan.
- f) Membangun model dan efek penerapan skenario dan rekayasa lingkungan yang diaplikasikan untuk menurunkan konsentrasi SO₂, NO₂, CO dan PM_{2,5} di Tangerang selatan.
- g) Mengestimasi risiko dari multi variabel faktor exposure akibat dampak bahan pencemar diudara (SO₂, NO₂, CO dan PM_{2,5}) dengan Monte Carlo Simulation (MCS)
- h) Memberikan rekomendasi skenario kebijakan terkait risiko kesehatan dan lingkungan yang dihadapi penduduk akibat ekspose SO₂, NO₂, CO dan PM_{2,5} di Tangerang selatan.

D. Manfaat Penelitian

1. Manfaat Ilmiah

- a. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi dan menambah ilmu pengetahuan khususnya dalam bidang simulasi dengan

menggunakan permodelan dinamis menggunakan software Stella dan MCS

- b. Penelitian ini merupakan wahana untuk mengembangkan ilmu dan pengetahuan serta mengabdikan pengalaman dan keterampilan di lokasi penelitian

2. Manfaat Aplikatif

Hasil penelitian ini diharapkan dapat digunakan sebagai bahan pertimbangan dalam menentukan kebijakan khususnya terkait pengelolaan transportasi untuk mencegah dan minimasi penyakit akibat pencemaran udara di Tangerang Selatan.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

A. Tinjauan Pencemaran Udara

Pencemaran udara merupakan kehadiran satu atau lebih substansi fisik, kimia, atau biologi di atmosfer dalam jumlah yang dapat membahayakan kesehatan makhluk hidup, mengganggu estetika dan kenyamanan, atau merusak properti. Pencemaran udara adalah masuknya, atau tercampurnya unsur-unsur berbahaya ke dalam atmosfer yang dapat mengakibatkan terjadinya kerusakan lingkungan, gangguan pada kesehatan manusia secara umum serta menurunkan kualitas lingkungan. Pencemaran udara merupakan permasalahan yang rumit, karena menyangkut hal-hal yang berkaitan dengan karakteristik fisik, sumber emisi zat pencemar (macam sumber, laju pencemaran, kecepatan dan tinggi emisi, elemen iklim yang mempengaruhi penyebaran zat pencemar di lokasi di mana zat pencemar diemisikan maupun kondisi iklim lokal di daerah penerima pencemaran udara) (Hasairin, 2018).

Pencemaran udara adalah kehadiran materi yang tidak diinginkan di udara dalam jumlah cukup besar yang dapat memberikan efek yang berbahaya. Materi-materi yang tidak diinginkan tersebut dapat membahayakan kesehatan makhluk hidup, mengganggu estetika dan kenyamanan dan menyebabkan kerusakan lingkungan. Berdasarkan Peraturan Pemerintah RI Tahun 1999 mengenai Pengendalian Pencemaran Udara, pencemaran udara adalah masuknya zat, energi dan/atau komponen lain ke dalam udara ambien oleh kegiatan manusia sehingga mutu udara ambien turun sampai ke tingkat tertentu yang menyebabkan menurunnya kualitas udara ambien (Khardi and Bernoud-Hubac, 2022; Maherdyta *et al.*, 2022)

Menurut Harahap (2003), udara bersih yang dihirup manusia dan hewan merupakan gas yang tidak tampak, tidak berbau, tidak berwarna atau berasa. Meskipun demikian udara yang benar-benar bersih sulit didapatkan terutama di kota besar yang berlalulintas yang padat. Udara yang mengandung zat pencemar dalam hal ini disebut udara tercemar.

Udara yang tercemar tersebut dapat merusak lingkungan dan kehidupan manusia. Kerusakan lingkungan berarti berkurangnya daya dukung alam terhadap kehidupan yang pada gilirannya akan mengurangi kualitas hidup manusia secara keseluruhan. Keadaan ini dengan domain triaspek

pembangunan berkelanjutan yaitu rusaknya suatu ekologi akan membebani sosial ekonomi masyarakat setempat.

1. Sumber Pencemaran udara

Pada wilayah perkotaan, sebagian besar pencemaran udara disebabkan karena pembakaran sumber energi yang kekuatan emisinya sangat bergantung pada intensitas aktivitas antropogenik di daerah yang bersangkutan. Emisi pencemaran umumnya dihasilkan dari berbagai aktifitas kehidupan manusia jauh lebih besar daripada emisi pencemar dari sumber alami. Sumber pencemar alami hanya memberikan kontribusi terhadap konsentrasi latar di daerah perkotaan dan tidak memberikan dampak yang signifikan, sedangkan kualitas udara ambien lebih dipengaruhi oleh aktivitas kehidupan manusia.

Senyawa pencemar udara berdasarkan sifatnya dibagi menjadi empat kelompok seperti yang dikemukakan oleh Meetham dalam (Sun *et al.*, 2020) yaitu :

- a) Senyawa yang bersifat reaktif.
- b) Partikel-partikel halus yang tersangga di stratosfer dalam jangka waktu yang lama.
- c) Partikel-partikel kasar yang segera jatuh ke tanah dan yang berbentuk senyawa organik dan senyawa SO_2 akan berfungsi selaku prototipe senyawa pencemar udara yang lain.
- d) Partikel-partikel halus terutama berbentuk kabut yang berasal dari proses pembakaran bahan bakar yang tidak sempurna. Pencemar udara dihasilkan oleh alam dan juga terutama oleh kegiatan manusia (man-made pollution).

2. Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Penyebaran Pencemar

Penyebaran polutan di atmosfer dipengaruhi oleh beberapa faktor. Menurut Stull dan Ainslie (2006), penyebaran polutan di atmosfer melibatkan tiga mekanisme utama yaitu gerakan udara secara global, fluktuasi kecepatan turbulensi yang akan menyebarkan polutan ke seluruh arah, dan difusi massa akibat perbedaan konsentrasi. Penyebaran cemar dari suatu sumber emisi selain dipengaruhi oleh karakteristik sumber emisi juga dipengaruhi oleh karakteristik meteorologi dan topografi setempat. Menurut Sastrawijaya (2000), konsentrasi pencemar di udara bergantung kepada kondisi cuaca. Kecepatan dan arah angin berhembus,

distribusi suhu vertikal, dan kelembaban adalah unsur-unsur yang berperan dalam perubahan cuaca ini. Kecepatan angin mempengaruhi distribusi pencemar. Konsentrasi pencemar akan berkurang jika angin kencang dan membagikan pencemar ini secara mendatar atau tegak lurus. Permukaan daratan juga mempengaruhi kecepatan angin, apakah berbukit-bukit atau berlembah-lembah. Lorong sempit bagi angin dapat meningkatkan kecepatan hembusan angin. Perubahan suhu juga merupakan faktor pengubah yang besar. Pergolakan ke atas akan membawa pencemar ke daerah yang suhunya lebih rendah. Pencemar akan menurun konsentrasinya dan kemudian disebarkan angin (Järup *et al.*, 2001; D'Amato *et al.*, 2019).

3. Dampak Pencemaran Udara

Udara yang tercemar partikel dan gas dapat menyebabkan gangguan kesehatan yang terutama terjadi pada fungsi faal dari organ tubuh seperti paru-paru dan pembuluh darah atau menyebabkan iritasi pada mata dan kulit. Pencemaran karena partikel dan debu biasanya menyebabkan penyakit pernapasan kronis seperti, bronchitis kronis, emfisema paru, asma bronchial dan kanker paru. Bahan pencemar gas yang terlarut dalam udara dapat langsung masuk ke dalam tubuh sampai ke paru-paru yang akhirnya diserap oleh sistem pembuluh darah. Bahan pencemar udara dapat pula berupa jelaga (*soot*) dan debu halus yang dapat menghalangi radiasi matahari (Fatin Izzatuljannah and Zakiah, 2021).

Dampak dari pencemaran gas CO yaitu gas CO sangat reaktif terhadap Hb dalam darah dengan afinitas 250 kali lebih besar jika dibandingkan dengan afinitas terhadap oksigen. CO dan Hb akan membentuk senyawa COHb yang sangat stabil dalam darah. Tubuh akan menderita kekurangan oksigen karena Hb darah tidak lagi dapat berfungsi menyerap dan membawa oksigen (Ma'rufi, 2018).

Pencemaran udara dapat menyebabkan kerusakan terhadap manusia dan lingkungan. Pencemaran udara meningkat mempengaruhi produktivitas pertanian, merusak bahan-bahan, berdampak negatif terhadap ekosistem, dan menyebabkan gangguan estetika. Dari seluruh dampak tersebut, dampak terhadap kesehatan dan kesejahteraan manusia adalah yang dominan dengan kontribusi kurang lebih 90% dari total kerusakan akibat pencemaran udara (Manisalidis *et al.*, 2020).

B. Emisi Kendaraan Bermotor

Emisi gas buang didefinisikan sebagai hasil dari pembakaran bahan bakar dan udara, terdiri dari banyak komponen gas yang sebagian besar merupakan polusi bagi lingkungan hidup. Gas yang menjadi polusi tersebut kebanyakan merupakan hasil dari reaksi sampingan yang tidak dapat dihindarkan. Sebagaimana diketahui bahwa udara di sekitar kita mengandung kurang lebih 21% Oksigen dan 79% terdiri dari sebagian besar Nitrogen dan sisanya gas-gas lain dalam jumlah yang sangat kecil, sedangkan bahan bakar pada umumnya berbentuk ikatan karbon (C_xH_y) yang juga mengandung unsur lain yang terikat kedalamnya.

Polusi udara adalah masuknya bahan-bahan pencemar ke dalam udara ambien yang dapat mengakibatkan rendahnya bahkan rusaknya fungsi udara. Dari penjelasan di atas dapat disimpulkan bahwa emisi gas buang kendaraan bermotor adalah masuknya senyawa-senyawa berbahaya hasil pembakaran kendaraan bermotor yang mengakibatkan rendahnya bahkan rusaknya fungsi udara

1. Pengertian Emisi Kendaraan Bermotor

Menurut PP No. 41 tahun 1999 tentang Pengendalian Pencemaran Udara yang dimaksud dengan emisi adalah zat, energi dan/atau komponen lain yang dihasilkan dari suatu kegiatan yang masuk dan/atau dimasukkannya ke dalam udara ambien yang mempunyai dan/atau tidak mempunyai potensi sebagai unsur pencemar. Sumber emisi adalah setiap usaha dan/atau kegiatan yang mengeluarkan emisi dari sumber bergerak, sumber bergerak spesifik, sumber tidak bergerak maupun sumber tidak bergerak spesifik.

2. Zat-Zat Emisi Kendaraan Bermotor

Kendaraan bermotor baik yang menggunakan bahan bakar bensin maupun dengan bahan bakar solar (diesel) mengeluarkan gas buang yang terdiri dari CO_2 , CO, NO_2 , H_2 , hidrokarbon, dan SO_2 . Komposisi gas buang tersebut dari pembakaran bensin dan solar dalam volume bahwa 75% gas CO di atmosfer bersumber dari emisi kendaraan bermotor. Oleh karena itu gas pencemar udara ini merupakan suatu masalah di daerah yang padat lalu-lintas. Gas ini dapat bertahan di udara selama tiga tahun. Jumlah gas buang yang diemisikan oleh kendaraan ditentukan oleh kecepatan kendaraan, umur kendaraan dan perawatan kendaraan. Pemasangan anti

pencemaran pada kendaraan bermotor dapat menurunkan emisi gas buang.

C. Bahan Pencemar SO_2 , NO_2 , CO dan $\text{PM}_{2.5}$

1. Sulfur Dioksida SO_2

a. Definisi

SO_2 merupakan rumus kimia untuk gas Sulfur dioksida. Gas ini berasal dari hasil pembakaran bahan bakar yang mengandung sulfur dan sukar dideteksi karena merupakan gas tidak berwarna. Selain dari bahan bakar, sulfur juga terkandung dalam pelumas. SO_2 merupakan gas yang tidak berwarna, tidak *flammable* (tidak mudah terbakar), maupun tidak *explosive* (tidak mudah meledak).

b. Karakteristik SO_2

Sulfur dioksida adalah salah satu spesies dari gas-gas oksida sulfur (SO_x). Gas ini sangat mudah terlarut dalam air, memiliki bau namun tidak berwarna, SO_2 dan gas-gas oksida sulfur lainnya terbentuk saat terjadi pembakaran bahan bakar fosil yang mengandung sulfur. Sulfur sendiri terdapat dalam hampir semua material mentah yang belum diolah seperti minyak mentah, batu bara, dan bijih-bijih yang mengandung metal seperti aluminium, tembaga, seng, timbal dan besi. Di daerah perkotaan, yang menjadi sumber sulfur utama adalah kegiatan pembangkit tenaga listrik, terutama yang menggunakan batu bara ataupun minyak diesel sebagai bahan bakarnya, juga gas buang dari kendaraan yang menggunakan diesel dan industri-industri yang menggunakan bahan bakar batu bara dan minyak mentah (Amin & Vyas, 2016).

c. Sumber SO_2

Pencemaran SO_2 diudara terutama berasal dari pemakaian batu bara yang digunakan pada kegiatan industri, transportasi, dan lain sebagainya. Belerang dalam batu bara berupa mineral besi peritis atau FeS_2 dan dapat pula berbentuk mineral logam sulfida lainnya seperti PbS , HgS , ZnS , CuFeS_2 dan Cu_2S . Dalam proses industri besi dan baja (tanur logam) banyak dihasilkan SO_2 karena mineral-mineral logam banyak terikat dalam bentuk sulfida. Pada proses peleburan sulfida logam diubah menjadi oksida logam. Proses ini juga sekaligus

menghilangkan belerang dari kandungan logam karena belerang merupakan pengotor logam. Pada suhu tinggi sulfida logam mudah dioksidasi menjadi oksida logam. Sebagai pencemar udara, SO_2 diperkirakan memiliki waktu tinggal dalam udara antara 2 sampai 4 hari, dan dalam waktu tinggal tersebut SO_2 dapat ditransportasikan sejauh 1000 km, sehingga dapat dikatakan SO_2 relatif stabil dalam atmosfer. Sehingga masalah pencemaran SO_2 menjadi masalah internasional (Ioannis Manisalidis & Agathangelos Stavropoulos, 2020).

SO_2 dan gas-gas oksida sulfur lainnya terbentuk saat terjadi pembakaran bahan bakar fosil yang mengandung unsur sulfur. Sulfur sendiri terdapat dalam hampir semua material mentah yang belum diolah seperti minyak mentah, batu bara, dan bijih-bijih yang mengandung metal seperti aluminium, tembaga, seng, timbal dan besi. Menurut Sudrajad (2009), emisi SO_2 terbentuk dari fungsi kandungan sulfur dalam bahan bakar, selain itu kandungan sulfur dalam pelumas juga menjadi penyebab terbentuknya emisi SO_2 (Wang *et al.*, 2020).

d. Dampak Lingkungan Pencemaran SO_2

Tingginya kadar SO_2 di udara merupakan salah satu penyebab terjadinya hujan asam. Hujan asam disebabkan oleh belerang (sulfur) yang merupakan pengotor dalam bahan bakar fosil serta nitrogen di udara yang bereaksi dengan oksigen membentuk sulfur dioksida dan nitrogen oksida. Zat-zat ini berdifusi ke atmosfer dan bereaksi dengan air untuk membentuk asam sulfat dan asam nitrat yang mudah larut sehingga jatuh bersama air hujan. Air hujan yang asam tersebut akan meningkatkan kadar keasaman tanah dan air permukaan yang terbukti berbahaya bagi kehidupan ikan dan tanaman (Maherdyta *et al.*, 2022).

Kelebihan zat asam pada danau akan mengakibatkan sedikitnya species yang bertahan. Jenis Plankton dan invertebrate merupakan makhluk yang paling pertama mati akibat pengaruh pengasaman. Apa yang terjadi jika danau memiliki pH dibawah 5, lebih dari 75 % dari spesies ikan akan hilang. Ini disebabkan oleh pengaruh rantai makanan, yang secara signifikan berdampak pada keberlangsungan suatu ekosistem. Tidak semua danau yang terkena hujan asam akan menjadi pengasaman, dimana telah ditemukan jenis batuan dan tanah

yang dapat membantu menetralkan keasaman. Selain menyebabkan hujan asam, SO₂ juga dapat mengurangi jarak pandang karena gas maupun partikel SO₂ mampu menyerap cahaya sehingga menimbulkan kabut (Ma'rufi, 2018).

Sulfur dioksida juga berbahaya bagi tanaman. Adanya gas ini pada konsentrasi tinggi dapat membunuh jaringan pada daun. pinggiran daun dan daerah diantara tulang-tulang daun rusak. Secara kronis SO₂ menyebabkan terjadinya khlorosis. Kerusakan tanaman ini akan diperparah dengan kenaikan kelembaban udara. SO₂ diudara akan berubah menjadi asam sulfat. Oleh karena itu, didaerah dengan adanya pencemaran oleh SO₂ yang cukup tinggi, tanaman akan rusak oleh aerosol asam sulfat (Ma'rufi, 2018).

Kadar SO₂ yang tinggi di hutan menyebabkan noda putih atau coklat pada permukaan daun, jika hal ini terjadi dalam jangka waktu yang lama akan menyebabkan kematian tumbuhan tersebut. Efek dari daun yang terkena deposisi asam menunjukkan kadar magnesium yang rendah. Sedangkan magnesium merupakan salah satu nutrisi assensial bagi tanaman. Kekurangan magnesium disebabkan oleh pencucian magnesium dari tanah karena pH yang rendah dan kerusakan daun meyebabkan pencucian magnesium di daun (Mallongi, 2021).

e. Dampak Kesehatan Pencemaran SO₂

SO₂ menyebabkan iritasi pada saluran pernafasan manusia yang bersifat kronik, selain itu SO₂ juga dapat dapat menyebabkan infeksi pada saluran pernapasan utama (*bronhitis*) dan penyakit paru-paru yang berkepanjangan (*pulmonary emiphysema*). Selain itu SO₂ juga dapat menyebabkan gangguan pencernaan, sakit kepala, sakit dada, dan saraf. Pada kadar dibawah batas ambang dapat menyebabkan kematian. Korban SO₂ bukan hanya manusia, tetapi juga bangunan dan tumbuhan. Keberadaan gas ini di udara dapat menimbulkan hujan asam yang dapat merusak bahan bangunan dan menghambat pertumbuhan tanaman. Standar baku mutu yang diperbolehkan menurut Peraturan Gubernur Jatim 10/2009 adalah 262 µg/Nm³.

2. Nitrogen Oksida (NO₂)

a. Definisi

Nitrogen dioksida adalah kelompok zat yang terdapat di atmosfer yang merupakan campuran dari gas nitrogen dan oksigen. Nitrogen dioksida mempunyai warna coklat kemerahan dan berbau tajam. Pembentukan NO₂ mencakup reaksi antara nitrogen dan oksigen di udara. Nitrogen dioksida (NO₂) merupakan kontributor utama pembentukan kabut asap dan prekursor banyak polutan sekunder berbahaya, termasuk ozon dan partikel. Ini sangat reaktif dengan bahan kimia lain dan merupakan oksidator kuat.

b. Karakteristik NO₂

Nitrogen oksida (NO_x) adalah senyawa gas di atmosfer yang merupakan komponen besar yang terdiri dari nitrit oksida (NO) dan nitrogen dioksida (NO₂) serta berbagai jenis oksida dalam jumlah yang sedikit. Gas-gas tersebut mempunyai sifat yang sangat berbeda pada setiap gasnya dan gas-gas tersebut sangat berbahaya bagi kesehatan (Maherdyta *et al.*, 2022).

Nitrogen dioksida adalah gas toksik, kelarutannya dalam air rendah, tetapi mudah larut dalam larutan alkali, karbon disulfida dan kloroform. Gas ini berwarna coklat kemerahan dan pada suhu di bawah 21,2°C akan berubah menjadi cairan berwarna kuning. Baunya khas dan mengganggu bahkan dapat mengiritasi seluruh nafas pada konsentrasi 1-3 ppm (Hidayat, 2015). Jumlah NO di udara lebih besar daripada NO₂. Pembentukan NO dan NO₂ merupakan reaksi antara nitrogen dan oksigen di udara sehingga membentuk NO, yang bereaksi lebih lanjut dengan lebih banyak oksigen membentuk NO₂ (Maherdyta *et al.*, 2022).

c. Sumber Sumber NO₂

NO₂ tidak secara langsung dilepaskan langsung ke udara. NO₂ terbentuk ketika nitrogen oksida (NO) dan lainnya (NO_x) bereaksi dengan bahan kimia lain di udara untuk membentuk nitrogen dioksida. Sumber utama nitrogen dioksida yang dihasilkan dari aktivitas manusia adalah pembakaran bahan bakar fosil (batubara, gas dan minyak), terutama bensin digunakan oleh kendaraan bermotor. Di daerah perkotaan, 80% NO₂ dihasilkan oleh kendaraan bermotor. NO₂ juga dihasilkan dari proses pembuatan asam nitrat, pengelasan dan

penggunaan bahan peledak. Sumber – sumber lain NO_2 yaitu proses penyulingan bensin dan logam, industri pengolahan komersial, dan industri pengolahan makanan, sumber alaminya yaitu gunung berapi dan bakteri.

Di atmosfer, gas ini akan mengalami siklus fotolitik NO_2 bersama dengan gas NO dan oksigen dengan bantuan sinar matahari. Siklus fotolitik ini dapat terganggu jika dalam terdapat hidrokarbon (HC). HC akan berinteraksi dengan atom oksigen membentuk radikal bebas HC yang sangat reaktif. Radikal bebas HC akan cepat bereaksi dengan NO sehingga konsentrasi NO_2 semakin meningkat. Selain itu, radikal bebas HC dapat bereaksi dengan O_2 dan NO_2 membentuk *Peroxy Acetyl Nitrates* (PAN). Campuran antara PAN dengan ozon (O_3) dan karbonmonoksida (CO) akan membentuk kabut foto kimia (Amin and Vyas, 2016).

d. Keberadaan NO_2 di Udara

Jumlah NO di udara lebih besar daripada NO_2 . Pembentukan NO dan NO_2 merupakan reaksi antara nitrogen dan oksigen di udara sehingga membentuk NO , yang bereaksi lebih lanjut dengan lebih banyak oksigen membentuk NO_2 . Udara terdiri dari 80% nitrogen dan 20% oksigen. Pada suhu kamar, hanya sedikit kecenderungan nitrogen dan oksigen untuk bereaksi satu sama lainnya. Pada suhu yang lebih tinggi (diatas 1210°C) kedua zat tersebut dapat bereaksi membentuk NO dalam jumlah banyak sehingga dapat mengakibatkan pencemaran udara. Mulai tahun 2015 terjadi peningkatan konsentrasi NO_2 di udara ambien pada sebagian wilayah bagian utara Portugal (Torres *et al.*, 2018).

Dalam proses pembakaran, suhu yang digunakan biasanya mencapai $1210\text{--}1.765^\circ\text{C}$. Oleh karena itu reaksi ini merupakan sumber NO yang penting. Jadi, reaksi pembentukan NO merupakan hasil samping dari proses pembakaran

e. Dampak Lingkungan Pencemaran NO_2

Pencemaran udara oleh gas NO_2 dapat menyebabkan timbulnya *Peroxy Acetyl Nitrates* ini menyebabkan iritasi pada mata yang menyebabkan mata terasa pedih dan berair. Campuran PAN bersama senyawa kimia lainnya yang ada di udara sehingga dapat

menyebabkan terjadinya kabut fotokimia atau Photo Chemistry smog yang akan berdampak terhadap lingkungan dan bersifat karsinogenik. Salah satu dampak terhadap lingkungan di jalan raya yaitu akibat timbulnya asap tebal yang dapat mengakibatkan berkurangnya jarak pandang sehingga bisa menyebabkan kecelakaan (Prasetyo, Mallongi and Amqam, 2020).

Photo Chemistry Smog atau asap kabut fotokimia merupakan campuran kompleks dari berbagai macam pencemar yang terbentuk karena reaksi-reaksi kimia yang terjadi dengan sinar matahari. Asap kabut fotokimia disebabkan oleh beberapa senyawa polutan dari beberapa sumber yang merupakan aktivitas manusia sehari-hari.

f. Dampak Kesehatan Pencemaran NO₂

Pajanan nitrogen dioksida sangat berpengaruh pada saluran pernapasan. Bukti ilmiah menunjukkan bahwa pajanan NO₂ selama 30 menit hingga 24 jam akan membawa efek yang merugikan bagi pernapasan yaitu inflamasi atau peradangan saluran nafas pada orang sehat dan peningkatan gejala pada penderita asma. Beberapa studi juga menunjukkan bahwa terdapat hubungan antara peningkatan konsentrasi NO₂ dengan peningkatan kunjungan rumah sakit dan UGD yang berkaitan dengan penyakit pernapasan terutama asma (Hidayat, 2015).

Pengaruh pajanan NO₂ ditentukan oleh konsentrasi saat pajanan, proses akut atau kronik serta lama pajanan. Gejala yang dapat terjadi akibat pajanan NO₂ meliputi asfiksi, edema paru, batuk, sesak, sianosis dan bronkiolitis obliterans. Selain itu, pajanan NO₂ juga mempunyai efek toksik langsung terhadap makrofag alveolar sehingga mengurangi daya fagosit dan aktivitas bakterisidal. Hal ini meningkatkan kemungkinan terjadi infeksi bakteri pada saluran pernapasan. Pajanan NO₂ juga menimbulkan gangguan seksual mukus, kerusakan silia dan gangguan imunitas humoral.

Selain itu, inhalasi NO₂ dapat memicu eksasirbasi asma dan meningkatkan frekuensi infeksi tergantung konsentrasi dan cara pajanan. Karena itulah NO₂ akan terasa pedih jika mengenai mata, hidung, saluran pernapasan dan jantung. Pada konsentrasi tinggi NO₂

dapat menyebabkan edema atau pembengkakan paru dan dapat menimbulkan kematian (Sastrawijaya, 2000).

Frekuensi pajanan NO_2 konsentrasi tinggi dapat menurunkan fungsi paru-paru khususnya pada anak-anak. Hal ini dapat menurunkan pertahanan terhadap penyakit paru-paru, agen bronchoconstrictive dan penyebab iritasi lainnya NO_2 juga meningkatkan risiko untuk gangguan kelahiran termasuk berat lahir rendah, prematuritas, gangguan pertumbuhan intra-uterus, cacat lahir, dan kelahiran mati. Karena NO_2 datang terutama pada sumber kendaraan, NO_2 juga sangat terkait dengan PM, dan dengan demikian sangat sulit untuk membedakan efek dari masing-masing polutan lain dalam studi epidemiology (Liliskarlina 2015). NO_2 dapat mengiritasi hidung dan tenggorokan, terutama pada orang dengan asma, dan meningkatkan kerentanan terhadap infeksi pernapasan. Ozon yang terbentuk ketika gas NO_2 dan gas lain bereaksi dengan adanya sinar matahari

3. Karbon Monoksida (CO)

a. Definisi

Karbon Monoksida merupakan senyawa gas yang tidak berwarna, tidak berbau yang dihasilkan dari pembakaran tidak sempurna bahan yang mengandung zat arang atau bahan organik, baik dari kegiatan industri ataupun lingkungan. CO terdiri dari satu atom karbon yang berikatan dengan satu atom oksigen. Gas CO berbentuk cairan pada suhu dibawah -129°C . Sebagian besar gas CO berasal dari pembakaran bahan bakar fosil berupa gas buang. Paparan CO dikota besar padat lalu lintas kadar CO lebih tinggi dibandingkan di pedesaan. Karena dikota besar banyak menghasilkan gas CO, sehingga kadar CO relatif tinggi.

b. Karakteristik CO

CO adalah gas yang tidak berwarna, tidak berbau maupun berasa yang timbul akibat pembakaran tidak sempurna bahan bakar yang mengandung karbon. Gas ini tergolong kategori mudah terbakar dan beracun. Sumber CO terbagi dua, yaitu sumber alami dan sumber antropogenik. Secara alami CO dihasilkan dari aktivitas gunung berapi dan juga kebakaran hutan. Sementara CO juga dihasilkan sebagai

produk sampingan aktivitas manusia, diantaranya kendaraan bermotor (lebih dari 75%).

Emisi CO umumnya meningkat saat terjadi kemacetan di jalan. Selain itu CO juga dihasilkan dari aktivitas transportasi lain seperti pesawat terbang dan kereta api, proses pembakaran bahan bakar, pembakaran kayu, pembakaran sampah serta aktivitas industri (Maherdyta *et al.*, 2022).

c. Sumber Sumber CO

Sumber CO buatan antara lain adalah kendaraan bermotor, dimana konsentrasi CO sangat dipengaruhi oleh aktivitas kendaraan bermotor terutama yang menggunakan bahan bakar bensin. Separuh dari jumlah ini berasal dari kendaraan bermotor yang menggunakan bahan bakar bensin dimana kendaraan bermotor merupakan sumber utama polutan CO sekitar 59,2% dan sepertiganya berasal dari sumber tidak bergerak seperti pembakaran batubara dan minyak dari industri dan pembakaran sampah domestik. Kadar CO diperkotaan cukup bervariasi tergantung dari kepadatan kendaraan bermotor yang menggunakan bahan bakar bensin dan umumnya ditemukan kadar maksimum CO yang bersamaan dengan jam-jam sibuk pada pagi dan malam hari.

Beberapa Individu juga dapat terpajan oleh CO karena lingkungan kerjanya. Kelompok masyarakat yang paling terpajan oleh CO termasuk polisi lalu lintas atau tukang pakir, pekerja bengkel mobil, petugas industri logam, industri bahan bakar bensin, industri gas kimia dan pemadam kebakaran (Amin and Vyas, 2016)

d. Dampak Kesehatan Pencemaran CO

Karakteristik biologik yang paling penting dari CO adalah kemampuannya untuk berikatan dengan haemoglobin, pigmen sel darah merah yang mengangkut oksigen keseluruh tubuh. Sifat ini menghasilkan pembentukan karboksihaemoglobin (HbCO) yang 200 kali lebih stabil dibandingkan oksihemoglobin (HbO₂). Penguraian HbCO ang relatif lambat menyebabkan terhambatnya kerja molekul sel pigmen tersebut dalam fungsinya membawa oksigen keseluruh tubuh. Kondisi seperti ini bisa berakibat serius, bahkan fatal, karena dapat menyebabkan keracunan. Selain itu, metabolisme otot dan

fungsi enzim intraseluler juga dapat terganggu dengan adanya ikatan CO yang stabil tersebut. Dampak keracunan CO sangat berbahaya bagi orang yang telah menderita gangguan pada otot jantung atau sirkulasi darah perifer yang parah.

4. Partikulat Matter (PM_{2,5})

a. Definisi PM_{2,5}

Polusi udara adalah campuran kompleks partikel (PM), gas dan molekul molekul yang terus berinteraksi satu sama lain di atmosfer. Particulate matter (PM) itu sendiri adalah campuran dari beberapa senyawa (misalnya, organik dan unsur karbon, logam transisi, nitrat dan sulfat) mulai dari ukuran beberapa nanometer sampai yang berdiameter >10 mm. Particulate matter (PM) adalah salah satu parameter polutan udara. Particulate matter 2,5 (debu partikulat 2,5) adalah partikel dengan diameter aerodinamik lebih kecil dari 2,5 µm. Unsur partikulat ini dapat mempengaruhi kesehatan manusia sebagai reseptor terutama menyebabkan gangguan pada sistem respirasi.

b. Karakteristik PM_{2,5}

PM_{2,5} merupakan debu partikulat yang memiliki diameter aerodinamik 2.5 µm yang dikumpulkan dengan 50% efisiensi oleh pengumpulan sampling PM_{2,5}. EPA membedakan PM_{2,5} dengan fine dan coarse particle. Komposisi pembentuk PM_{2,5} terdiri dari *sulfat, nitrat, organic compounds, ammonium compounds, metal, acidic material*, dan bahan kontaminan lain yang dipercaya dapat memberikan efek buruk bagi kesehatan (World Health Organization, 2005).

c. Sumber- Sumber PM_{2,5}

Sumber PM_{2,5} secara alamiah adalah dari debu tanah kering yang terbawa angin, abu dan bahan-bahan vulkanik yang terlempar ke udara akibat letusan gunung berapi, dan semburan uap air panas di sekitar daerah sumber panas bumi. Sementara sumber PM_{2,5} akibat perbuatan manusia adalah sebagian besar berasal dari pembakaran batubara, proses industri, kebakaran hutan, dan gas buangan alat transportasi. Jenis industri yang berpotensi sebagai sumber PM_{2,5} adalah industri besi dan baja, industri semen, industri petrokimia, industri kertas dan

pulp, pabrik tepung, industri tekstil, pabrik asbes, pabrik insektisida, dan industri elektronika (Cottrell, 2020).

d. Keberadaan $PM_{2,5}$ di Udara

Partikel debu $\leq 2,5$ mikrometer ($PM_{2,5}$) merupakan suatu polutan yang terdapat di udara. Partikel debu ini memiliki diameter $\leq 2,5$ mikrometer dan lebih kecil $1/30$ bagian dari diameter rambut manusia. Konsentrasi $PM_{2,5}$ di udara dapat mempengaruhi kesehatan apabila terhirup oleh manusia. $PM_{2,5}$ yang terhirup akan masuk ke dalam alveoli sehingga menimbulkan reaksi radang yang mengakibatkan daya kembang paru menjadi terbatas. Salah satu dampak negatif yang timbul akibat pajanan $PM_{2,5}$ adalah penurunan fungsi paru pada manusia. Penurunan fungsi paru merupakan indikator yang digunakan untuk menentukan infeksi saluran pernapasan kronik. WHO menyatakan bahwa pada tahun 2008 telah meninggal 4,2 juta orang akibat infeksi saluran pernapasan kronik.

e. Dampak Lingkungan Pencemaran $PM_{2,5}$

$PM_{2,5}$ dapat menyebabkan kerusakan lingkungan seperti kerusakan material dan bangunan, deposisi asam, peningkatan kadar ozon, merusak vegetasi jika mengendap di tanaman dan hutan, serta mengubah keseimbangan nutrisi saat terbawa ke perairan pantai dan daerah aliran sungai (World Health Organization, 2005).

f. Dampak Kesehatan Pencemaran $PM_{2,5}$

Ukuran mikroskopis $PM_{2,5}$ meningkatkan potensinya untuk bersarang jauh ke dalam saluran pernapasan. Pada 2,5 mikron, $PM_{2,5}$ mampu memasuki sistem peredaran darah dan bahkan otak. Gejala jangka pendek dari paparan partikulat tingkat tinggi termasuk iritasi tenggorokan dan saluran udara, batuk, dan kesulitan bernapas (World Health Organization, 2005).

Konsentrasi $PM_{2,5}$ juga dapat menyebabkan penyakit kardiovaskular seperti hipertensi dan infark miokardial (Utami, Asyary, Zakianis, 2020). Hal ini dibuktikan pada penelitian di pusat kota Amerika Serikat yang menyatakan bahwa peningkatan konsentrasi $PM_{2,5}$ dalam setahun berkaitan dengan jumlah kematian yang disebabkan oleh penyakit kardiovaskular (Ramacher et al., 2020).

D. Analisis Resiko Kesehatan Lingkungan

Keputusan Menteri Kesehatan No. 876 Tahun 2001 tentang Pedoman Teknis Analisis Dampak Kesehatan Lingkungan (ADKL). Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan (ARKL) didefinisikan sebagai suatu pendekatan untuk mencermati potensi besarnya risiko yang dimulai dengan mendeskripsikan masalah lingkungan yang telah dikenal dan melibatkan penetapan risiko pada kesehatan manusia yang berkaitan dengan masalah lingkungan yang bersangkutan. Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan masih jarang digunakan dalam kajian dampak lingkungan terhadap kesehatan masyarakat. Kebanyakan analisis dilakukan secara konservatif dengan studi epidemiologi.

Indikator lingkungan membantu melacak perubahan dalam lingkungan dengan memilih langkah-langkah utama, yang dapat berupa fisik, kimia, biologis, atau sosial ekonomi yang kemudian memberikan informasi berguna tentang keseluruhan sistem. Penting untuk mengevaluasi kondisi fundamental lingkungan menggunakan indikator tanpa harus menangkap kompleksitas penuh dari sistem (Krishna *et al.*, 2017). Penilaian risiko merupakan *tool* pengelolaan risiko yang diklasifikasikan dalam bentuk karakterisasi efek-efek yang berpotensi merugikan kesehatan dan lingkungan di sekitar manusia (Kementerian Kesehatan, 1999). Analisis ini dimulai dengan menilai, mengatur, menentukan dan mengkomunikasikan risiko.

ARKL tidak dimaksudkan untuk mencari indikasi atau menguji hubungan atau pengaruh dampak lingkungan terhadap kesehatan (kejadian penyakit yang berbasis lingkungan) melainkan untuk menghitung atau menaksir risiko yang telah, sedang dan akan terjadi. Efek tersebut, yang dinyatakan sebagai nilai kuantitatif dosis-respon, harus sudah ditegakkan lebih dahulu, yang didapat dari luar sumber-sumber populasi yang dipelajari, bahkan dari studi-studi toksisitas uji hayati (bioassay) atau studi keaktifan biologis *risk agent*. ARKL dalam besaran risiko (dinyatakan sebagai RQ untuk non- karsinogenik dan ECR untuk karsinogenik) tidak dibaca sebagai per-bandingan lurus (*directly proportional*) melainkan sebagai probabilitas.

1. Konsep dan Definisi ARKL

Penilaian risiko kesehatan manusia didefinisikan oleh Badan Perlindungan Lingkungan Amerika Serikat (US-EPA) sebagai proses untuk memperkirakan sifat dan kemungkinan pada efek kesehatan yang merugikan pada manusia yang mungkin terpapar bahan kimia di media

lingkungan yang terkontaminasi. Sekarang atau di masa depan analisis risiko digunakan untuk memberikan informasi mengenai desain keputusan (misalnya keamanan dan kinerja biaya, dan lain-lain) serta keputusan operasional (harus mematikan sebuah fasilitas yang mengganggu). Selain itu berfungsi untuk mengoptimalkan keputusan gabungan yang dibuat oleh sistem dan pemilik/operator serta cara yang paling mendekati atau terbaik dalam memodelkan interdependensi dan ketidakpastian tentang keadaan sistem sekarang (Daud and Dullah, 2013).

Zat kimia beracun, patogen dan radiasi elektromagnetik menjadi ancaman utama di lingkungan. PHA (*Public Health Assessment*) adalah perangkat yang dibuat oleh *Agency for Toxic Substances and Drug Registry* (ATSDR). Fungsi PHA adalah evaluasi data dan informasi mengenai pelepasan bahan-bahan berbahaya ke lingkungan untuk menilai setiap dampak (yang lalu, kini, atau yang akan datang) terhadap kesehatan masyarakat, mengembangkan anjuran-anjuran kesehatan dan rekomendasi-rekomendasi lain, dan mengidentifikasi kajian-kajian atau tindakan yang dibutuhkan untuk mengevaluasi dan meniadakan atau mencegah efek-efek terhadap kesehatan manusia (Mallongi, 2015).

Risiko lingkungan adalah risiko yang muncul akibat keadaan lingkungan secara fisik, kimia, biologi dan sosiokultural. Penilaian risiko adalah salah satu komponen dalam proses pengambilan keputusan yang digunakan dalam mengatasi kontaminan lingkungan yang menjadi perhatian kesehatan manusia. Faktor ilmiah, teknis, dan kebijakan lainnya, selain hasil penilaian risiko kesehatan manusia, juga dipertimbangkan dalam membuat manajemen risiko (Fan, Alexeeff and Khan, 2015). Manajemen risiko harus mengimplementasikan langkah yang sesuai dengan jenis risiko di wilayah tinggal penduduk/lingkungan yang berisiko. Dalam hal risiko, kerentanan anak-anak terhadap pajanan dari polusi di lingkungan lebih tinggi daripada orang dewasa (Forsyth, Kruger and Le Maitre, 2010). Hal ini karena perbedaan toksikodinamika polutan dalam tubuh mereka dalam hal penyerapan, metabolisme dan ekskresi.

2. Prinsip Penilaian Pajanan

Besar risiko kesehatan akibat pajanan bahaya yang ada di lingkungan dapat dijelaskan oleh studi Epidemiologi Kesehatan Lingkungan (EKL) dan Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan (ARKL)

(Mallongi & Dullah, 2014). Pada ARKL, agen risiko yang diterimasetiapa individu bisa dihitung berdasarkan *intake* (asupan), sedangkanEKL tidak perlu memperhitungkan hal tersebut. EKL ditentukan berdasarkan kejadian penyakit (*disease oriented*) dan kondisi lingkungan yang spesifik, diukur dengan melihat nilai *Odd Ratio* (OR)yaitu berapa kali faktor risiko menyebabkan penyakit bagi kelompokterpapar daripada kelompok yang tidak terpapar, *Risk Ratio* (RR) yaitu melihat berapa kali kemungkinan orang-orang yang terpaparfaktor risiko untuk menderita penyakit apabila dibandingkan orangyang tidak terpapar faktor risiko dan *Standarized Mortality Ratio*(SMR) yang diperoleh dari populasi yang dianalisis. Besaran risiko dalam ARKL adalah RQ untuk non-karsinogenik dan ECR untukkarsinogenik dan dinyatakan sebagai probabilitas, sedangkan EKLmerumuskan proporsi gejala atau penyakit dan tingkat pencemaran. Penilaian risiko memberikan pendekatan sistematis untuk mengkarakterisasi sifat dan besarnya risiko yang terkait dengan bahaya kesehatan lingkungan. Semua aktivitas, proses, dan produk memiliki tingkat risiko tertentu. Misalnya pada studi kuantifikasi akuratdari risiko yang ditimbulkan oleh logam sangat penting untuk mengembangkan strategi manajemen risiko yang efektif untuk melindungi lingkungan perkotaan (Haller, Ulm and Hapfelmeier, 2019). Langkah selanjutnya dalam penilaian risiko adalah pemilihan dan analisis data tentang efek racun (merugikan) dari suatu senyawa. Sebagian besar data biasanya berasal dari hewan percobaan, karena hewan mamalia mencerminkan kompleksitas organisme mamalia yang utuh(Schrenk, 2018).

Pada studi hewan, tes kronis selama tiga bulan hingga masa hidup hewan digunakan untuk memperoleh data tentang ambang batas dosis dan respons fraksional. Karena dosis ditingkatkan secara terus menerus dan karena seluruh populasi tidak diuji, dosis ambangbatas yang sebenarnya tidak dapat diamati. Jika data NOAEL digunakan untuk analisis kuantitatif distribusi struktur kimia yang terkait dengan kelompok NOAEL, kriteria seleksi yang jelas dan prosedur transformasi yang memungkinkan untuk desain penelitian dan parameter basis data per senyawa tersedia (Zarn, Hänggi and Engeli, 2015). NOAEL dipilih sebagai asumsi bahwa jika efek toksik kritis dicegah, maka semua efek toksik dicegah (U.S. EPA., 2011).

NOAEL untuk efek toksik kritis tidak boleh disamakan dengan "level tanpa efek yang diamati" (NOEL). NOEL sesuai dengan tingkat pajanan di mana tidak ada efek sama sekali telah diamati; efek diamati itu tidak dianggap memiliki signifikansi toksikologis. Proses penilaian risiko adalah seni dan juga sains. Proses berkembang pesat dan digunakan pada berbagai potensi kegunaan dan intervensi. Dengan pemahaman yang kuat tentang kerangka proses, asumsi yang digunakan dalam analisis risiko dan komitmen untuk mengkomunikasikan proses secara penuh dan adil, penilaian risiko dapat menjadi alat yang sangat berharga dalam mendukung rencana perbaikan pada lokasi yang tercemar (Scoullou *et al.*, 2012).

3. Langkah Penilaian Risiko Kesehatan

a. Identifikasi Bahaya (*Hazard Identification*)

Bahaya adalah sumber segala potensi kerusakan, bahaya, atau efek kesehatan yang merugikan pada sesuatu atau seseorang. Identifikasi bahaya adalah kegiatan untuk menentukan jenis dan kapasitas agen untuk menyebabkan efek samping pada kesehatan manusia dan hewan lainnya (Krishna *et al.*, 2017). Mengumpulkan kasus sebelumnya dan data gejala penyakit yang berkaitan dengan toksisitas agen risiko juga merupakan bagian dari identifikasi bahaya dan dikenal sebagai *disease oriented*. Dalam analisis risiko, beberapa data yang diperlukan dalam identifikasi bahaya diantaranya adalah sejarah lokasi, tataguna lahan, tingkat pencemaran dalam media, karakteristik lingkungan yang mempengaruhi laju dan keberadaan zat kimia kontaminan tersebut serta pengaruh potensial terhadap populasi (Daud and Dullah, 2014).

b. Analisis Pajanan (*Exposure Assessment*)

Pajanan adalah kontak suatu organisme (merujuk ke manusia dalam hal penilaian risiko kesehatan) dengan agen kimia atau fisik (Shea, 1988). Pada penilaian pajanan, informasi dikumpulkan tentang jumlah zat kontaminan, bagaimana pajanan tersebut dapat terjadi, jalur pajanan (inhalasi, dermal, ingesti), dan untuk berapa lama pajanan tersebut akan terjadi (Martin and Mak, 2006). Penilaian pajanan berfungsi untuk menentukan sub populasi yang berisiko terpapar terhadap bahaya yang teridentifikasi. Korelasi mengenai frekuensi dan besarnya pajanan individu dalam populasi dan kerentanannya

juga ditentukan di fase ini (Daud and Dullah, 2013).

1) Jalur Inhalasi

Data dan informasi yang dibutuhkan untuk menghitung asupan jalur oral adalah semua variabel di persamaan berikut :

$$I = \frac{C \times R \times tE \times fE \times Dt}{Wb \times t_{avg}}$$

Keterangan :

- I : Intake (Asupan) (mg/m³/hari)
- C : Konsentrasi risk agent mg/m³ untuk medium udara, mg/L untuk air minum, mg/kg untuk makanan atau pangan
- R : laju (rate) asupan atau konsumsi, m³/jam untuk inhalasi, L/Hari untuk air minum, gr/hari untuk makanan.
- tE : Waktu pajanan tahunan
- fE : Frekuensi pajanan
- Dt : Durasi pajanan (Tahun)
- Wb : Berat Badan
- t_{avg} : Periode waktu rata-rata (30x365 hari/tahun untuk zat non karsinogen, 70 tahun x 365 hari/tahun untuk zat krasinogen)

2) Jalur Ingesti

Data dan informasi yang dibutuhkan untuk menghitung asupan jalur oral adalah semua variabel di persamaan sebagai berikut :

Keterangan :

$$I = \frac{C \times R \times fE \times Dt}{Wb \times t_{avg}}$$

- I : Intake (Asupan) (mg/m³/hari)
- C : Konsentrasi risk agent mg/m³ untuk medium udara, mg/L untuk air minum, mg/kg untuk makanan atau pangan
- R : laju (rate) asupan atau konsumsi, m³/jam untuk inhalasi, L/Hari untuk air minum, gr/hari untuk makanan.
- tE : Waktu pajanan tahunan
- fE : Frekuensi pajanan

- Dt : Durasi pajanan (Tahun)
 Wb : Berat Badan
 t_{avg} : Periode waktu rata-rata (30x365 hari/tahun untuk zat non karsinogen, 70 tahun x 365 hari/tahun untuk zat karsinogen)

Hampir seluruh jenis polutan yang berasal dari industri memiliki efek nonkarsinogenik dan karsinogenik. Logam berat merupakan spesi yang memiliki risiko karsinogenik yang tinggi. Pada tahapan ini pertanyaan agen risiko spesifik apa yang berbahaya harus terjawab, di media lingkungan yang mana agen risiko terakumulasi, seberapa besar kandungan/konsentrasi agenrisiko di media lingkungan, gejala kesehatan apa yang potensial.

Tabel 2.1. Aspek penting dan perlu diperhatikan dalam analisis pajanan

No	Aspek	Keterangan
1	Agen	Biologi, kimia, fisika, agen tunggal, berganda dan campuran
2	Sumber	Antropogenik/nonantropogenik, area/titik, bergerak/diam, indoor/outdoor
3	Media Pembawa	Udara, air, tanah, debu, makanan dan produk
4	Jalur pemaparan	Menghirup udara yang terkontaminasi, menelan makanan yang terkontaminasi, menyentuh permukaan benda.
5	Konsentrasi pajanan	$\mu\text{g}/\text{m}^3$ (udara), mg/kg (makanan), mg/L (air), % berat
6	Rute pajanan	Inhalasi, kontak kulit (dermal), ingesti, rute berganda
7	Durasi	Detik, menit, jam hari, waktu, bulan, tahun, seumur hidup
8	Frekuensi	Kontinu, intermiten, bersiklus, acak
9	Latar pemaparan	Pemukiman, bukan pemukiman, lingkungan kerja/bukan lingkungan kerja, indoor/outdoor

10	Populasi terpapar	Populasi umum, sub populasi, individu
11	Geografis	Tempat/sumber spesifik, lokal, regional, nasional, internasional, global
12	Kurun waktu	Masa lalu, sekarang, masa depan, tren

c. Analisis Dosis-Respon (*Dose-Response Analysis*)

Toksitas suatu bahan kimia dinyatakan sebagai dosis referensi atau *reference dose* (RfD). Kemudian untuk efek karsinogenik dinyatakan dalam *Cancer Unit Risk* (CCR) dan efek non karsinogenik dalam *Cancer Slope Factor* (CSF). Untuk menghitung dosis yang relevan dengan EHRA, perlu dilakukan penskalaan dosis untuk mengubah dosis yang digunakan pada hewan menjadi dosis yang setara dengan manusia (*human equivalent dose*) atau konsentrasi setara manusia (*human concentration dose*). Informasi mengenai dosis respon berasal dari sumber data Integrated Risk Information System (IRIS) untuk setiap agen kimia di website resmi mereka (www.epa.gov/iris).

Keberadaan efek toksik akut mengindikasikan bahwa konsentrasi racun dalam organisme telah berubah dengan cepat. Beberapa racun menyebabkan respon yang langsung terlihat segera setelah kontak dengan tubuh (Nikinmaa, 2014). Namun beberapa diperoleh respons berbeda di pemaparan organisme dengan efek jangka pendek dan jangka panjang terhadap racun tertentu. akhir atau organ target yang lebih sensitif biasanya harus diketahui atau ditentukan karena pada saat melakukan manajemen risiko, diperlukan perlindungan target kepada organ yang paling sensitif sehingga akan melindungi organ lainnya (Schrenk, 2018).

Potensi dampak kesehatan dari logam ditandai sebagai risiko kesehatan non-kanker dan kanker, berdasarkan penilaian pajanan. Potensi risiko non-kanker dapat dievaluasi menggunakan *Hazard Quotient* (HQ) dan *Hazard index* (HI). Hazard Quotient adalah rasio asupan harian logam tertentu terhadap dosis referensi spesifiknya (RfD) (Y. Ma, Egodawatta, McGree, Liu, & Goonetilleke, 2016). Setelah mengetahui intake berdasarkan jalur inhalasi dan ingesti, langkah

selanjutnya adalah menghitung tingkat risiko (RQ) dan akan dijabarkan pada langkah karakterisasi risiko.

d. Karakteristik Risiko (*Risk Characterization*)

Karakterisasi risiko merupakan suatu kesimpulan awal dari seluruh proses penilaian risiko kesehatan. Karakterisasi risiko mencakup estimasi berupa kemungkinan dari efek pada populasi manusia yang terdampak berdasarkan identifikasi bahaya, dosis-respon dan informasi pajanan (Järup *et al.*, 2001). Komponen penting dalam karakterisasi risiko dan bahaya dari jejak logam tergantung keberadaan dan penggunaannya. Jika penggunaan logam tersebut terbatas, maka informasi tentang bahaya dan pajanan mengenai efek samping dan risiko sulit dilakukan. Untuk logam yang sering digunakan, estimasi risiko kuantitatif dimungkinkan. Biasanya didukung oleh informasi mode tindakan atau *mode of action* (MOA), model toksikokinetik dan toksikodinamik (TKTD) dan jalur yang merugikan atau *adverse outcome pathway* (AOP) (EPA, 2000). Ketika penilaian risiko dan karakterisasi risiko menunjukkan adanya risiko yang berbahaya, manajemen risiko perlu dilakukan. Teknologi kontrol dengan resin penukar ion, sistem filter scrubbing untuk mengurangi partikel yang mengandung logam di udara merupakan contoh konkret langkah untuk mengurangi pajanan logam berat.

Estimasi risiko dan ringkasan informasi biologis yang relevan, asumsi yang digunakan, keterbatasannya, serta diskusi tentang variabilitas dan ketidakpastian dalam penilaian risiko, digunakan dalam manajemen risiko. Untuk menentukan tingkat pencemaran dalam media lingkungan seperti air, tanah dan udara maka diperlukan data tentang konsentrasi polutan tersebut dan data benchmark dose yang berasal dari NOAEL, EPA ataupun ATSDR. Adapun perhitungan risiko ekologis tersebut dinyatakan dengan rumus :

Keterangan :

C = Konsentrasi polutan, data berasal dari pengujian lab

Benchmark dose = Konsentrasi standar

$$HQ = \frac{C}{\text{Benchmark dose}}$$

Pada penentuan risiko pajanan polutan pada manusia, setelah mengetahui nilai intak, langkah berikutnya adalah menghitung tingkat risiko (RQ) terhadap responden berdasarkan risiko harian, mingguan dan tahunan. Penentuan risiko harian dan tahunan dari pajanan zat kimia adalah sebagai berikut :

1. Penentuan Resiko Harian

$$RQ = \frac{Intake}{RfD}$$

Dosis acuan (RfD) untuk setiap unsur diperoleh dari USEPA, ATSDR ataupun standar nasional dari masing-masing negara. Nilai intake diperoleh berdasarkan nilai asupan pada persamaan inhalasi dan ingesti. Pada penentuan risiko zat karsinogenik, rumus yang digunakan adalah sebagai berikut :

$$ECR = Intake \times SF$$

Nilai SF diperoleh dari USEPA dan ATSDR yang merupakan nilai dari unsur yang tergolong karsinogenik seperti logam berat.

2. Penentuan Resiko Tahunan

Metode untuk estimasi *Target Hazard Quotient* (THQ) terjadi ketika seseorang mengonsumsi ataupun menghirup zat yang terkontaminasi pada suatu bahan makanan atau kontaminan toksik tertentu yang bersifat non-karsinogenik dan karsinogenik (Daud and Dullah, 2013).

$$THQ = \frac{EF \times ED \times FIR \times C}{RfD \times Bw \times AT} \times 10^{-3}$$

Keterangan :

- EF : Frekuensi pajanan (365 hari/tahun)
- ED : Durasi pajanan (70 tahun)
- IR : Laju asupan (gram/individu/hari)
- C : Konsentrasi Logam
- RfD/RFC: Dosis acuan
- Bw : Bobot Tubuh (Kg)
- AT : rata-rata waktu pajanan untuk non-karsinogenik (365 hari/tahun x ED)

Pada risiko paparan dari zat karsinogenik, dibutuhkan nilai Cancer Slope Factor (CSF) pada masing-masing unsur. Nilai ini merupakan default dan setiap unsur yang berpotensi menimbulkan kanker akan memiliki nilai tersebut. Adapun rumus yang digunakan penentuan risiko untuk pajanan kanker adalah sebagai berikut :

Parameter risiko karsinogenik menunjukkan kemungkinan kanker pada populasi manusia; Pada jalur inhalasi, D_{inh} adalah dosis asupan harian rata-rata per unit waktu dan berat badan manusia yang terpapar

$$TcR = \frac{EF \times ED \times FIR \times C \times CSF}{Bw \times AT} \times 10^{-3}$$

karsinogen, yaitu dosis harian melalui jalur pernapasan; SF adalah *Cancer Slope* karsinogenik (mg/(kg·d)) - 1; dan (Risiko)_T adalah risiko total karsinogenik, yang merupakan jumlah dari beberapa nilai risiko karsinogenik. Jika nilai risiko karsinogenik adalah antara 1×10^{-6} dan 1×10^{-4} berarti ada risiko karsinogenik (Cai, Li and Na, 2019).

E. Tinjauan Umum Tentang Pemodelan Dinamis

1. Model

Model adalah perumusan matematika dari proses-proses fisika/kimia/biologi suatu fenomena alam, sehingga jika dimasukkan data-data penunjang, kemudian dihitung dengan metod perhitungan tertentu, akan dapat dihasilkan gambaran proses secara keseluruhan. Modeling diartikan sebagai ilustrasi penggambaran, penyederhanaan, miniatur, visualising, atau kreasi prediksi innovative. Pemodelan dipergunakan untuk menjelaskan fenomena fisik, kimia, dan biologi yang terjadi dalam proses tersebut.

Beberapa keuntungan dari pemodelan ini adalah yang pertama dapat digunakan sebagai sarana simulasi, sehingga dengan model kita dapat memprediksi, memperkirakan, dan mempelajari berbagai kemungkinan yang dapat terjadi jika berbagai skenario diaplikasikan dalam model. Kedua, hanya dengan data yang tersedia kita mampu mengetahui tingkat keparahan suatu kasus hingga sampai 100 tahun mendatang. Dan yang

terakhir adalah sangat efisien dan efektif dalam hal pengeluaran dana untuk operasional saat ini dan mendatang.

Sebelum menyusun model yang harus diperhatikan antara lain:

- a. Model adalah representasi dari sebuah teori, sehingga jika teori yang digunakan benar maka model juga seharusnya menghasilkan keluaran yang benar, dan sebaliknya.
- b. Asumsi dan penyederhanaan yang dibuat ketika menyusun model harus mengikuti aturan/teori yang berlaku, setiap asumsi yang dibuat harus didokumentasikan / dicatat dengan baik.
- c. Untuk menghitung model matematika biasanya digunakan pendekatan metode numerik, sehingga harus didefinisikan dengan baik kemungkinan kesalahan perhitungan dari metode numerik yang dipilih/digunakan (Mallongi, 2012).

2. Membangun Model

Suatu model dikatakan sah bila model tersebut sesuai dengan kenyataan empirik yang ada. Hal ini dapat dicapai apabila pemodelan tersebut sesuai dengan metode ilmiah. Sesuai dengan karakteristik sistem dinamis, setidaknya diperlukan suatu pengungkapan kerangka sentral struktur pembuatan keputusan yang esensial. Untuk itu harus dapat dibuat pendekatan tentang kebijakan pengendalian (*controlling policy*) pada setiap titik keputusan yang penting dalam sistem. Pemahaman kebijakan dapat dikerjakan dengan sempurna jika peneliti:

- a. Memiliki suatu konsep yang memadai dan tepat tentang apakah suatu keputusan itu dan pentingnya suatu kebijakan yang dapat menjelaskan proses keputusan;
- b. Memiliki suatu struktur yang memadai yang menghubungkan status (keadaan) sistem terhadap kebijakan, keputusan-keputusan dan tindakan; Disadari bahwa proses tersebut mengalami gangguan (noise) dan tidak akan mendapatkan dan memerlukan pengungkapan (representasi) pembuatan keputusan (*decision making*) yang sangat teliti;
- c. Memanfaatkan sebaik-baiknya keunggulan dan kelebihan pengalaman dan informasi deskriptif yang luas yang boleh jadi mengandung 98% informasi yang esensial dalam pembuatan keputusan. Dua persen sisanya berasal dari data statistik dan numerik yang formal;

- d. Menyadari bahwa suatu pernyataan kuantitatif kebijakan yang formal tidaklah membawa implikasi adanya suatu ketelitian yang mutlak. Kita dapat membuat pernyataan kuantitatif formal yang berhubungan dengan setiap pernyataan yang dapat diungkapkan melalui suatu bahasa yang dimengerti.
- e. Ketelitian deskriptif yang relatif sedikit tidak menghambat pengkuantifikasian ide-ide tentang suatu kebijakan keputusan (*decision policy*). Pemberian suatu bilangan/angka tidaklah menaikkan tingkat akurasi/ketepatan pernyataan yang sebenarnya. Pendapat umum yang mengatakan bahwa seseorang tidak dapat mengkuantifikasikan suatu aturan keputusan (*decision rule*). (Mallongi, 2012, 2019).

Model yang memenuhi syarat dan mampu dijadikan sarana analisis untuk merumuskan kebijakan haruslah merupakan suatu wahana untuk menemukan jalan dan cara intervensi yang efektif dalam suatu sistem (fenomena). Melalui jalan dan cara intervensi inilah perilaku sistem yang diinginkan dapat diperoleh dan perilaku sistem yang tidak diinginkan dapat dihindari. Dengan demikian model yang dibentuk untuk tujuan seperti di atas haruslah memenuhi syarat-syarat yaitu, a). adanya elemen-elemen yang dinamis. Elemen-elemen ini merupakan efek dari suatu intervensi (kebijakan) yang digambarkan dalam bentuk perilaku dan merupakan suatu kejadian berikutnya, b). mampu mensimulasikan bermacam intervensi dan dapat memunculkan perilaku sistem karena adanya intervensi tersebut; c). memungkinkan mensimulasikan suatu intervensi yang efeknya dapat berbeda secara dramatik dalam jangka pendek dan jangka panjang (kompleksitas dinamik); d). perilaku system di atas dapat merupakan perilaku yang pernah dialami dan teramati (historis) ataupun perilaku yang belum pernah teramati (pernah dialami tetapi tidak teramati atau belum pernah dialami tetapi kemungkinan besar terjadi); dan e). mampu menjelaskan mengapa suatu perilaku tertentu (transisi yang sukar misalnya) dapat terjadi (Aziz S, 2008).

Burger dalam Aziz (2008) menambahkan bahwa dalam hubungannya dengan validitas model, suatu model haruslah sesuai dengan realitas empirik yang ada. Model merupakan hasil dari suatu upaya untuk membuat tiruan kenyataan tersebut dan upaya pemodelan haruslah memenuhi dan sesuai dengan metode ilmiah.

3. Sistem Sebagai Black Box

Kompleksitas dari kehidupan nyata adalah bahwa kita memiliki atau sedikit memiliki pengetahuan yang lengkap dari pekerjaan dalam sebuah sistem, bahkan kita belum mampu untuk mengidentifikasi komponen fisiknya. Seringkali alasan utama dari kurangnya pengetahuan ini adalah bahwa perilaku sistem dipengaruhi oleh beragam aspek. Jelas bahwa bagaimana otak manusia berfungsi hanya mengerti sebagian dari kondisi nyata. Jadi tidak ada pengertian penuh tentang bagaimana orang bisa belajar. Secara bersamaan, perkembangan besar yang dilakukan dalam meteorologi, secara cuaca hanya dimengerti sebagian. Sebagai hasilnya, prediksi cuaca terkadang salah. Komputer atau mesin yang lain telah gagal dalam banyak sekali alasan. Ini mungkin tidak praktis untuk tetap menelusuri sebab individual. Jadi hanya rekaman kumpulan saja yang dikumpulkan (Ristono, 2011).

Dari masing-masing contoh, bagian dalam sistem pada dasarnya adalah kosong, yang kita ketahui adalah input dan output dari sistem. Untuk para pengamat, ini seperti sebuah kotak hitam dengan banyak kabel ke dalam dan keluar kotak, tapi tidak ada cara untuk mengetahui apa yang terjadi didalamnya. Jika tujuan kita adalah untuk memprediksi output dari sistem seperti ini dalam merespon beragam input, yang kita perlukan hanyalah menemukan bentuk dari hubungan fungsional antara input dan output (Ristono, 2011).

Dalam beberapa situasi lain, proses transformasi mungkin dapat diketahui dengan jelas. Bagaimanapun juga, daripada mewakili proses tersebut kedalam bentuk yang sangat detail dan lengkap, maka mungkinakan sangat sempurna bila hanya memandang proses tersebut sebagai sebuah pekerjaan black box dan secara sederhana mengekspresikan beragam aktifitas proses transformasi oleh sebuah hubungan fungsional tunggal. Pendekatan ini secara bertahap digunakan sebagai sebuah substitusi untuk proses transformasi dari sebuah sub-sistem yang menerima input dari lingkungan dan memberikan output ke komponen lain dari sistem. (Ristono, 2011)

4. Sistem Dinamik

Sistem dinamik didefinisikan sebagai sebuah bidang untuk memahami bagaimana sesuatu berubah menurut waktu. Sistem dinamik merupakan

metoda yang dapat menggambarkan proses, perilaku, dan kompleksitas dalam sistem. Metodologi sistem dinamik ini telah dan sedang dikembangkan sejak diperkenalkan pertama kali oleh Jay W. Forrester pada tahun 1950-an sebagai suatu metoda pemecahan masalah-masalah kompleks yang timbul karena ketergantungan sebab akibat dari berbagai macam variabel di dalam sistem. Sistem awal untuk memulai berpikir sistemik adalah adanya

kesadaran untuk mengapresiasi dan memikirkan suatu kejadian sebagai sebuah sistem (*systemic approach*). Kejadian apapun baik fisik maupun non fisik dilakukan sebagai unjuk kerja atau dapat berkaitan dengan unjuk kerja dari keseluruhan interaksi antar unsur sistem dalam batas lingkungan tertentu. Sejak tahun 1970-an, peneliti telah menggunakan pemodelan Sistem Dinamis untuk lebih memahami beberapa masalah kesehatan, serta untuk memahami penderita penyakit kronis menggunakan metode epidemiologi konvensional. Beberapa contoh yang signifikan termasuk studi masalah kesehatan seperti Penyakit Kardiovaskular, Kanker Serviks, Klamidia, Kokain, Demam Berdarah, Diabetes, Infeksi pneumokokus yang resistan terhadap obat, Heroin, HIV / AIDS dan lain-lain.

Sistem dinamik dititikberatkan pada penentuan kebijakan dan bagaimana kebijakan tersebut menentukan tingkah laku masalah-masalah yang dapat dimodelkan dengan menggunakan sistem dinamik. Dalam metodologi sistem dinamik yang dimodelkan adalah struktur informasi sistem yang didalamnya terdapat sumber informasi dan jaringan aliran informasi yang saling terhubung.

Model dinamik merupakan suatu metode pendekatan eksperimental yang mendasari kenyataan-kenyataan yang ada dalam suatu sistem untuk mengamati tingkah laku sistem tersebut (Richardson dan Pugh, 1986 dalam (Nuroniah, 2003). Tujuan metodologi sistem dinamik berdasarkan filosofi sebab akibat adalah mendapatkan pemahaman yang mendalam tentang cara kerja suatu sistem. Tahapan dalam pendekatan sistem dinamik adalah :

- a. Identifikasi dan definisi Masalah
- b. Konseptualisasi Sistem
 - 1) Menyusun hipotesis dasar teori yang terlibat dalam proses termaksud

- 2) Mengevaluasi dasar teori termaksud
- c. Formulasi Model
 - 1) Menyusun algoritma solusi numerik
 - 2) Melakukan perhitungan menggunakan komputer

d. Simulasi Model

Simulasi adalah aktifitas untuk menarik kesimpulan tentang perilaku sistem dengan mempelajari perilaku model dalam beberapa hal yang memiliki kesamaan dengan sistem sebenarnya (Gotfried, 1984 dalam Nuroniah, 2003). Simulasi adalah peniruan perilaku suatu gejala atau proses yang bertujuan untuk memahami gejala atau proses tersebut, membuat analisis dan peramalan perilaku gejala atau proses tersebut di masa depan. Simulasi dilakukan dengan tahapan yaitu penyusunan konsep, pembuatan model, simulasi dan validasi hasil simulasi. Keuntungan penggunaan simulasi antara lain dapat memberikan jawaban apabila model analitik yang digunakan tidak memberikan solusi optimal. Model disimulasi lebih realistis terhadap sistem nyata karena memerlukan asumsi yang lebih sedikit

e. Analisa Kebijakan

f. Implementasi Kebijakan

Tahapan dalam pendekatan sistem dinamik ini diawali dan diakhiri dengan pemahaman sistem dan permasalahannya sehingga membentuk suatu lingkaran tertutup.

Dalam penyusunan suatu model dinamik terdapat tiga bentuk alternatif yang dapat digunakan yaitu verbal, visual, dan model matematis. Model verbal adalah model sistem yang dinyatakan dalam bentuk kata-kata. Model visual dinyatakan dalam bentuk diagram dan menunjukkan hubungan sebab akibat banyak variabel secara sederhana dan jelas. Model visual juga dapat direpresentasikan ke dalam bentuk model matematis yang merupakan perhitungan-perhitungan terhadap suatu sistem. Semua bentuk perhitungannya bersifat ekuivalen, dimana setiap bentuk berperan sebagai alat bantu yang dapat dimengerti.

Di dalam sistem dinamis lingkaran umpan balik menyatakan hubungan sebab akibat dari variabel-variabel yang diamati. Hubungan ditandai dengan tanda dan arah. Arah panah (\rightarrow) menunjukkan variabel sebab, sedangkan tanda (+) atau (-) menunjukkan pengaruh pada variabel

akibat. Berdasarkan tanda dan arah panah, maka terdapat dua macam lingkaran umpan balik yaitu lingkaran umpan balik positif untuk sistem umpan balik positif dan lingkaran balik negatif untuk sistem umpan balik negatif. Sistem pada lingkaran umpan balik positif bersifat divergen yaitu adanya suatu proses pertumbuhan yang berkesinambungan yang akan menghasilkan pertumbuhan eksponensial. Sistem pada lingkaran umpan balik negatif berusaha mencapai suatu tujuan. Keluaran (output) akan mempengaruhi kembali masukan (input) jika tujuan belum tercapai. Hasil kerja pada sistem umpan balik negatif meliputi penyesuaian dan keseimbangan (Aziz S, 2008).

Dengan demikian metode sistem dinamis mensyaratkan bahwa suatu model haruslah mempunyai banyak titik kontak (*points of contact*) dengan kenyataan (*reality*) dan membandingkan secara berulang kali dengan dunia nyata (*real world*) melalui titik-titik kontak tersebut dan hendaknya membuat model menjadi semakin robust.

Kemudian barulah model itu dapat dijadikan sebagai suatu dasar untuk memahami dunia nyata dan untuk merancang kebijakan-kebijakan yang dapat mengubah dunia nyata tersebut (Aziz S, 2008). Penggunaan model simulasi sistem dinamis dikarenakan sistem dinamis memiliki beberapa kelebihan dibandingkan dengan metode peramalan konvensional yaitu model sistem dinamis dapat memberikan perkiraan yang lebih handal dari pada model statistik serta model sistem dinamis menyediakan cara untuk memahami penyebab perilaku industri, mendeteksi terhadap perubahan dini dalam struktur dan penentuan faktor-faktor yang meramalkan perilaku secara signifikan dan sensitif. Model sistem dinamis memungkinkan penentuan skenario yang masuk akal sebagai masukan untuk keputusan dan kebijakan (Axella and Suryani, 2012).

Model sistem dinamik dapat dinyatakan dan dipecahkan secara numerik dalam sebuah bahasa pemrograman. Perangkat lunak khusus untuk sistem dinamik telah banyak tersedia seperti *Dynamo*, *Simile*, *Stella*, *Powersim*, *Vensim*, *I-think* dan lain-lain. Pemilihan Stella sebagai software untuk simulasi model adalah karena kemudahan dan ketersediaan pada saat penelitian. Pemodelan dinamik terdiri dari variabel-variabel yang saling berhubungan. Dalam Stella yaitu perangkat lunak yang digunakan

untuk simulasi terdapat variabel-variabel yaitu *Stock*, *Flow*, *Converter*, dan *Connector* Pada model yang telah dibuat, data kuantitatif dimasukan dengan meng- klik variabel-variabel yang tersedia seperti *Stock*, *Flow*, *Converter* dan *Connector*. Kemudian nilai atau formula matematika di inputkan ke dalam variabel-variabel tersebut untuk mengkalkulasi mode.

5. *Black Box Testing*

Black Box Testing berfokus pada spesifikasi fungsional dari perangkat lunak. Tester dapat mendefinisikan kumpulan kondisi input dan melakukan pengetesan pada spesifikasi fungsional program. *Black Box Testing* cenderung untuk menemukan hal-hal berikut :

- a. Fungsi yang tidak benar atau tidak ada.
- b. Kesalahan antarmuka (interface errors).
- c. Kesalahan pada struktur data dan akses basis data.
- d. Kesalahan performansi (performance errors).
- e. Kesalahan inisialisasi dan terminasi.

Pengujian didesain untuk menjawab pertanyaan-pertanyaan berikut:

- a. Bagaimana fungsi-fungsi diuji agar dapat dinyatakan valid ?
- b. Input seperti apa yang dapat menjadi bahan kasus uji yang baik?
- c. Apakah sistem sensitif pada input-input tertentu ?
- d. Bagaimana sekumpulan data dapat diisolasi ?
- e. Berapa banyak rata-rata data dan jumlah data yang dapat ditangani sistem?
- f. Efek apa yang dapat membuat kombinasi data ditangani spesifik pada operasi sistem?

6. Analisis Simulasi

Pydich and Rubinfield, (1991 dalam Nurmalina, 2007) menyatakan bahwa tujuan simulasi adalah untuk melakukan pengujian dan evaluasi terhadap model, mengevaluasi kebijakan-kebijakan pada masa lampau, membuat peramalan untuk masa yang akan datang. Simulasi diperlukan untuk mempelajari dampak perubahan peubahpeubah eksogen terhadap peubah-peubah endogen dalam model

7. Validasi Model

Model adalah perumusan matematika dari proses-proses fisika/kimia/biologi suatu fenomena alam, sehingga jika dimasukkan data-data penunjang, kemudian dihitung dengan metod perhitungan tertentu,

akan dapat dihasilkan gambaran proses secara keseluruhan. Modeling diartikan sebagai ilustrasi penggambaran, penyederhanaan, miniatur, visualising, atau kreasi prediksi innovative. Pemodelan dipergunakan untuk menjelaskan fenomena fisik, kimia, dan biologi yang terjadi dalam proses tersebut.

Beberapa keuntungan dari pemodelan ini adalah yang pertama dapat digunakan sebagai sarana simulasi, sehingga dengan model kita dapat memprediksi, memperkirakan, dan mempelajari berbagai kemungkinan yang dapat terjadi jika berbagai skenario diaplikasikan dalam model. Kedua, hanya dengan data yang tersedia kita mampu mengetahui tingkat keparahan suatu kasus hingga sampai 100 tahun mendatang. Dan yang terakhir adalah sangat efisien dan efektif dalam hal pengeluaran dana untuk operasional saat ini dan mendatang.

Sebelum menyusun model yang harus diperhatikan antara lain:

- a. Model adalah representasi dari sebuah teori, sehingga jika teori yang digunakan benar maka model juga seharusnya menghasilkan keluaran yang benar, dan sebaliknya.
- b. Asumsi dan penyederhanaan yang dibuat ketika menyusun model harus mengikuti aturan/teori yang berlaku, setiap asumsi yang dibuat harus didokumentasikan / dicatat dengan baik.
- c. Untuk menghitung model matematika biasanya digunakan pendekatan metode numerik, sehingga harus didefinisikan dengan baik kemungkinan kesalahan perhitungan dari metode numerik yang dipilih/digunakan (Mallongi, 2022).

F. Aplikasi STELLA 9.0.2

Stella adalah salah satu software yang dirancang sesuai dengan konsep permodelan dinamis. Data dalam bentuk input masalah digambarkan/diterjemahkan dalam bentuk model. Program STELLA akan menggambarkan analisis konsep dari sistem dinamik yang berguna untuk memprediksi berbagai kasus atau situasi melalui input data penelitian atau studi literatur. Sejumlah contoh menunjukkan teknik membangun struktur sistem dalam hal diagram stok-aliran dan simulasi menggunakan perangkat lunak STELLA. (STELLA adalah program simulasi komputer yang

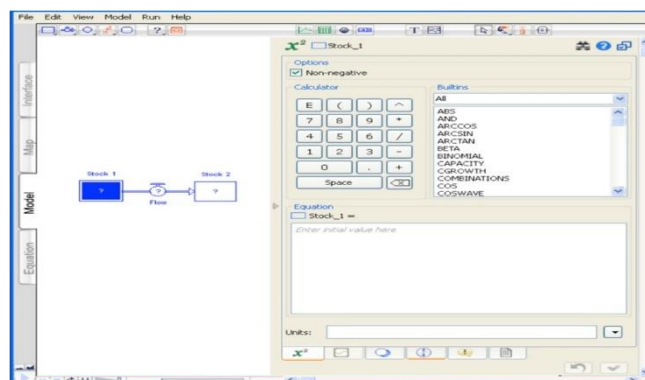
menyediakan kerangka kerja dan antarmuka grafis yang mudah dipahami untuk mengamati interaksi kuantitatif variabel dalam suatu sistem .

Antarmuka grafis dapat digunakan untuk menggambarkan dan menganalisis sistem fisik, kimia, biologi, dan sosial yang sangat kompleks. STELLA hanya terdiri dari empat blok "bangunan" yang menjadikan sistem dan variabel yang kompleks menjadi sederhana dan mudah dipahami. Program STELLA merupakan salah satu program yang paling banyak digunakan untuk modeling sistem dinamis. Program ini dapat memprediksi hasil dengan ketepatan 95% (Mallongi, 2021). Angkatersebut merupakan hasil antara penelitian langsung dengan aplikasi model STELLA.

1. Menu Model Aplikasi STELLA

Seluruh tab di sisi kiri jendela memberi akses ke berbagai bagian model yaitu, *Interface*, *Map*, *Model* dan *Equation*. Setiap bagian memberikan aspek berbeda dalam mendesain dan menyajikan model.

Gambar 2.1.1 Menu utama program STELLA



- a) *Interface*, bagian ini untuk membuat antarmuka pengguna memiliki bentuk yang menarik untuk model yang dibuat. Misalnya, menggunakan lapisan antarmuka untuk membuat "kokpit simulator penerbangan" tempat pengguna dapat berinteraksi dengan model saat simulasi berlangsung. Bagian ini memungkinkan untuk mengubah model menjadi lingkungan yang menarik dan komunikatif.
- b) *Map/Peta*, untuk menjabarkan pemikiran seseorang dalam bentuk peta tingkat tinggi. Selama fase pemetaan, peneliti mengidentifikasi entitas utama dalam model dan mengaturnya dalam kaitannya satu sama lain. Pada bagian ini, keseluruhan aliran dan desain model.
- c) *Model*, untuk mengubah peta menjadi model yang dapat

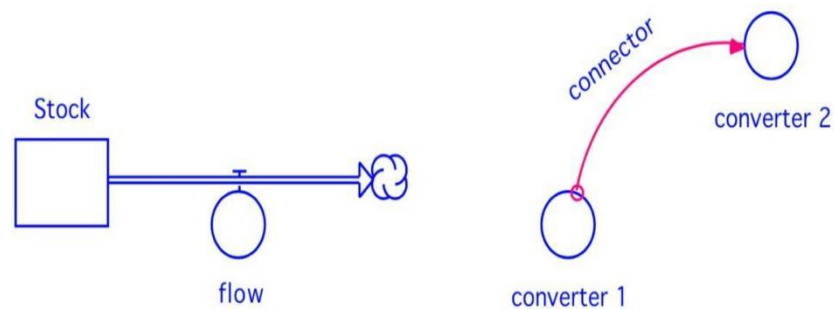
disimulasikan di komputer. Lapisan Model sering disebut sebagai "ruang mesin untuk model yang dibuat. Ketika bekerja pada lapisan model, detail tentang bagaimana entitas berinteraksi satu sama lain, nilai awal atau persamaan untuk blok bangunan, dan properti terperinci lainnya yang mengontrol bagaimana model berfungsi ketika simulasi berjalan akan terlihat. *Equation/persamaan*, bagian ini

d) untuk melihat daftar semua persamaan yang membentuk model.

2. Komponen Model STELLA

Grafis antarmuka dapat digunakan untuk menggambarkan dan menganalisis sistem fisik, kimia, biologi dan sosial yang sangat kompleks (Martin and Reddy, 1997) Pembuat model dan pengguna tidak akan merasa sulit dengan kompleksitas karena semua model STELLA hanya terdiri dari empat blok bangunan, yaitu *stock*, *flow*, *converter* dan *connector*.

Gambar 2.1.2. Bentuk objek rangkaian program STELLA.

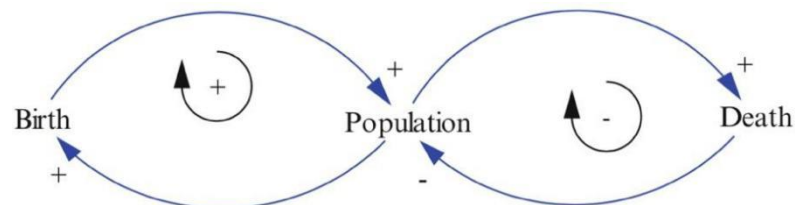


- Stock*, simbol umum untuk apa pun yang menumpuk atau berkurang. Stock merupakan variabel dengan perubahan yang sangat cepat dibandingkan variabel lain dalam sistem. Misalnya, akumulasi jumlah limbah yang dihasilkan.
- Flow*, aliran tingkat perubahan stock. Nilai flow dalam hal ini akan berkorelasi dengan nilai stock dan converter.
- Converter*, digunakan untuk mengambil data input dan atau mengubah input itu menjadi beberapa sinyal output.
- Connector*, panah yang memungkinkan informasi untuk lewat antara konverter dan konverter, stok dan konverter, stok dan aliran, dan konverter dan aliran.

3. Umpan Balik Model

Struktur loop umpan balik dari suatu sistem mensimulasikan perilaku

dinamis, dan semua dinamika muncul dari interaksi dua jenis loop umpan balik: loop umpan balik positif dan loop umpan balik negatif (Bala *et al.*, 2017). Contoh umpan balik positif adalah pertumbuhan, sebab akibat, misalnya kelahiran, kematian dan populasi. Pada dasarnya dinamika sistem adalah teori kontrol untuk sistem sosial. Sistem umpan balik adalah sistem loop tertutup dan input diubah berdasarkan output. Sistem umpan balik memiliki struktur loop tertutup yang mengembalikan hasil dari tindakan masa lalu untuk mengontrol tindakan di masa depan. Dalam sistem tertutup, masalah dirasakan, tindakan diambil dan hasilnya mempengaruhi tindakan lebih lanjut.



Gambar 2.1.3 Contoh visualisasi kausal loop antara kelahiran, populasi dan kematian.

G. Tinjauan Tentang Monte Carlo

Metode Monte Carlo dikembangkan oleh Von Neumann, Ulam dan Fermi selama Perang Dunia II “*Involved the solution of non probabilistic mathematical problems by simulating a stochastic process that has moment or probability distribution satisfying the mathematical relations of the non probabilistic problem*”. Simulasi Monte Carlo merupakan suatu pendekatan untuk membentuk kembali distribusi peluang yang didasarkan pada pilihan atau pengadaan bilangan acak (random). Ada beberapa cara untuk menghasilkan bilangan acak dari Monte Carlo yang merupakan cara terbaik terutama untuk distribusi diskrit yang empiris. Penggunaan bilangan acak membantu dalam meng-generate (membangkitkan) nilai yang memiliki sebuah distribusi probabilitas yang dapat mewakili data secara nyata. Metode ini dapat digunakan untuk simulasi baik yang bersifat stokastik maupun yang deterministik (Laboratory, 2017; Dedrizaldi, Masdupi and Linda, 2019).

Metode simulasi ini memiliki sifat dasar stokastik yang artinya metode ini berdasarkan pada penggunaan angka-angka yang bersifat acak dan kemungkinan

untuk mengidentifikasi sebuah masalah, metode ini sebelumnya digunakan untuk menyelesaikan permasalahan kuantitatif dengan proses fisik, seperti pelemparan dadu atau pengocokan kartu untuk menurunkan sample (Laboratory, 2017; Dedrizaldi, Masdupi and Linda, 2019).

Simulasi Monte Carlo adalah salah satu metode simulasi sederhana yang dapat dibangun secara cepat dengan hanya menggunakan spreadsheet (misalnya Microsoft Excel). Pembangunan model simulasi ini Monte Carlo didasarkan pada probabilitas yang diperoleh dari data historis sebuah kejadian dan frekuensinya, dimana :

dengan :

P_i = probabilitas kejadian i

$$P_i = \frac{f_i}{n}$$

f_i = frekuensi kejadian i

n = jumlah frekuensi semua kejadian

Tetapi dalam simulasi Monte Carlo, probabilitas juga dapat ditentukan dengan mengukur probabilitas sebuah kejadian terhadap suatu distribusi tertentu. Distribusi ini tentu saja telah menjalani serangkaian ujian distribusi misalnya uji Chi-Square, Heuristic atau Kolmogrov- Smirnov dan sebagainya. Metode simulasi Monte Carlo merupakan teknik simulasi yang memakai bilangan acak untuk menyelesaikan masalah-masalah yang mencakup keadaan ketidakpastian dimana evaluasi matematis tidak mungkin. Dasar simulasi Monte Carlo adalah percobaan pada unsur peluang (atau, bersifat probabilistik) dengan pengambilan sampel secara acak.

Dalam simulasi Monte Carlo terdapat dua bagian yaitu bilangan acak dan variabel acak, yaitu :

1. Pembangkitan bilangan acak. Bilangan acak bisa digunakan dalam pengembangan simulasi. Pembangkitan bilangan acak dapat dilakukan dengan menggunakan fungsi standar randomize. Fungsi standar randomize ini merupakan suatu fungsi untuk menghasilkan bilangan acak dengan nilai yang lebih besar atau sama dengan nol dan lebih kecil dari satu.
2. Pembangkitan variabel acak. Pembangkitan variabel acak ini menggunakan metode transformasi invers, berdasarkan pola distribusi dari data sampel pengamatan. Oleh karena itu, data sampel pengamatan harus diuji dulu distribusinya. Distribusi sampel harus mewakili distribusi yang secara statistik

tidak berbeda nyata (Dedrizaldi, Masdupi and Linda, 2019).

Simulasi Monte Carlo dapat memprediksi suatu nilai berdasarkan distribusi data sampling. (Mallongi, 2022). Untuk menjalankan metode Monte Carlo, dibutuhkan sejumlah besar bilangan acak. Penggunaan metode ini melibatkan beberapa parameter yang nantinya dilakukan sebuah perhitungan. Tiap-tiap perhitungan yang dilakukan melibatkan sebuah variabel acak, maka dari itu tingkat ketelitian metode ini tergantung pada banyaknya literasi yang dilakukan, semakin banyak literasi yang dilakukan maka akan semakin teliti pula hasil yang didapatkan (Laboratory, 2017; Dedrizaldi, Masdupi and Linda, 2019).

Variabel yang digunakan pun adalah variabel yang di kontrol (controlled variabel) dan variabel random (randomized variabel), controlled variabel ini sendiri diambil dari fakta yang terjadi di kenyataan, sedangkan randomized variabel digunakan untuk mensimulasikan mengalami Over Stok dan bahkan sering pula terjadi *Out off Stok* (Dedrizaldi, Masdupi and Linda, 2019).

Metode Monte Carlo menggunakan angka acak, dengan mengubah se buah model deterministik menjadi model stokastik. Metode Monte Carlo merupakan salah satu metode yang digunakan untuk menganalisis *uncertainty propagation* yang memiliki tujuan untuk mengetahui seberapa banyak variasi yang akan terjadi atau untuk mengetahui seberapa besar tingkat kesalahan, kemampuan, atau reliabilitas dari sebuah sistem yang dimodelkan. Metode Monte Carlo ini dikategorikan sebagai sebuah sampling methods karena masukannya diambil secara acak dari kemungkinan yang terjadi (Dedrizaldi, Masdupi and Linda, 2019). Langkah-langkah metode monte carlo:

- a. Menetapkan distribusi probabilitas yang diketahui secara pasti dari data yang didapatkan dari data masa lalu.
- b. Membangun distribusi probabilitas kumulatif untuk masing-masing variabel yang menjadi dasar pengelompokan batas interval dari bilangan acak yang mewakili setiap hasil yang mungkin.
- c. Lakukan simulasi untuk membangkitkan bilangan acak.
- d. Analisis yang dilakukan dari output simulasi sebagai masukkan dan evaluasi kondisi yang sedang terjadi dengan hasil simulasi.

H. Kajian Kebijakan Transportasi

1. Konsep Kebijakan

Kata kebijakan merupakan terjemahan dari bahasa Inggris policy. Penggunaan kata kebijakan sebagai pengganti kata policy, sebagaimana digunakan dalam Policy Sciences, oleh pengamat atau pakar Studi Kebijakan (Policy Studies), dan Analisis Kebijaksanaan (Policy Analysis). Menurut Kamus Besar Bahasa Indonesia, kebijakan dijelaskan sebagai rangkaian konsep dan asas yang menjadi garis dan dasar rencana dalam pelaksanaan pekerjaan, kepemimpinan dan cara bertindak.

Kebijakan dibuat untuk mengarahkan, mengendalikan, membuat keputusan dan tindakan operasional. Terlebih dalam organisasi pemerintahan tidak bisa dilakukan jika tidak dalam konteks sebuah teamwork. Kesimpulannya adalah pilihan apapun yang dilakukan ataupun tidak dilakukan oleh pemerintah hal tersebut dapat dikategorikan sebagai sebuah kebijakan publik.

Pakar Kebijakan Publik lainnya Michael Howlet M. Ramesh & membagi proses kebijakan publik kedalam lima tahapan yakni ;

- a. Penyusunan agenda (agenda setting) yaitu suatu proses agar satu masalah bisa mendapat perhatian dari pemerintah.
- b. Formulasi kebijakan (policy formulation) yakni proses-proses pemilihan kebijakan oleh pemerintah.
- c. Pembuatan Kebijakan (decision Making) yakni proses ketika pemerintah memilih untuk melakukan suatu tindakan, atau tidak melakukan suatu tindakan.
- d. Implementasi kebijakan, (policy implementtion) yakni proses untuk melaksanakan kebijakan agar supaya mencapai hasil.
- e. evaluasi kebijakan, (policy evaluation) yakni proses untuk memonitor dan menilai hasil kinerja sebuah kebijakan

Selanjutnya dalam perumusan kebijakan publik, organisasi memiliki peran yang sangat penting. Menurut Sondang P Siagian (1955), dalam proses perumusan kebijakan dihadapkan dengan keharusan untuk merumuskan tujuan kebijakan yang hendak dicapai, menetapkan berbagai tahapan sasaran yang ingin dituju, menetapkan berbagai kegiatan yang harus dilaksanakan untuk mencapai sasaran, mengembangkan sistem dan mekanisme kerja yang tepat, mengalokasikan sumber dana, daya,

peralatan dan tenaga, memonitor hasil yang dicapai, melakukan berbagai perubahan bila diperlukan, serta menata hubungan kerja agar dapat bergerak dan terarah pada kesatuan tugas yang diharapkan.

2. Kebijakan Transportasi

Penyusunan kebijakan transportasi dilakukan oleh Departemen Perhubungan, setelah berkoordinasi dengan beberapa departemen lain yang terkait, misal: Departemen Dalam Negeri, Departemen Pekerjaan Umum, Departemen Pertahanan, dan Departemen Keuangan. Selanjutnya pelaksanaan dari kebijakan transportasi tersebut dilakukan secara terpadu oleh unsure-unsur pelaksana di daerah, seperti Dinas Lalu Lintas dan Angkutan Jalan, Dinas Bina Marga, Polisi Lalu Lintas dan instansi lain yang terkait, serta pihak swasta (perusahaan).

Transportasi selain berfungsi mendorong peningkatan laju perdagangan, mendorong peningkatan aktivitas produksi di suatu wilayah transportasi juga mempermudah perpindahan bahan baku mencapai lokasi pemrosesan dan mempermudah barang-barang mencapai konsumen. Saat ini salah satu permasalahan yang paling krusial yang terjadi di Indonesia dilihat dari segi kompleksitas permasalahannya adalah terbatasnya sarana dan prasarana transportasi darat. Indonesia sebagai salah satu negara yang mempunyai wilayah daratan yang sangat luas tidak diikuti dengan prasarana jalan yang memadai.

Ketidakseimbangan antara prasarana berupa jalan menjadi perhatian banyak pihak. Rendahnya ketersediaan infrastruktur jalan menimbulkan banyak masalah transportasi darat. Pengertian umum transportasi adalah pemindahan manusia atau barang dari satu tempat ke tempat lainnya dengan menggunakan sebuah wahana yang digerakkan oleh manusia atau mesin. Transportasi umumnya digunakan untuk memudahkan manusia dalam melakukan aktivitas sehari-hari.

Berkembangnya kegiatan sosial dan ekonomi yang diikuti dengan meningkatnya permintaan perjalanan di wilayah Jakarta dan Tangerang mengakibatkan permasalahan disektor transportasi semakin meningkat pula. Aktivitas wilayah perkotaan tidak bisa dilepaskan dari sektor-sektor permukiman, transportasi, komersial, industri, pengelolaan limbah padat dan sektor penunjang lainnya. Oleh sebab itu, pencemaran utama ini berdampak pada gangguan kesehatan manusia, seperti juga dampaknya

pada tingkat produktivitas dan kualitas hidup dimana biaya kerugiannya sulit diestimasi karena kompensasi terhadap lingkungan memang tidak ditransaksi melalui mekanisme pasar (sumber kegagalan pasar).

Peraturan terkait kebijakan pengelolaan kualitas udara perkotaan terkait transportasi mengacu pada UU No. 14 Tahun 1992 tentang Lalu Lintas dan Angkutan Jalan serta PP No. 41 Tahun 1999 tentang Pengendalian Pencemaran Udara. Oleh sebab itu perkembangan perkotaan harus diikuti dengan pemberlakuan kebijakan transportasi yang terfokus pada kendaraan bermotor. Sejumlah permasalahan tidak dapat dielakkan adalah akibat dari konsekuensi logis yang ditanggung oleh kawasan yang berlabel perkotaan. Dampak eksternalitas berupa polusi udara dan suara yang ditimbulkan oleh sektor transportasi merupakan bagian yang menjadi konsentrasi pemerintah kota, karena hal tersebut merupakan dampak yang paling banyak dikeluhkan masyarakat. Namun sebagai kawasan yang kegiatan atau aktivitas keseharian warganya mayoritas bergerak pada sektor jasa dan perdagangan, dibutuhkan kebijakan yang sesuai dengan karakter aktivitas masyarakatnya. Terdapat sejumlah aspek yang mempengaruhi kebijakan transportasi perkotaan antara lain ;

- a. Aspek perencanaan jalan dan angkutan umum dan barang. Aspek ini mencakup rencana umum tata ruang dan tata guna lahan serta manajemen transportasi.
- b. Aspek koordinasi antara regulator dan operator, mencakup, manajemen pemerintahan, kordinasi antar lembaga atau instansi, peraturan perundang- undangan.
- c. Aspek lingkungan, mencakup dampak-dampak eksternalitas yang ditimbulkan ketiga aspek diatas merupakan aspek umum yang perlu mendapat perhatian khusus pemerintah kota, untuk menciptakan kondisi transportasi sebagaimana yang diinginkan.

Salah satu dari aspek diatas terabaikan akan menyebabkan tidak tercapainya tujuan dari transportasi. Pelaksanaan konsep transportasi yang terintegrasi dalam sebuah sistem hendaknya menjadikan aspek tersebut diatas menjadi rujukan utama.

Penerapan kebijakan sistem transportasi perkotaan yang terintegrasi dalam sebuah sistem bertujuan pada :

- a. Menurunkan tingkat kemacetan lalu lintas
- b. Meningkatkan penggunaan angkutan umum.
- c. Menurunkan tingkat polusi baik udara maupun suara.

Adapun faktor penting yang menyebabkan dominannya pengaruh sektor transportasi terhadap pencemaran udara perkotaan di Indonesia antara lain disebabkan oleh :

- a. Perkembangan jumlah kendaraan yang cepat.
- b. Tidak seimbangnya prasarana transportasi dengan jumlah kendaraan yang ada.
- c. Pola lalu lintas perkotaan yang berorientasi memusat akibat terpusatnya kegiatan perekonomian dan perkantoran di luar kota.
- d. Pembuatan dan pelaksanaan kebijakan pengembangan kota yang ada.
- e. Menyatunya pusat pemerintahan dan pusat ekonomi.
- f. Kemacetan aliran lalu lintas.
- g. Jenis umur dan karakteristik kendaraan umum.
- h. Faktor perawatan kendaraan.
- i. Jenis bahan bakar yang digunakan.
- j. Jenis permukaan jalan.
- k. Sikap dan pola pengemudi

3. *Policy Brief*

Policy brief merupakan dokumen singkat yang menyajikan temuan dan rekomendasi berdasarkan penelitian kepada pembaca umum yang tidak memiliki pengetahuan dan kepakaran khusus. Secara tegas *policy brief* memuat fakta dan analisis hasil penelitian dengan padat dan lugas tanpa adanya jargon-jargon (Ayuningtyas, 2018).

Policy brief berperan sebagai sumber informasi untuk pengambilan keputusan. Studi Jones dan Walsh (2008) menyatakan bahwa 79% aktor kebijakan negara maju dan berkembang menggunakan *policy brief* sebagai alat utama untuk memahami temuan hasil penelitian.

Berdasarkan *Netherlands Organization for scientific research*, *policy brief* mempunyai tujuan sebagai berikut :

- a. Menyediakan informasi yang seimbang mengenai berbagai fakta, bukti isu tertentu (membantu pembuat kebijakan)
- b. Memberikan pilihan kebijakan sebagai dasar rekomendasi aksi dan arah Langkah-langkah perbaikan (advokasi)

- c. Membantu menyaring dan menyampaikan intisari pembelajaran dari fakta dan bukti hasil penelitian.

Policy brief yang baik harus memiliki kriteria yang harus dicapai, antara lain :

- a. Fokus
- b. Tidak ketat dan detail menggunakan prinsip penulisan karya ilmiah
- c. Berorientasi pada fakta-fakta lapangan
- d. Ringkas
- e. Dapat dipahami
- f. Bersifat promotif
- g. Dapat diimplementasikan

Langkah membuat *policy brief* yaitu:

- a. Menetapkan sasaran

Pada tahap ini, penulis merumuskan tujuan dari *policy brief*. Penetapan tujuan akan mempengaruhi penentuan siapa actor kebijakan yang tepat untuk menjadi sasaran, kemudian memilih kata yang digunakan serta alternatif pilihan kebijakan yang akan disampaikan.

- b. Struktur dan komponen penulisan *policy brief*

Komponen struktur penulisan *policy brief* adalah :

1) *Executive Summary*

Tahap ini bertujuan menyakinkan pembaca bahwa *policy brief* memberikan manfaat dan telah melalui proses pengkajian, analisis dan investigasi yang Panjang.

Executive Summary terdiri dari dua paragraph yang menjelaskan deskripsi dari masalah yang diberikan, pernyataan mengenai alasan kebijakan saat ini harus diubah dan rekomendasi aksi yang harus dilaksanakan.

2) Konteks dan pentingnya masalah

Bagian ini memuat masalah yang menjadi fokus pembahasan, penjelasan singkat mengenai akar permasalahan dan pernyataan mengenai dampak kebijakan terhadap permasalahan tersebut.

3) Kritik dan pembahasan terhadap pilihan kebijakan

Tujuan bagian ini yaitu menjelaskan kelemahan pendekatan kebijakan yang sudah dilaksanakan sehingga diperlukan perubahan pendekatan.

4) Rekomendasi kebijakan

Bagian ini memaparkan penjelasan detail mengenai langkah-langkah spesifik yang harus dilakukan dan pentingnya aksi.

5) *Appendices*

Appendices ditambahkan untuk meningkatkan kredibilitas policy brief dan menjelaskan argumentasi yang membutuhkan penjelasan lebih detail yang dapat ditelusuri dari berbagai referensi yang ada.

I. Perbedaan Analisis Monte Carlo dengan Analisis Stella

1. Pemodelan Monte Carlo

Simulasi Monte Carlo atau yang disebut juga dengan crude Monte Carlo. Sebutan ini merupakan suatu metode yang melibatkan pembangkit dengan menggunakan bilangan acak dengan bantuan distribusi probabilitas yang dapat diketahui dan ditentukan. Dasar dari simulasi Monte Carlo adalah melakukan percobaan pada elemen-elemen probabilitas melalui pengambilan sampel secara acak. Simulasi Monte Carlo adalah sebuah pengujian dengan bilangan acak menggunakan persamaan matematik. Prediksi menggunakan Monte Carlo mewajibkan pengujian data yang sama dilakukan berulang-ulang dengan menggunakan bilangan acak yang berlainan tapi memiliki keseragaman sehingga informasi dapat dihasilkan lebih efisien). Pengujian menggunakan Monte Carlo umumnya dilakukan dalam komputer dengan menggunakan bilangan acak. Simulasi Monte Carlo sangat efektif saat digunakan untuk memodelkan:

- a. Aliran antrian dalam sebuah kegiatan,
- b. Evolusi sebuah epidemi penyakit berdasarkan ruang dan waktu,
- c. Uji statistik,
- d. Prediksi harga

Sebaliknya, metode prakiraan konvensional lebih deterministik. Metode ini memberikan jawaban yang pasti atas prediksi dan tidak dapat memfaktorkan ketidakpastian. Misalnya, metode ini mungkin memberi

tahu Anda waktu tempuh minimum dan maksimum, tetapi kedua jawaban tersebut kurang akurat. Adapun manfaat utama menggunakan analisis Monte Carlo, yaitu:

- a. Merupakan metode yang mudah digunakan untuk mencapai hasil yang mungkin pada kejadian yang tidak pasti dan batas keyakinan yang terkait. Satu-satunya prasyarat yang dibutuhkan adalah kita harus mengidentifikasi batas jangkauan dan korelasi dengan variabel lain.
- b. Merupakan teknik yang berguna untuk mempermudah pengambilan keputusan berdasarkan data numerik untuk mendukung keputusan.
- c. Simulasi Monte Carlo biasanya berguna saat menganalisis biaya dan jadwal. Dengan bantuan analisis Monte Carlo, kita dapat menambahkan biaya dan jadwal risiko ke model peramalan dengan tingkat kepercayaan yang lebih besar.
- d. Digunakan untuk menemukan kemungkinan untuk memenuhi milestone pencapaian proyek dan sasaran.

2. Aplikasi Stella

Stella adalah perangkat lunak untuk modeling berbasis “*flow-chart*”. Stella termasuk bahasa pemrograman interpreter dengan pendekatan lingkungan multi-level hierarkis, baik untuk menyusun maupun berinteraksi dengan model.

- a. Dalam program *STELLA* ada tiga jenjang (*layering*) untuk mempermudah pengelolaan model, terutama untuk model yang sangat kompleks. Hal ini sangat bermanfaat baik untuk pembuat program model maupun untuk pengguna model tersebut. Ketiga jenjang tersebut adalah: *High-Level Mapping Layer*, yakni jenjang antar-muka bagi pengguna (*users interface*). Pada jenjang ini pengguna model dapat bekerja, seperti mengisi parameter model dan melihat tampilan keluaran.
- b. *Model Construction Layer*. Jenjang ini adalah tempat model berbasis ‘*flow-chart*’. Apabila pengguna model ingin memodifikasi struktur model, dapat dilakukan di jenjang ini.
- c. *Equation Layer*. Pada jenjang ini dapat dilihat persamaan-persamaan matematika yang digunakan dalam model.

- d. Ketiga jenjang tersebut di atas saling terkait. Penulis (*Programmer*) maupun pengguna (*user*) model dapat berpindah dari satu jenjang ke jenjang lainnya.

STELLA merupakan bahasa pemrograman jenis interpreter berbasis grafis. Pemakai Stella dapat dengan mudah menyusun model dengan merangkaikan bentuk-bentuk geometris seperti bujursangkar, lingkaran dan panah yang dikenal sebagai Building Blocks. Alat bantu lain di Stella yang diperlukan dalam menyusun model diantaranya adalah menu, *control*, *toolbars* dan *objects*. Banyak diantara alat bantu tersebut mirip dengan alat bantu yang dipergunakan dalam Windows, akan tetapi banyak pula alat bantu yang tidak sama yang merupakan penciri khas Stella.

Tabel 2.2 Perbedaan Pemodelan Monte Carlo dan Stella

Kategori	Monte Carlo	Stella
Definisi	Monte Carlo merupakan salah satu teknik yang melibatkan dampak risiko yang teridentifikasi dengan menjalankan simulasi untuk mengidentifikasi berbagai kemungkinan hasil dari skenario	Stella adalah perangkat lunak untuk modeling berbasis "flow-chart" Model STELLA merupakan salah satu model yang berbasis sistem yang bersifat dinamis
Jenis Pemodelan	Statis	Dinamik

J. Tinjauan Tentang Penelitian Terdahulu

Tabel 2.3 Sintesa Penelitian

No	Nama Penelitian dan Tahun	Judul Penelitian	Tujuan	Hasil
1	(Carlsten <i>et al.</i> , 2020)	<i>Personal strategies to minimise effects of air pollution on respiratory health: advice for providers, patients and the public</i>	Tujuan penelitian ini untuk mengetahui strategi meminimalkan efek dari polusi udara pada Kesehatan pernapasan : saran bagi provider, pasien dan masyarakat	Pada riset ini membahas tentang efek dari polusi udara terhadap Kesehatan personal yang ditujukan kepada pengambil kebijakan pasien dan masyarakat sehingga riset ini memberikan rekomendasi untuk membantu penyedia dan pejabat kesehatan masyarakat saat menasihati pasien dan publik mengenai strategi tingkat pribadi untuk mengurangi risiko yang ditimbulkan melalui udara polusi, sambil mengakui bahwa studi prospektif yang dirancang dengan baik sangat dibutuhkan untuk membangun dengan lebih baik dan memvalidasi intervensi yang bermanfaat bagi kesehatan pernapasan dalam konteks ini.

2	(Fuller <i>et al.</i> , 2022)	<i>Pollution and health: a progress update</i>	Tujuan Penelitian ini untuk mengetahui estimasi terbaru dampak polusi terhadap kesehatan, dibuat berdasarkan data GBD 2019, dan juga membuat penilaian tren sejak tahun 2000	Data ini menunjukkan bahwa situasi udara belum membaik, dan polusi tetap menjadi penyebab utama. ancaman global terhadap kesehatan dan kemakmuran, khususnya di LMICs. Sejak tahun 2000, penurunan yang stabil dalam jumlah kematian akibat dari permasalahan klasik yaitu polusi udara rumah tangga, air minum yang tidak aman, dan sanitasi yang tidak memadai diimbangi dengan meningkatnya kematian yang disebabkan oleh bentuk polusi yang lebih modern. Bentuk-bentuk polusi modern ini misalnya, polusi udara ambien, polusi timbal, dan polusi bahan kimia membutuhkan peningkatan besar dalam mitigasi dan pencegahan.
3	(Fatin Izzatuljannah and Zakiah, 2021)	Isu Polusi Udara Di Kota Tangerang Selatan	Untuk menganalisis penyebab akar permasalahan terkait isu polusi udara di Kota Tangerang Selatan dan	Dari hasil pembahasan analisis strategi isu polusi udara di atas, dapat disimpulkan perlu adanya penyesuaian inovasi strategi dari studi preseden terhadap penerapannya di kota Tangerang Selatan.

			berusaha untuk menganalisis inovasi strategi yang dapat diterapkan melalui hasil studi preseden	Karena masing-masing inovasi strategi mempunyai kelebihan dan kekurangannya yang jika diterapkan secara langsung di kota Tangerang Selatan harus ada penyesuaian terhadap konteks kota, sistem pemerintahannya dan masyarakat
4	(Amin and Vyas, 2016)	<i>Effect Of Transportation On Environment</i>	Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mempelajari dampak lingkungan dari transportasi dan sumber energi yang digunakan pada sistem transportasi darat pada Dunia	Penelitian ini menyimpulkan bahwa produksi karbon dioksida oleh sistem transportasi merupakan salah satu faktor yang berpengaruh sebaliknya yang sebagian besar berpengaruh pada lingkungan alam dan menyebabkan degradasi lingkungan. Produksi karbon dioksida tidak hanya memiliki hubungan dengan konsumsi bahan bakar tetapi juga hubungan dengan kualitas bahan bakar dan kualitas mesin kendaraan dan jaringan sistem jalan yang digunakan untuk kendaraan. Untuk menghindari dari masalah tersebut cara terbaik adalah penggunaan energi terbarukan pada kendaraan dan sistem transportasi

				lainnya. Dan peningkatan jaringan jalan, kontrol terhadap kualitas sumber energi yang digunakan pada sistem transportasi. Dan juga kontrol kendaraan lama dan nomor kendaraan.
5	(Jiang, Mei and Feng, 2016)	Air pollution and chronic airway diseases: what should people know and do?	Untuk mengetahui efek dari pencemaran udara terhadap penyakit saluran pernafasan serta proses pencegahannya	Singkatnya hasil dari penelitian ini mengungkap bahwa, paparan polusi udara memiliki banyak efek merugikan yang substansial pada kesehatan manusia. Efek kesehatan dari polusi udara bergantung pada komponen dan sumber polutan, yang bervariasi menurut negara, musim, dan waktu. Subjek dengan penyakit pernapasan kronis seperti COPD dan asma sangat rentan terhadap efek merugikan dari polusi udara. Untuk mengurangi efek berbahaya dari polusi udara ambien, masyarakat harus mengetahui kualitas udara setempat dan mengambil tindakan ekstra seperti mengurangi waktu di luar ruangan dan memakai masker jika diperlukan. Untuk

				mengurangi polutan udara di dalam ruangan, disarankan untuk menggunakan bahan bakar yang bersih, kompor yang lebih baik, dan pembersih udara. Berhenti merokok dan pola makan yang memadai cocok untuk semua orang.
6	(Manisalidis <i>et al.</i> , 2020)	Environmental and Health Impacts of Air Pollution: A Review	Untuk mengetahui dampak lingkungan dan Kesehatan dari pencemaran udara	Hasil yang disimpulkan pada penelitian ini yaitu Salah satu momok terbesar di zaman kita adalah polusi udara, bukan hanya karena polusi udara dampak pada perubahan iklim tetapi juga dampaknya pada kesehatan masyarakat dan individu karena meningkatnya morbiditas dan mortalitas. Ada banyak polutan yang menjadi faktor utama pada penyakit pada manusia. Diantaranya, Particulate Matter (PM), partikel variabel tetapi diameter sangat kecil, menembus sistem pernapasan melalui inhalasi, menyebabkan pernapasan dan penyakit kardiovaskular, disfungsi reproduksi dan sistem saraf pusat, dan kanker. Terlepas

				<p>dari kenyataan bahwa ozon di stratosfer memainkan peran protektif terhadap iradiasi ultraviolet, berbahaya bila dalam konsentrasi tinggi di permukaan tanah, juga mempengaruhi sistem pernapasan dan kardiovaskular. Selanjutnya, nitrogen oksida, sulfur dioksida, Senyawa Organik Volatile (VOC), dioksin, dan aromatik polisiklik hidrokarbon (PAH) semuanya dianggap sebagai polutan udara yang berbahaya bagi manusia. Karbon monoksida bahkan dapat memicu keracunan langsung saat dihirup dalam kadar tinggi. Logam berat seperti timbal, bila terserap ke dalam tubuh manusia, dapat menyebabkan langsung keracunan atau keracunan kronis, tergantung pada paparan. Penyakit yang timbul dari zat yang disebutkan di atas terutama mencakup masalah pernapasan seperti Kronis</p>
--	--	--	--	--

				<p>Penyakit Paru Obstruktif (PPOK), asma, bronkiolitis, dan juga kanker paru-paru, kardiovaskular, disfungsi sistem saraf pusat, dan penyakit kulit.</p> <p>Perubahan iklim akibat pencemaran lingkungan mempengaruhi distribusi geografis banyak penyakit menular, seperti halnya bencana alam. Salah satunya cara untuk mengatasi masalah ini adalah melalui kesadaran publik ditambah dengan multidisiplin pendekatan oleh para ahli ilmiah; organisasi nasional dan internasional harus mengatasi munculnya ancaman ini dan mengusulkan solusi berkelanjutan.</p>
7	(Keswani, Akselrod and Anenberg, 2022)	<i>Health and Clinical Impacts of Air Pollution and Linkages with Climate Change</i>	Untuk mengetahui Dampak Kesehatan dan Klinis Pencemaran Udara dan Kaitannya dengan Perubahan Iklim	Polusi udara dan perubahan iklim menentukan kesehatan masyarakat tantangan hari ini dan akan terus melakukannya sepanjang abad ke-21. Sementara kualitas udara telah membaik di Amerika Serikat sebagai hasil dari Clean Air yang sukses UU tahun 1970 dan

				<p>Amandemen tahun 1990, tantangan kritis tetap. Pertama, hasil kesehatan berhubungan dengan tingkat polusi di bawah Kualitas Udara Ambien Nasional kita saat ini Standar, terutama untuk partikel halus (PM2.5).⁹¹ Memang, penelitian sebelumnya tidak menemukan bukti ambang batas di bawah pengaruh polusi udara PM2.5 adalah null.⁹² Pada bulan September 2021, Organisasi Kesehatan Dunia merevisi pedoman kualitas udara menjadi lebih ketat dan pelindung kesehatan (5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ untuk rata-rata tahunan PM2.5 konsentrasi), dengan tingkat yang jauh lebih rendah dari standar AS saat ini (12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).⁹³ Udara lainnya tantangan kualitas adalah perbedaan paparan di seluruh populasi subkelompok.</p>
--	--	--	--	--

8	(Tang, McNabola and Misstear, 2020)	<i>The potential impacts of different traffic management strategies on air pollution and public health for a more sustainable city: A modelling case study from Dublin, Ireland</i>	Untuk mengetahui dampak perubahan infrastruktur transportasi, perubahan peraturan lalu lintas, perubahan batas kecepatan, dan perubahan komposisi armada terhadap kualitas udara dan kesehatan masyarakat terkait polusi udara	Strategi manajemen lalu lintas tidak hanya mempengaruhi keselamatan dan kenyamanan publik, tetapi juga dapat mempengaruhi kualitas udara secara signifikan dan dengan demikian dapat mempengaruhi kesehatan masyarakat, karena lalu lintas merupakan salah satu sumber polusi udara terpenting di daerah perkotaan. Dua polutan dipertimbangkan dalam penelitian ini: NO ₂ dan PM _{2.5} . Model lalu lintas, model emisi, model penyebaran dan model dampak kesehatan diadopsi. Pembangunan infrastruktur baru dan perubahan dalam manajemen lalu lintas diperkirakan memiliki efek kontras di berbagai bagian kota, sehingga hanya memberikan sedikit manfaat bagi kota secara keseluruhan. Perubahan angka kematian akibat perubahan konsentrasi NO ₂ akibat penurunan batas kecepatan diperkirakan meningkat menjadi 22,4 kematian pada
---	-------------------------------------	---	--	---

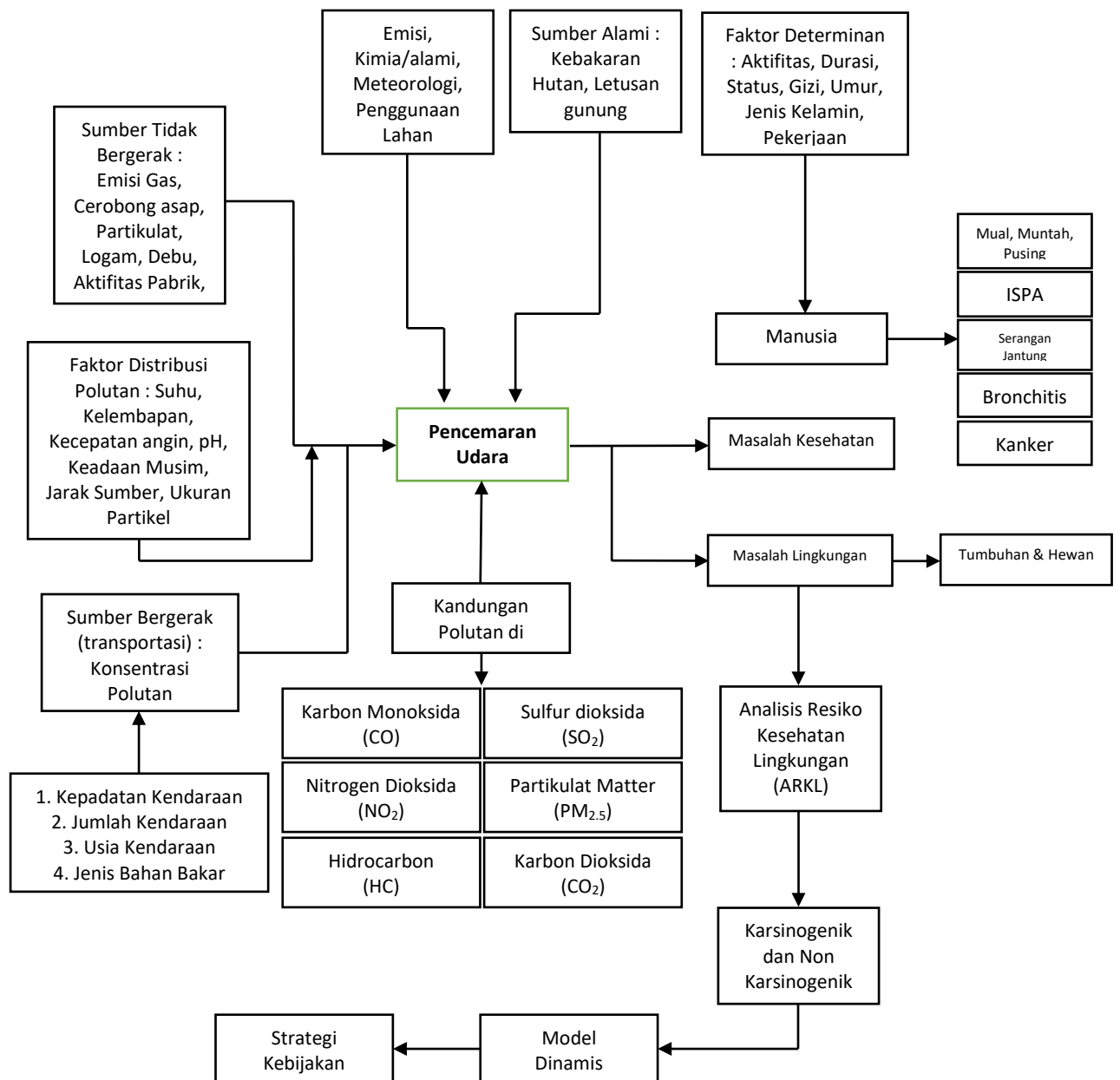
				<p>tahun 2013. Perubahan komposisi armada dari kendaraan berbahan bakar solar ke bensin diperkirakan dapat menurunkan konsentrasi PM2.5 dan NO2 serta kejadian kematian yang relevan untuk seluruh kota. Studi ini menyoroti pentingnya pertimbangan semua kemungkinan daerah yang terkena dampak di dalam kota. Ini juga menyoroti keseimbangan masalah keselamatan dan dampak kesehatan lingkungan, saat menilai dampak dari strategi manajemen lalu lintas</p>
9	(Wang <i>et al.</i> , 2020)	<i>Health benefits of on-road transportation pollution control programs in China</i>	<p>Untuk menganalisis efek tindakan pengendalian emisi kendaraan terhadap polusi udara ambien dan kematian terkait yang disebabkan oleh paparan jangka panjang partikel halus</p>	<p>Hasil riset ini menyimpulkan bahwa dampak total dari tindakan pengendalian ini sangat besar. Emisi kendaraan selama 1998–2015 akan menjadi 2–3 kali lebih besar dari yang sebenarnya, seandainya langkah-langkah tersebut tidak diterapkan. Konsentrasi rata-rata tahunan tertimbang populasi nasional dari PM2.5 dan O3 pada tahun 2015 akan lebih tinggi masing-</p>

			<p>(PM2.5) dan O₃ berdasarkan kerangka kerja penelitian terintegrasi yang menggabungkan analisis skenario, kualitas udara pemodelan, dan penilaian risiko kesehatan populasi</p>	<p>masing sebesar 11,7 µg/m³ dan 8,3 bagian per miliar, dan jumlah kematian yang disebabkan oleh polusi udara tahun 2015 akan lebih tinggi sebesar 510 ribu (Interval kepercayaan 95%: 360 ribu hingga 730 ribu) tanpa kontrol ini. Analisis kami menunjukkan konsentrasi dampak kematian di daerah perkotaan yang padat penduduk, memotivasi pembuat kebijakan lokal untuk merancang kebijakan pengendalian emisi kendaraan yang ketat. Hasilnya menyiratkan bahwa pengendalian emisi kendaraan akan memerlukan desain kebijakan yang lebih multifaset daripada pengendalian tradisional, terutama diwakili oleh standar emisi yang ketat, dengan pertimbangan yang cermat terhadap tantangan dalam mitigasi terkoordinasi baik PM2.5 dan O₃ di wilayah yang berbeda, untuk mempertahankan peningkatan dalam kualitas udara dan kesehatan masyarakat</p>
--	--	--	---	---

				mengingat pertumbuhan cepat yang berkelanjutan dalam populasi kendaraan China.
10	(Khardi and Bernoud-Hubac, 2022)	Editorial for the Special Issue “Impacts of Transport Systems on Air Pollution and Human Health”	Untuk mengetahui Dampak Sistem Transportasi terhadap Polusi Udara dan Kesehatan Manusia”	Sistem transportasi (lalu lintas jalan, kereta api dan pesawat) adalah kontributor utama kualitas udara yang buruk di kota-kota besar. Mereka memiliki dampak signifikan terhadap kesehatan manusia dan lingkungan terlepas dari peningkatan teknologi mesin, sistem pengurangan polutan, teknologi power-train canggih, dan pengembangan bahan bakar alternatif dan ramah lingkungan. Secara khusus, mobilitas listrik semakin diminati dalam pengembangan sektor transportasi berkelanjutan, yang bertujuan untuk mengurangi dampak kesehatan yang merugikan di daerah perkotaan dan pinggiran kota. Hubungan antara emisi polutan oleh sistem transportasi dan dampaknya terhadap kesehatan manusia telah cukup dibahas dalam Edisi Khusus

				<p>ini. Informasi dan metode baru yang disediakan mengkonfirmasi tautan terakhir dan menyarankan beberapa rekomendasi untuk peralihan pasar untuk sistem transportasi listrik. Selain itu, penting untuk menilai dampak sistem transportasi otonom, manajemen dan regulasinya dalam hal emisi, dampak kesehatan, dan degradasi lingkungan (ekosistem dan bangunan terutama untuk situs yang dilindungi yang diakui sebagai Warisan Dunia). Oleh karena itu, studi kualitatif dan kuantitatif lebih lanjut akan menentukan keseimbangan energi, karena merupakan bagian dari masalah lingkungan yang lebih luas, seperti transisi energi</p>
--	--	--	--	---

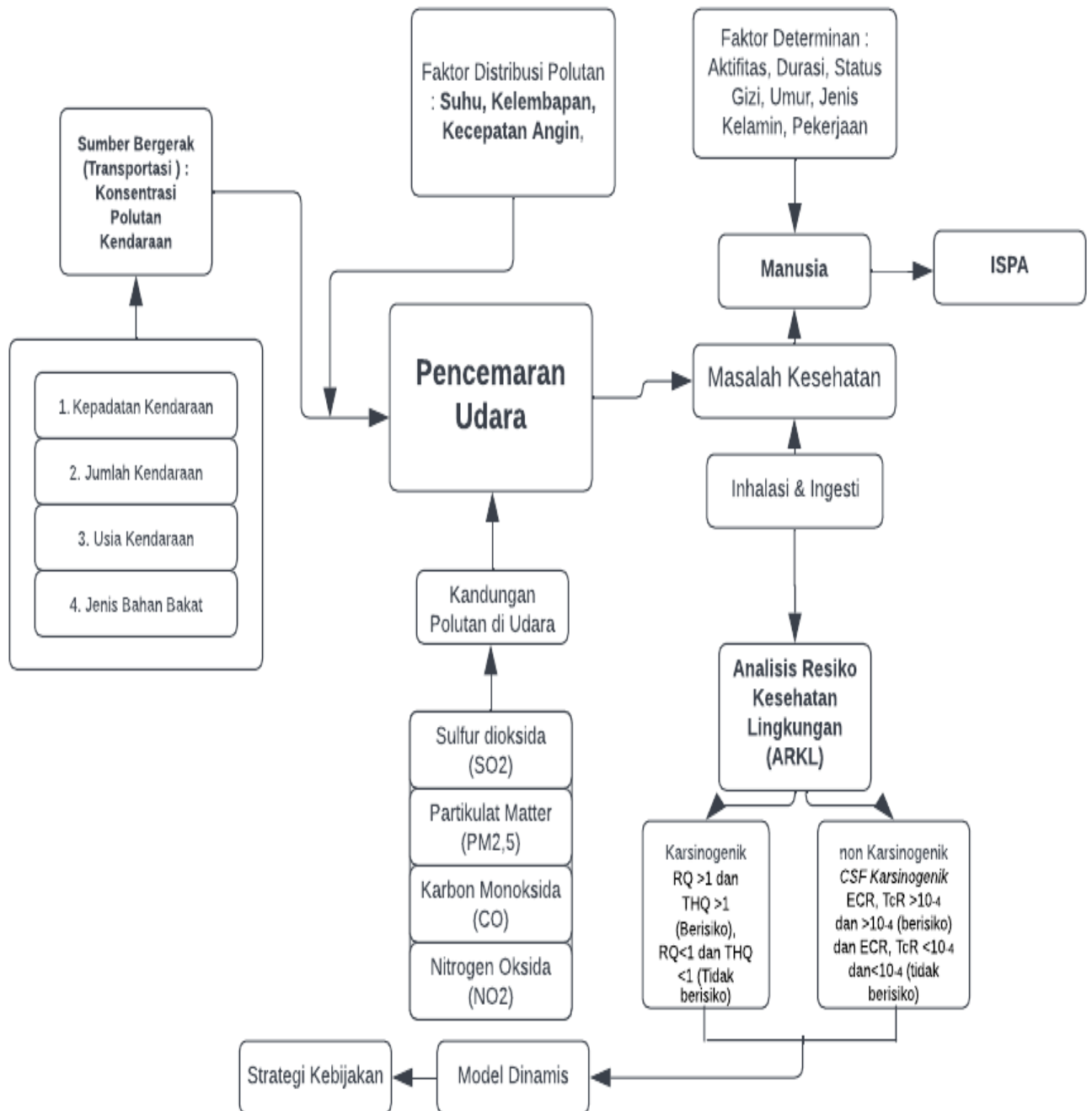
K. Kerangka Teori Penelitian



Gambar 2.1.4 Kerangka Teori (Amin & Vyas, 2016), (Hana F.I ; Aisyah Z, 2021), (Prasetyo & Amqan, 2020), (USEPA, 1989), (Ma'rufi, 2017) yang dimodifikasi

L. Kerangka Konsep Penelitian

Gambar Kerangka Konsep



Gambar 2.1.5 Kerangka Konsep