

**PENERAPAN MODEL AERMOD UNTUK MENSIMULASIKAN  
POLA DISPERSI EMISI KARBON MONOKSIDA (CO)  
SEBAGAI GAS BUANGAN INDUSTRI  
(Studi: PLTU Tonasa, Kec. Bungoro, Kabupaten Pangkep)**

Application of AERMOD for Dispertion Carbon Monoxide of  
Industrial Waste Gas

**M. ARDHIAS SYAM**

**H012191001**



**PROGRAM PASCASARJANA  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
MAKASSAR**

**2023**

**PENERAPAN MODEL AERMOD UNTUK MENSIMULASIKAN  
POLA DISPERSI EMISI KARBON MONOKSIDA (CO)  
SEBAGAI GAS BUANGAN INDUSTRI  
(Studi: PLTU Tonasa, Kec. Bungoro, Kabupaten Pangkep)**

Application of AERMOD for Dispertion Carbon Monoxide of  
Industrial Waste Gas

**M. ARDHIAS SYAM**

**H012191001**



**PROGRAM PASCASARJANA  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
MAKASSAR**

**2023**

**PENERAPAN MODEL AERMOD UNTUK MENSIMULASIKAN  
POLA DISPERSI EMISI KARBON MONOKSIDA (CO)  
SEBAGAI GAS BUANGAN INDUSTRI  
(Studi: PLTU Tonasa, Kec. Bungoro, Kabupaten Pangkep)**

Tesis

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar Magister

Program Studi  
Kimia

Disusun dan diajukan oleh

M. ARDHIAS SYAM

kepada

**PROGRAM PASCASARJANA  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
MAKASSAR  
2023**



**TESIS**

**PENERAPAN MODEL AERMOD UNTUK MENSIMULASIKAN  
POLA DISPERSI EMISI KARBON MONOKSIDA (CO), SEBAGAI  
GAS BUANGAN INDUSTRI**

**(Studi: PLTU Tonasa, Kec. Bungoro, Kab. Pangkep)**

**M. ARDHIAS SYAM**

**NIM: H012191001**

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam  
rangka Penyelesaian Studi Program Magister Program Kimia Fakultas  
Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Hasanuddin  
pada tanggal 4 Agustus 2023

dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

**Menyetujui**

**Pembimbing Utama**

**Pembimbing Pendamping**

**Dr. Maming, M.Si**  
NIP. 196312311989031031

**Dr. Alimuddin Hamzah Assagaf, M.Eng**  
NIP. 196709291993031003

**Ketua Program Studi  
Magister Kimia**

**Dekan Fakultas MIPA  
Universitas Hasanuddin**

**Prof. Dr. Hasnah Natsir, M.Si**  
NIP. 196203201987112001

**Dr. Eng. Amiruddin, M.Si**  
NIP. 197205151997021002



**PERNYATAAN KEASLIAN TESIS  
DAN KELIMPAHAN HAK CIPTA**

Yang bertanda tangan di bawah ini:

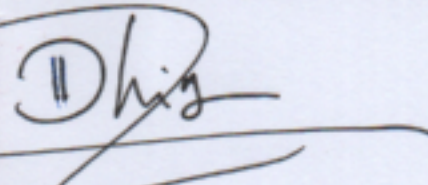
Nama : M. ARDHIAS SYAM  
Nim : H012191001  
Program Studi : Kimia

Dengan ini saya menyatakan bahwa, tesis berjudul "Penerapan Model AERMOD Untuk Mensimulasikan Pola Dispersi Emisi Karbon Monoksida (CO) Sebagai Gas Buangan Industri" adalah benar karya saya dengan arahan dari komisi pembimbing (Dr. Maming, M.Si sebagai Pembimbing Utama dan Dr. Alimuddin Hamzah Assagaf, M.Eng sebagai Pembimbing Pendamping). Karya ilmiah ini belum diajukan dan tidak sedang diajukan dalam bentuk apapun kepada perguruan tinggi manapun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka tesis ini. Sebagian dari isi tesis ini telah dipublikasikan di Jurnal EPIC 2021 AIP Conference Proceedings sebagai artikel dengan judul "*Application an AERMOD MODEL of Study Pollution Distribution Industrial Waste Gas*".

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya berupa tesis ini kepada Universitas Hasanuddin.

Makassar, 18 Agustus 2023





M. Ardhias Syam  
NIM: H012191001



## PRAKATA

*Alhamdulillah rabbil 'alamin.*

Puji syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT atas rahmat, hidayah, serta karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis ini yang berjudul **“Penerapan Model AERMOD Untuk Mensimulasikan Pola Dispersi Emisi Karbon Monoksida (CO) Sebagai Gas Buangan Industri”** sebagai salah satu syarat untuk mendapatkan gelar Magister Sains (M.Si) pada Prodi Magister Departemen Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Hasanuddin. Sholawat dan salam semoga senantiasa tercurah kepada Nabi Muhammad SAW yang telah menjadi suri tauladan bagi umat manusia.

Tiada kata yang mampu mengungkapkan rasa terima kasih dan rasa syukur yang teramat sangat kepada ibundaku tercinta atas segala jerih payah dan pengorbanan dalam membesarkan, mendidik dan membimbing penulis dengan penuh kasih sayang dan kesabaran, serta memberikan semangat, dorongan dan doanya dalam menyelesaikan hasil penelitian ini.

Penulis mengucapkan terima kasih dan penghargaan setinggi-tingginya kepada Bapak Dr. Maming, M.Si selaku pembimbing utama dan Bapak Dr. Alimuddin Hamzah Assagaf, M.Eng selaku pembimbing pertama, yang telah memberikan begitu banyak bantuan, masukan dan saran, motivasi untuk penulis mulai dari penyusunan proposal, penelitian, hingga penyusunan tesis ini. Kesempatan ini juga, penulis dengan segala kerendahan hati mengucapkan terima kasih kepada:

1. Ibu Dr. Hasnah Natsir, M.Si selaku Ketua Program Studi Magister Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Universitas Hasanuddin.
2. Dr. Indah Raya, M.Si, Dr. Sci. Muhammad Zakir, M.Si., Dr. Syarifuddin Liong, M.Si selaku dosen penguji yang telah memberikan ilmu, saran dan masukan dalam penyusunan proposal hingga tesis penulis.
3. Seluruh Dosen Pascasarjana Departemen Kimia yang telah memberikan ilmu kepada penulis selama perkuliahan.
4. Seluruh analis laboratorium yang senantiasa membantu penulis selama proses penelitian.
5. Seluruh staf Departemen Kimia dan Fakultas yang senantiasa membantu penulis dalam hal administrasi.

6. Teman-teman seperjuangan OKS19EN atas segala bantuan, dukungan, kebersamaan dan kekeluargaan dari awal perkuliahan hingga pada tahap ini.
7. Pimpinan dan staf Balai Besar Standardisasi dan Pelayanan Jasa Industri Hasil Perkebunan Mineral Logam dan Maritim (BBSPJIHPMM) khususnya Tim Laboratorium Pengujian, Tim Lembaga Inspeksi dan Tim Pelatihan Magang atas dukungan dan semangatnya untuk penulis.
8. Teristimewa umi', saudara/iku dan istriku tercinta yang luar biasa membersamai penulis dalam menempuh pendidikan dan karir pekerjaan penulis yang tiada henti mendoakan.
9. Tim Bismillah Projek Gotot Eko Junarto, Satria Putra Jaya Negara, Putut Waskito yang selalu hadir menemani sidang dan membantu penulis dalam mengolah data penelitian.
10. Seluruh pihak yang banyak membantu dan berkontribusi dalam hidup penulis selama ini khususnya dalam menjalani masa kuliah yang tidak bisa penulis sebutkan satu per satu.

Semoga Allah SWT membalas kebaikan kalian dengan memberikan pahala yang berlipat ganda. Akhir kata, semoga tesis ini dapat bermanfaat bagi diri penulis pribadi maupun pembaca. Aamiin.

Makassar, Juli 2023

Penulis

## ABSTRAK

M. ARDHIAS SYAM. Penerapan Model AERMOD Untuk Mensimulasikan Pola Dispersi Emisi Karbon Monoksida (CO) Sebagai Gas Buangan Industri (dibimbing oleh Maming dan Alimuddin Hamzah Assagaf)

Penelitian ini bertujuan untuk menentukan konsentrasi gas buangan CO dan pola sebaran serta konsentrasi emisi gas buangan CO yang di hasilkan oleh cerobong PLTU PT Semen Tonasa menggunakan model AERMOD. Penelitian ini dilakukan dengan metode deskriptif kuantitatif berupa pengumpulan data lapangan, pengolahan data lapangan, serta metode pemetaan untuk melihat pola sebaran emisi gas buangan PLTU. Pengukuran kadar CO menggunakan Instrumen E6000-6DSC dan pemodelan pola sebaran dengan aplikasi AERMOD. Pola sebaran emisis CO dengan AERMOD dominan mengarah ke arah timur hingga tenggara serta tingkat konsentrasi CO tertinggi pada rata-rata 1 jam:  $2.04 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ; rata-rata 8 jam:  $1.04 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ; dan rata-rata 24 jam:  $0.1444 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Hasil konsentrasi CO pada masing-masing model berada di bawah baku mutu sesuai peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor P. 19 Tahun 2017.

Kata kunci: Emisi, Karbon Monoksida, AERMOD



## **ABSTRACT**

M. ARDHIAS SYAM. Application of AERMOD for Dispersion Carbon Monoxide of Industrial Waste Gas (assisted by Maming and Alimuddin Hamzah Assagaf)

This research aims to determine the concentration of CO exhaust gas and the pattern of distribution and concentration of CO exhaust emissions produced by the PT Semen Tonasa PLTU chimney using the AERMOD model. This research was conducted using quantitative descriptive methods in the form of field data collection, field data processing, and mapping methods to see the pattern of distribution of PLTU exhaust emissions. Measurement of CO levels using the E6000-6DSC Instrument and modeling distribution patterns with the AERMOD application. The distribution pattern of CO emissions with AERMOD dominantly leads east to southeast and the highest CO concentration level at an average of 1 hour:  $2.04 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , an average of 8 hours :  $1.04 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , and 24-hour average:  $0.1444 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . The results of the CO concentration in each model are below the quality standard according to the Minister of Environment and Forestry Regulation Number P. 19 of 2017.

Kata kunci: Emissions, Carbon Monoxide, AERMOD

## DAFTAR ISI

|   | <b>halaman</b> |
|---|----------------|
| PRAKATA .....   | v              |
| ABSTAK .....  | vii            |
| ABSTACT .....   | viii           |
| DAFTAR ISI .....  | ix             |
| DAFTAR TABEL .....  | xi             |
| DAFTAR GAMBAR .....   | xii            |
| DAFTAR LAMPIRAN .....   | xiv            |
| DAFTAR SINGKATAN .....  | xv             |
| BAB I. PENDAHULUAN .....                                      | 1              |
| 1.1. Latar Belakang .....                                     | 1              |
| 1.2. Rumusan Masalah .....                                    | 3              |
| 1.3. Tujuan Penelitian .....                                  | 3              |
| 1.4. Manfaat Penelitian .....                                 | 3              |
| BAB II. TINJAUAN PUSTAKA .....                                | 4              |
| 2.1. Udara .....  | 4              |
| 2.2. Pencemaran Udara .....                                   | 5              |
| 2.3. Stabilitas Atmosfer .....                                | 5              |
| 2.4. Sumber Pencemaran .....                                  | 7              |
| 2.5. Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) .....               | 8              |
| 2.6. PLTU PT Semen Tonasa .....                               | 11             |
| 2.7. Emisi Gas Buang .....                                    | 11             |
| 2.8. Emisi CO dan Partikulat.....                             | 13             |
| 2.9. AERMOD .....   | 15             |
| 2.10. Dampak Polusi Udara Terhadap Kesehatan Masyarakat ..... | 18             |
| 2.11. Kerangka Pikir.....                                     | 20             |

|   |           |
|---|-----------|
| 2.12. Hipotesis .....                           | 21        |
| <b>BAB III. METODE PENELITIAN .....</b>         | <b>22</b> |
| 3.1. Rancangan Penelitian .....                 | 22        |
| 3.2. Waktu dan Lokasi Penelitian .....          | 22        |
| 3.3. Alat dan Bahan .....                       | 22        |
| 3.4. Prosedur Penelitian .....                  | 23        |
| <b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>        | <b>26</b> |
| 4.1 Gambaran Umum PLTU Semen Tonasa .....       | 26        |
| 4.2. Kondisi Sekitar PLTU Semen Tonasa .....    | 28        |
| 4.3. Hasil Pengukuran Emisi Tiap Semester ..... | 30        |
| 4.4. Hasil Laju Emisi .....                     | 31        |
| 4.5. Hasil Windrose .....                       | 31        |
| 4.6. Hasil Pemodelan AERMOD .....               | 36        |
| <b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>         | <b>47</b> |
| <b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>                     | <b>48</b> |
| <b>LAMPIRAN .....</b>                           | <b>51</b> |



## DAFTAR TABEL

|  |    |
|--|----|
| <b>Tabel 1.</b> Pembagian lapisan atmosfer menurut perbedaan suhu.....   | 4  |
| <b>Tabel 2.</b> Baku Mutu Emisi Bara Emisi Bagi Pembangkit Listrik Tenaga Termal<br>(Emisi Cerobong PLTU). ..... | 13 |
| <b>Tabel 3.</b> Sumber Pencemar Karbon Monoksida (CO) .....  | 14 |
| <b>Tabel 4.</b> Nilai Faktor Emisi.....  | 25 |
| <b>Tabel 5.</b> Jumlah Penduduk Menurut Jenis Kelamin per Desa di Kecamatan<br>Bungoro Tahun 2017 .....          | 26 |
| <b>Tabel 6.</b> Daftar Sumber Daya Alam .....  | 28 |
| <b>Tabel 7.</b> Spesifikasi Cerobong PLTU PT Semen Tonasa .....  | 29 |
| <b>Tabel 8.</b> Hasil Pengukuran Emisi Semester II PLTU Tonasa.....  | 30 |
| <b>Tabel 9.</b> Hasil Pengukuran Emisi PLTU Tonasa .....   | 31 |
| <b>Tabel 10.</b> Data Distribusi Angin Setiap Bulan .....  | 35 |
| <b>Tabel 11.</b> Hasil Pemodelan Konsentrasi Maksimum CO.....  | 40 |
| <b>Tabel 12.</b> Hasil Pengukuran Langsung Udara Ambien dan Konsentrasi Mode<br>Sebaran Emisi AERMOD .....       | 42 |

## DAFTAR GAMBAR

|   |    |
|---|----|
| <b>Gambar 1.</b> Bentuk kepulan dari sumber titik (a) looping (b) coning (c) fanning (d) lofting (e) fumigation (Saperaud, 2005 dalam Mahan, 2009)..... | 6  |
| <b>Gambar 2.</b> Alat ambient air sampler (Aluvihara, et al., 2020) .....   | 9  |
| <b>Gambar 3.</b> E Instruments E6000-6dsc.....  | 10 |
| <b>Gambar 4.</b> Metodologi Penelitian.....   | 21 |
| <b>Gambar 5.</b> Sketsa 3D Cerobong dan Bangunan PLTU PT Semen Tonasa.....  | 29 |
| <b>Gambar 6.</b> Arah Angin Untuk Tiap Bulan dan Kumulatif 10 Tahun.....  | 35 |
| <b>Gambar 7.</b> Isopleth Semester II 2020 Rata-Rata Periode Waktu .....  | 39 |
| <b>Gambar 8.</b> Grafik Hubungan Konsentrasi CO 1 Jam Terhadap Jarak .....  | 41 |

## DAFTAR LAMPIRAN

| Nomor urut                                    | Halaman |
|---|---------|
| 1. Lokasi Penelitian .....                    | 51      |
| 2. Alur Penelitian .....                      | 52      |
| 3. Penggunaan Alat AERMOD .....               | 53      |
| 4. Pengolahan AERMET .....                    | 58      |
| 5. Dokumentasi Penelitian .....               | 61      |
| 6. Peta Topografi .....                       | 62      |
| 7. Laporan Pengujian .....                    | 63      |
| 8. Laporan Pengujian Laboratorium BBIHP ..... | 65      |



## DAFTAR ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN

| Lambang/singkatan | Arti dan keterangan  |
|-------------------|--|
| PLTU              | Pembangkit Listrik Tenaga Uap  |
| PT                | Perseroan Terbatas   |
| AERMOD            | Perangkat Lunak yang menggunakan dasar perhitungan Gaussian Plume  |
| MO                | <i>Monin-obukhov length</i> , adalah stabilitas udara dimana turbulensi lebih banyak dihasilkan oleh daya apung daripada oleh geseran angin. |

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Pertumbuhan penduduk di Indonesia setiap tahun semakin meningkat. Pertumbuhan penduduk yang pesat tersebut berdampak pada peningkatan kebutuhan listrik negara. Dalam Rencana Umum Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) 2019-2028, pemerintah menargetkan rencana penambahan kapasitas pembangkit listrik di Indonesia sebesar 56.395 MW. Berdasarkan jumlah tersebut, Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) masih mendominasi jenis pembangkit yang akan direncanakan yaitu mencapai 54,6% dari total penambahan kapasitas yang direncanakan (Junarto dkk, 2021).

Pemerintah maupun swasta saat ini sedang gencar-gencarnya membangun pembangkit listrik di semua wilayah Indonesia untuk memenuhi kebutuhan listrik penduduk dan industri. Pembangunan PLTU berdampak positif terhadap pemenuhan kebutuhan listrik dan dapat mendorong perekonomian negara. Banyaknya rencana pembangunan PLTU juga berdampak negatif yaitu menyebabkan meningkatnya pemakaian batubara. PT. Perusahaan Listrik Negara (PLN) memproyeksikan konsumsi batu bara untuk kebutuhan PLTU di Indonesia pada tahun 2020 akan meningkat menjadi 109 juta ton dari konsumsi tahun 2019 sebesar 97 juta ton (Junarto dkk, 2021).

PLTU dapat memenuhi kebutuhan listrik dan mendorong perekonomian negara namun PLTU juga dapat memberi dampak buruk bagi lingkungan dan kesehatan masyarakat. Dalam pengoperasiannya, PLTU dapat menyebabkan arus urbanisasi yang meningkat di kota-kota, berbagai penyakit pernafasan, dan pencemaran lingkungan, tanah, air dan udara. Aktivitas PLTU memberi dampak negatif karena menghasilkan berbagai macam emisi yang berbahaya, seperti karbon monoksida (CO), Sulfur dioksida (SO<sub>2</sub>), Nitrogen dioksida (NO<sub>2</sub>) dan *Total Suspended Particulate* (TSP).

Berdasarkan data *World Health Organization* (WHO), diperkirakan sekitar 4,2 juta kematian secara global yang disebabkan oleh polusi udara (*Outdoor*) dan 91% populasi dunia hidup di tempat dengan kualitas udara di bawah standar yang

ditetapkan WHO. Indonesia merupakan negara yang menempati urutan ke-4 dengan jumlah kematian tertinggi yang disebabkan oleh polusi udara. Selain itu, emisi yang di hasilkan dari aktivitas PLTU batu bara juga merupakan kontributor gas rumah kaca (GRK).

Polusi udara yang berasal dari emisi industri seperti PLTU sangat berbahaya. Dalam waktu paparan yang singkat dapat memberi pengaruh pada efek kesehatan seperti radang paru-paru, infeksi saluran pernafasan atas (ISPA), gangguan pada sistem kardiovaskuler, bahkan menyebabkan kematian. Sementara dampak jangka panjang dapat meningkatkan gejala gangguan saluran pernafasan bawah, eksaserbasi asma, penurunan fungsi paru pada anak-anak, peningkatan obstruktif paru- paru kronis, penurunan fungsi paru-paru pada orang dewasa, penurunan rata-rata tingkat harapan hidup terutama kematian yang diakibatkan oleh penyakit cardiopulmonary dan probabilitas kejadian kanker paru-paru.

Salah satu Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) yang di bangun di Sulawesi Selatan tepatnya di Bulu Cindea, Kec. Bungoro, Kabupaten Pangkep dengan kapasitas 2 x 35 MW, Emisi gas buang PLTU dapat menyebar ke area pemukiman bergantung pada pola dan arah sebaran oleh karena itu salah satu cara untuk mengantisipasi hal buruk yang dapat disebabkan oleh aktivitas PLTU PT Semen Tonasa di kabupaten Pangkep, maka diperlukan pengetahuan dini terkait pola penyebaran untuk memodelkan distribusi dari sebaran emisi gas dan partikulat berbahaya yang dihasilkan oleh PLTU. Pemodelan tersebut merupakan salah satu aspek penting dalam menentukan kualitas udara. Analisis ini akan membentuk hubungan antara emisi terhadap wilayah kependudukan yang terkena dampak.

Hal-hal yang dapat dilakukan untuk mengantisipasi dampak, mengingat tujuan ke-3 dari *Sustainable Development Goals* yaitu kesehatan yang baik dan kesejahteraan. Pemodelan tersebut menggunakan aplikasi AERMOD. AERMOD merupakan model *Stady State* yang mengasumsikan penyebaran emisi dalam arah horizontal dan vertikal dengan menggunakan distribusi konsentrasi *Gaussian*. Hasil prediksi pola dapat menggambarkan nilai konsentrasi polutan hingga beberapa kilometer dari sumber emisi berdasarkan kondisi klimatologi dan topografi wilayah tersebut. Penggunaan aplikasi AERMOD yang efektif dalam



pengukuran polutan diharapkan mampu untuk memberikan informasi terkait dampak yang ditimbulkan dari PLTU.

## **1.2 Rumusan Masalah**

Rumusan masalah yang dapat dikemukakan adalah seberapa besar emisi gas buang dan bagaimana pola dispersi CO yang dihasilkan oleh cerobong PLTU PT Semen Tonasa, Kec. Bungoro, Kabupaten Pangkep dengan menggunakan model AERMOD ?

## **1.3 Tujuan Penelitian**

Berdasarkan rumusan masalah tersebut maka tujuan penelitian adalah menentukan emisi gas buang karbon monoksida CO dan model pola dispersi CO yang di hasilkan oleh cerobong PLTU PT Semen Tonasa, Kec. Bungoro, Kabupaten Pangkep menggunakan model AERMOD.

## **1.4 Manfaat Penelitian**

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Sebagai informasi mengenai konsentrasi gas buang yang dihasilkan oleh PLTU PT Semen Tonasa, Kec. Bungoro, Kabupaten Pangkep.
2. Model yang dihasilkan dapat dijadikan sebagai arahan dan informasi kepada masyarakat untuk mengantisipasi dampak penyakit yang dapat ditimbulkan dari emisi gas buang industri dan juga sebagai bahan dan masukan bagi PLTU PT Semen Tonasa, Kec. Bungoro, Kabupaten Pangkep.
3. Sebagai informasi yang ditujukan untuk mendapatkan gambaran secara cepat tentang arah dan luas penyebaran polutan.

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Udara

Atmosfer adalah lingkungan udara, yakni udara yang meliputi planet bumi ini. Atmosfer terdiri dari berbagai lapisan dan bentuk karena adanya interaksi antara sinar-sinar matahari, gaya tarik bumi, rotasi bumi, dan permukaan bumi. Lapisan-lapisan atmosfer dapat dikenali dari perbedaan suhunya.

**Tabel 1.** Pembagian lapisan atmosfer menurut perbedaan suhu.

| Lapisan           | Suhu (°C)  | Altitude (km) | Unsur Kimia utama                                 |
|-------------------|------------|---------------|---|
| <i>Troposfir</i>  | 15 – (-)56 | 0-11          | N <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> |
| <i>Stratosfir</i> | (-)56-(-)2 | 11-50         | H <sub>2</sub> O                                  |
| <i>Mesosfir</i>   | (-)2-(-)92 | 50-85         | O <sub>3</sub>                                    |
| <i>Thermosfir</i> | (-)92-1200 | 85-100        | O <sub>2</sub> , O, NO                            |

Sumber: Soemirat, 2011.

Menurut Fardiaz (1992), udara adalah suatu campuran gas yang terdapat pada lapisan yang mengelilingi bumi. Komposisi campuran gas tersebut tidak selalu konstan. Komponen yang konsentrasinya paling bervariasi adalah air dalam bentuk uap H<sub>2</sub>O dan karbon dioksida (CO<sub>2</sub>). Jumlah uap air yang terdapat di udara bervariasi tergantung dari cuaca dan suhu.

Udara sesungguhnya dihangatkan oleh penyerapan radiasi matahari yang dipantulkan oleh bumi, misalnya panas yang dihasilkan dari proses pembakaran yang terjadi di bumi. Hasil studi menggambarkan bahwa panas yang dihasilkan oleh pembakaran adalah sekitar 20% dari total radiasi matahari yang telah diterima bumi per tahun, atau 1/3 dari total radiasi bumi. Densitas udara berbanding terbalik dengan temperatur sehingga udara yang telah hangat densitinya rendah, dan udara menyebar (mengekspansi) dan bergerak ke arah atas. Naiknya ke atas udara panas, bersamaan itu pula segera dilepaskan panas akibat rendahnya temperatur troposfer pada ketinggian tertentu, dan akibatnya densitas udara lambat laun meningkat, maka udara bergerak turun kembali ke permukaan bumi (Sjahrul, 2013).

## **2.2 Pencemaran Udara**

Pencemaran udara adalah masuknya atau dimasukkannya zat, energi, dan/atau komponen ke dalam udara ambien oleh kegiatan manusia, sehingga mutu udara turun sampai ke tingkat tertentu yang menyebabkan udara ambien tidak dapat memenuhi fungsinya (Suharto, 2011).

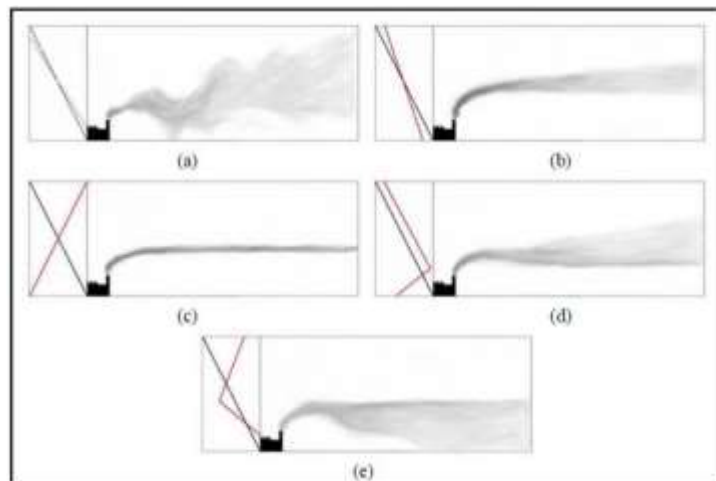
Pencemaran udara di Indonesia sudah menjadi masalah yang serius terutama di beberapa kota besar seperti Jakarta, Surabaya, Semarang, Bandung dan Medan, maupun pada pusat-pusat pertumbuhan Industri. Hasil pemantauan beberapa parameter pencemaran udara (debu, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO, HC, dan Pb) menunjukkan kualitas udara ambien di lokasi-lokasi tertentu di kota-kota besar cukup memperhatikan. Berkaitan dengan isu lingkungan global, Indonesia sebagai negara dengan jumlah penduduk nomor empat di dunia juga menghasilkan emisi Gas Rumah Kaca (GRK) yang dapat menyebabkan pemanasan global. Namun dengan adanya hutan tropis yang luas, GRK tersebut banyak diserap kembali (Daud, 2011). Berat atau ringannya suatu pencemaran udara di suatu daerah sangat bergantung pada iklim lokal, topografi, kepadatan penduduk, banyaknya industri yang berlokasi di daerah tersebut, penggunaan bahan bakar dalam industri, suhu udara panas di lokasi, dan kesibukan transportasi. Suatu daerah yang tinggi lokasinya dari permukaan laut (pegunungan), curah hujan akan membantu proses pembersihan udara, angin yang kencang dapat pula menyapu polutan udara ke daerah lain yang lebih jauh (Darmono 2001).

## **2.3 Stabilitas Atmosfer**

Pengaruh kestabilan atmosfer mempengaruhi bentuk kepanan dari cerobong. Pada kondisi atmosfer stabil, kepanan cenderung menyempit dan tidak terdispersi ke sekelilingnya. Kepanannya seolah membentuk konsentrasi yang tinggi. Kondisi atmosfer yang stabil bersifat tidak menguntungkan bagi reseptor, karena reseptor menerima paparan konsentrasi pencemar yang tinggi. Sebaliknya pada kondisi atmosfer yang tidak stabil, pencemar bergerak bebas pada daerah yang vertikal luas dan menghasilkan percampuran dengan udara ambien lebih baik, sehingga konsentrasi polutan yang terukur rendah. Kondisi yang tidak stabil ini menguntungkan dalam pendispersian polutan, karena polutan dengan segera

terdispersi dengan lingkungan sekitar sehingga reseptor tidak mengalami paparan konsentrasi pencemar yang tinggi.

Menurut Wahono (2003) dalam Puspitasari (2011), perbedaan kondisi stabilitas atmosfer dari waktu ke waktu menyebabkan terjadinya perbedaan dalam tipe keputan yang dikeluarkan suatu cerobong asap. Ada 3 (tiga) tipe keputan asap berdasarkan kondisi stabilitas atmosfer, yaitu tipe keputan looping pada kondisi atmosfer tidak stabil, tipe keputan fanning pada kondisi stabil, dan tipe keputan coning pada kondisi netral. Selain itu terdapat pola peralihan yakni, tipe keputan fumigation yang dikaitkan dengan inversi radiatif yang pada umumnya menghilang menjelang siang, tipe keputan lofting tidak terjadi percampuran ke arah bawah, namun penyebarannya ke arah atas dan tipe keputan trapping yang terjadi jika inversi panas atau secara fisis menjerat gas buang dalam lapisan udara permukaan.



**Gambar 1.** Bentuk keputan dari sumber titik (a) looping (b) coning (c) fanning (d) lofting (e) fumigation (Saperaud, 2005 dalam Mahan, 2009).

Pemodelan dispersi pencemar menjadi salah satu pilihan untuk mempelajari pola sebaran pencemar digunakan, yaitu: (1) model empirik atau statistik, model ini digunakan untuk menghubungkan data konsentrasi suatu lingkungan dengan lingkungan lain, misalnya CAR-model, suatu model untuk mengestimasi kepadatan lalu lintas dengan perubahan area; (2) model Gauss atau plume-model, merupakan model teori dasar penyebaran mengenai distribusi polutan karena turbulensi, model ini dapat digunakan pada skala lokal; (3) model Lagrangian, model untuk paket udara sebagai fungsi waktu sepanjang aliran streamlines dalam atmosfer. Model ini digunakan untuk menganalisis emisi polutan pada topografi yang kompleks, sedangkan aliran dan perubahan konsentrasinya dikaji secara

particularity. Jenis model partikel Lagrangian merupakan satu level di atas model puff dan (4) model Eulerian, suatu model untuk menganalisis konsentrasi satu atau beberapa kotak, pergerakan dari kotak ke kotak dipengaruhi oleh kecepatan angin (Ruhiat, 2009).

## 2.4 Sumber Pencemaran

Sumber pencemaran adalah setiap kegiatan atau usaha dan/atau kegiatan yang mengeluarkan bahan pencemaran ke udara yang menyebabkan udara tidak berfungsi, Menurut Suharto (2011). Sumber pencemaran udara terbagi menjadi dua yaitu, Sumber pencemaran primer dan sumber pencemaran sekunder. Sumber pencemaran udara primer terdiri atas senyawa kimia yang tidak berubah komposisinya, bentuk fisik dan/atau bentuk senyawa kimia dari sumber pencemaran ke udara dengan waktu tinggal yang cukup lama dari waktu bulanan ke tahunan dan sangat stabil. Sumber pencemaran udara primer adalah karbon dioksida ( $\text{CO}_2$ ), nitrogen dioksida ( $\text{NO}_2$ ), sulfur dioksida ( $\text{SO}_2$ ), partikulat dan hidrokarbon. Bahan pencemaran Pb dan debu, karbon monoksida ( $\text{CO}$ ), metan ( $\text{CH}_4$ ), benzena ( $\text{C}_6\text{H}_6$ ), sulfur dioksida ( $\text{SO}_2$ ) termasuk partikulat merupakan sumber bahan pencemar primer. Pencemaran udara primer terdiri atas bahan kimia berbahaya langsung masuk ke dalam atmosfer.

Sumber pencemaran udara sekunder yang dihasilkan di atmosfer oleh peristiwa reaksi kimia seperti hidrolisis, oksidasi, dan reaksi fotokimia. Bahan pencemaran udara sekunder diperoleh dari sumber bergerak yang merupakan sumber emisi bergerak atau tidak tetap pada suatu tempat dari kendaraan bermotor dan bahan kimia berbahaya yang terbentuk dari senyawa lain dan dilepas ke udara. Gas buang dari kendaraan yang menggunakan bahan bakar fosil seperti bensin, minyak diesel, minyak tanah, batu bara dan gas alam (Suharto, 2011).

Proses pembangunan, khususnya pembangunan dibidang industri sangat erat hubungannya dengan pembangunan transportasi. Pembangunan industri diarahkan pada penguatan dan pendalaman struktur industri untuk meningkatkan efisiensi dan daya saing industri. Kegiatan suatu industri mempunyai arti penting yang potensial dalam menghasilkan bahan pencemar udara. Bahan pencemar udara yang dapat dikeluarkan oleh industri maupun pembangkit listrik antara lain adalah partikel debu, gas sulfur dioksida ( $\text{SO}_2$ ), gas nitrogen dioksida ( $\text{NO}_2$ ), gas

karbon monoksida (CO), gas NH<sub>3</sub> (amoniak) dan gas hidrokarbon (HC) (Mukono, 2010).

## 2.5 Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU)

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) adalah pembangkit yang mengandalkan energi kinetik dari uap untuk menghasilkan energi listrik. Bentuk utama dari pembangkit listrik jenis ini adalah Generator yang seporos dengan turbin yang digerakkan oleh tenaga kinetik dari uap panas/kering. Pembangkit listrik tenaga uap menggunakan berbagai macam bahan bakar terutama batu bara dan minyak bakar serta MFO untuk *startup* awal.

PLTU merupakan penghasil energi dengan menggunakan bahan bakar dari batubara. Di Indonesia sendiri memiliki sumber daya batubara yang melimpah, sehingga instalasi ini menjadi pilihan utama penghasil energi yang digunakan dan didukung dengan biaya operasional yang murah apabila dibandingkan dengan sistem pembangkit listrik lainnya. Batubara adalah sumberdaya tambang yang berasal dari fosil makhluk hidup jutaan tahun yang lalu, yang berarti bahwa batubara ini bersifat organik. Terdapat dua jenis batubara, yaitu yang berkualitas baik yang akan menghasilkan sedikit bahan pencemar sehingga tidak berbahaya bagi lingkungan dan batubara yang berkualitas rendah yang akan menghasilkan berbagai macam unsur berbahaya yang dapat mencemari lingkungan, seperti gas Sulfur, Nitrogen dan Sodium (Yunita, 2017)

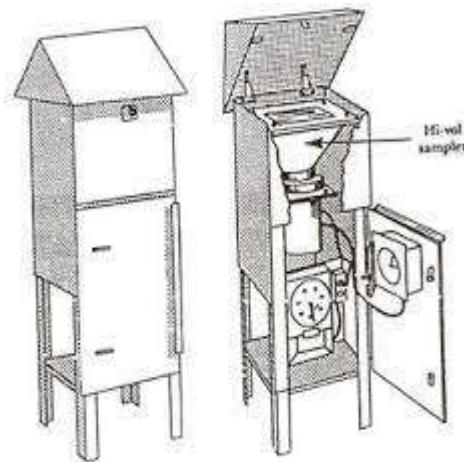
Batu bara merupakan bahan bakar fosil dengan harga yang kompetitif dan lebih murah jika dibandingkan bahan bakar minyak dan bahan bakar gas. Indonesia memiliki sumber daya batu bara yang sangat besar dengan jumlah 125,28 miliar ton dan cadangan yang dapat ditambang sebesar 32,36 miliar ton. Sebagian besar kebutuhan batu bara di dalam negeri saat ini digunakan sebagai bahan bakar PLTU untuk menghasilkan energi listrik. PLTU batu bara adalah sumber utama energi listrik di Indonesia karena sumber daya batu bara yang cukup besar dan harganya relatif lebih murah dibandingkan bahan bakar minyak (Sartika, 2018).

Berdasarkan PP Nomor 79 Tahun 2014 tentang Kebijakan Energi Nasional (KEN), sasaran bauran energi primer yang optimal dengan menggunakan sumber energi primer batu bara minimal 30%, gas bumi minimal 22%, minyak bumi kurang dari 25% dan EBT paling sedikit 23%. Untuk mendukung pencapaian tersebut dalam Rencana Umum Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) tertuang rencana



pembangunan ketenagalistrikan tahun 2015-2019 meliputi pengembangan pembangkit, jaringan transmisi, gardu induk dan jaringan distribusi. Tambahan pembangkit baru yang diperlukan untuk 5 tahun ke depan sebesar 35 GW dimana PLTU berkontribusi paling besar dalam rencana penambahan pembangkit baru tersebut.

Proses pengukuran udara lingkungan sekitar menggunakan instrumen atau alat *ambient air sampler*, studi dan investigasi udara ambien disekitar daerah pabrik diharapkan ada pemantauan kualitas udara ambien melalui parameter konsentrasi. Penggunaan alat ini bagian penting adalah penggunaan kertas saring whattman, seperti celah atau pori kecil pada kertas saring diamati dengan sumber cahaya terang, kelembaban kertas saring dijaga dengan menempatkan pada wadah steril, berat kertas saring dari kelembaban diukur nilai desimal empat angka dibelakang koma menggunakan neraca analitik.



**Gambar 2.** Alat ambient air sampler (Aluvihara, et al., 2020)

Penempatan instrumen di tempatkan pada lokasi yang dipilih dan ditinjau dari aspek penting berikut sebelum instrumen dinyalakan, yaitu kondisi iklim dan perlakuan kalibrasi dimana dikonfirmasi cairan monometer uji sama dengan nol (Aluvihara, et al., 2020).



**Gambar 3.** E Instruments E6000-6dsc

Merupakan alat yang fleksibel berfungsi sebagai analisis emisi yang dapat menganalisa hingga enam sensor gas. E6000 adalah monitor emisi portabel inovasi untuk pengukuran akurat gas cerobong dari proses pembakaran termasuk boiler, burner, mesin gas dan diesel, turbin, tungku, pemanas, kiln, dan analisis laboratorium.

Prinsip kerja alat, dimana ampel gas diambil melalui probe gas, dengan pompa hisap diafragma di dalam instrumen. Probe pengukur memiliki kerucut pemosisian geser yang memungkinkan probe dimasukkan ke dalam lubang dengan diameter 11 mm (0.43") hingga 16 mm (0.65") dan untuk menyesuaikan kedalaman pencelupan. Disarankan agar titik pengambilan sampel gas ditengah cerobong pada titik sampling. Sampel gas dibersihkan dari kelembapan dan kotoran dengan perangkat kondensat dan filter yang ditempatkan di sepanjang selang karet yang menghubungkan probe ke penganalisa. Gas tersebut kemudian dianalisa komponennya dengan sensor elektrokimia dan infra merah. Sel elektrokimia menjamin hasil presisi tinggi dalam interval waktu hingga sekitar 60 menit selama instrumen dapat dianggap sangat stabil. Saat pengukuran akan memakan waktu lama, disarankan untuk melakukan zero-ing otomatis pada instrumen lagi dan membilas dalam pneumatik selama tiga menit dengan udara bersih. Selama fase kalibrasi nol, instrumen menyerap udara bersih dari lingkungan dan mendeteksi penyimpanan dari nol (20.95% untuk O<sub>2</sub>), lalu membandingkannya dengan nilai terprogram. Autozero sensor harus dilakukan secara manual sebelum mengukur tekanan, nilai yang diukur dan dihitung oleh mikroprosesor ditampilkan pada layar LCD (Sauermann, 2019)

## 2.6 PLTU PT Semen Tonasa

PT Semen Tonasa adalah produsen semen terbesar di kawasan Timur Indonesia yang menempati lahan seluas 715 hektar di Desa Biringere, Kecamatan Bungoro, Kabupaten Pangkep, sekitar 68 kilometer dari kota Makassar. Perseroan yang memiliki kapasitas terpasang 5.980.000 ton semen per tahun ini, mempunyai empat unit pabrik, yaitu Pabrik Tonasa II, III, IV dan V. Keempat unit pabrik tersebut menggunakan proses kering dengan kapasitas masing-masing 590.000 ton semen per tahun untuk Unit II dan III, 2.300.000 ton semen per tahun untuk Unit IV serta 2.500.000 ton semen untuk Unit V.

Lokasi pabrik yang berada di Sulawesi Selatan merupakan daerah strategis untuk mengisi kebutuhan semen di daerah Indonesia bagian timur yang dengan didukung oleh jaringan distribusi yang tersebar dan diperkuat oleh sembilan unit pengantongan semen yang melengkapi sarana distribusi penjualan, telah menjadikan perseroan sebagai pemasok terbesar di kawasan tersebut. Unit pengantongan semen berlokasi di Palu, Banjarmasin, Bitung, Kendari, Ambon dan Mamuju dengan kapasitas masing-masing 300.000 ton semen per tahun serta di Makassar, Bali dan Samarinda dengan kapasitas masing-masing 600.000 ton semen per tahun. Sarana pendukung operasi lainnya yang berkontribusi besar terhadap pencapaian laba perusahaan adalah utilitas Pembangkit listrik Tenaga Uap (PLTU) dengan kapasitas 2 X 25 MW dan 2 X 35 MW yang berlokasi di Desa Bulu Cindea, Kabupaten Pangkep, sekitar 17 km dari lokasi pabrik. PT. Semen Tonasa membangun PLTU karena ketidaksanggupan PT. PLN memasok energi listrik untuk pengoperasian pabrik Tonasa IV, dimana PT. PLN hanya sanggup memasok listrik sebesar 20 MW dari 60 MW yang dibutuhkan. Berdasarkan informasi yang diperoleh dari PLTU PT. Semen Tonasa, selama pengoperasiannya telah terjadi penurunan daya mampu dari 25 MW pada saat komisioning menjadi 20 MW pada saat operasi sekarang.

## 2.7 Emisi Gas Buang

Emisi adalah putih zat, energi dan atau komponen lain yang dihasilkan dari kegiatan yang masuk atau dimasukkan keudara ambien. Beberapa gas buang industri diantaranya: Sulfur dioksida ( $SO_2$ ), Nitrogen dioksida ( $NO_2$ ) dan Karbon dioksida ( $CO_2$ ), Sulfur dioksida ( $SO_2$ ) adalah komponen pencemar udara dengan

jumlah paling banyak. Gas ini memiliki karakteristik tidak berwarna dan berbau tajam, apabila bereaksi dengan uap air di udara akan menjadi  $H_2SO_4$  atau dikenal sebagai hujan asam yang dapat menimbulkan kerusakan baik material, benda, maupun tanaman (Suyono, 2014). Berdasarkan informasi *Material Safety Data Sheet* (MSDS) pajanan gas  $SO_2$  dapat menyebabkan iritasi mata, hidung, tenggorokan, sinus, edema paru, bahkan berujung pada kematian. Menurut hasil penelitian Wahyuddin, et al. (2016), rata-rata konsentrasi  $SO_2$  dalam udara ambient di sekitar PT. PLN (Persero) Sektor Pembangkit Tello tahun 2014 adalah  $44.5925 \mu g/Nm^3$ . Rata-rata laju asupan udara yang mengandung  $SO_2$  di sekitar PT. PLN (Persero) Sektor Pembangkit Tello tahun 2014 adalah  $10,98 m^3/hari$ . Rata-rata durasi paparan terhadap  $SO_2$  dalam udara ambient pada masyarakat di sekitar PT. PLN (Persero) Sektor Pembangkit Tello tahun 2014 adalah 21.634 tahun. Rata-rata berat badan masyarakat yang terpapar  $SO_2$  dalam udara ambient di sekitar PT. PLN (Persero) Sektor Pembangkit Tello tahun 2014 adalah 58.46 kg. Rata-rata besaran risiko (RQ) gangguan kesehatan akibat terpapar  $SO_2$  pada masyarakat yang bermukim di sekitar PT. PLN (Persero) Sektor Pembangkit Tello adalah 4.125205. Berdasarkan hasil perhitungan besaran risiko (RQ) rata-rata masyarakat di sekitar PT. PLN (Persero) Sektor Pembangkit Tello memiliki  $RQ > 1$  mempunyai risiko yang tinggi untuk terpapar  $SO_2$ .

Gas nitrogen dioksida ( $NO_2$ ) merupakan polutan udara ambient bersama unsur nitrogen monoksida (NO) yang biasanya dihasilkan dari kegiatan manusia seperti pembakaran bahan bakar mesin kendaraan, pembakaran sampah, pembakaran batu bara dan industri. Karakteristik gas ini memiliki bau tajam dan berwarna coklat dimana dampaknya terhadap kesehatan terutama adalah penurunan fungsi paru, menyebabkan sesak napas, bahkan berujung pada kematian (Suyono, 2014). Berdasarkan informasi MSDS, pajanan gas  $NO_2$  dapat menyebabkan iritasi lendir, sinus, faring, respirasi tidak teratur, bahkan edema paru. Efek terhadap gas toksik ini bergantung pada dosis serta lamanya pajanan. Bertambahnya jumlah kendaraan bermotor tiap tahun dapat berdampak pada peningkatan  $NO_2$  dan akan memberi efek negatif pada kesehatan manusia (Wijayanti, 2012).

Karbon dioksida ( $CO_2$ ) adalah gas rumah kaca utama yang dihasilkan melalui aktivitas manusia. Pada tahun 2017,  $CO_2$  menyumbang sekitar 81,6 persen dari semua emisi gas rumah kaca Amerika Serikat yang bersumber dari aktivitas manusia. Karbon dioksida hadir secara alami di atmosfer sebagai bagian

dari siklus karbon Bumi (sirkulasi alami karbon: atmosfer, lautan, tanah, tanaman, dan hewan). Aktivitas manusia mengubah siklus karbon dengan menambahkan lebih banyak CO<sub>2</sub> ke atmosfer, sehingga mempengaruhi kemampuan degradasi alami, seperti hutan, untuk menghilangkan CO<sub>2</sub> dari atmosfer, dan memengaruhi kemampuan tanah untuk menyimpan karbon. Sementara emisi CO<sub>2</sub> berasal dari berbagai sumber alami, emisi yang dihasilkan manusia bertanggung jawab atas peningkatan yang telah terjadi di atmosfer sejak revolusi industri. Aktivitas utama manusia yang mengeluarkan CO<sub>2</sub> adalah pembakaran bahan bakar fosil (batu bara, gas alam, dan minyak) untuk energi dan transportasi, meskipun beberapa proses industri dan perubahan penggunaan lahan juga mengeluarkan CO<sub>2</sub>.

**Tabel 2.** Baku Mutu Emisi Bara Emisi Bagi Pembangkit Listrik Tenaga Termal (Emisi Cerobong PLTU).

| No. | Parameter                          | Ketel Uap Berbahan Bakar (Mg/Nm <sup>3</sup> ) |        |     |
|-----|------------------------------------|--|--------|-----|
|     |                                    | Batu bara                                      | Minyak | Gas |
| 1.  | Partikulat                         | 100  | 100    | 30  |
| 2.  | Sulfur dioksida (SO <sub>2</sub> ) | 750  | 650    | 50  |
| 3   | Nitrogen oksida (NO <sub>x</sub> ) | 750  | 450    | 150 |

Sumber: Permen LHK No. 19 Tahun 2017

## 2.8 Emisi CO

### 2.8.1. CO (Karbon Monoksida)

Menurut Nevers (2000) tiga perempat dari CO yang masuk ke udara berasal dari aktivitas manusia terutama dari kendaraan bermotor yang menggunakan mesin internal engines, internal engines merupakan sebuah mesin yang sumber tenaganya berasal dari tinggi hasil campuran bahan bakar dan udara yang berlangsung di dalam ruang bakar. Konsentrasi ambien CO yang paling tinggi berasal dari kota-kota besar, dimana hampir semua konsentrasi CO berasal dari kendaraan bermotor. Pengendalian yang paling efektif dari CO adalah dengan cara mengurangi emisi dari kendaraan bermotor. CO juga dihasilkan dalam jumlah yang sedikit berasal dari proses pembakaran, contohnya adalah dari kebakaran hutan dan proses perindustrian.

Menurut Wardhana (2004) Karbon Monoksida adalah suatu gas yang tak berwarna, tidak berbau dan juga tidak berasa. Gas CO dapat berbentuk cairan pada suhu di bawah -192°C. Gas CO sebagian besar berasal dari pembakaran

bahan bakar fosil dengan udara, berupa gas buangan. Kota besar yang padat lalu lintasnya akan banyak menghasilkan gas CO sehingga kadar CO dalam udara relatif tinggi dibandingkan dengan daerah pedesaan. Selain dari itu gas CO dapat pula terbentuk dari proses industri. Secara alamiah gas CO juga dapat terbentuk, walaupun jumlahnya relatif sedikit, seperti gas hasil kegiatan gunung berapi, proses biologi dan lain-lainnya.

Fardiaz dalam Buanawati (2017) menyatakan bahwa konsentrasi CO di udara per waktu dalam satu hari dipengaruhi oleh kesibukan atau aktivitas kendaraan bermotor. Semakin ramai kendaraan bermotor yang ada, semakin tinggi tingkat polusi CO di udara. Sumber pencemar gas CO yang terbesar, berdasarkan hasil penelitian di negara-negara industri, adalah berasal dari pemakaian bahan bakar fosil (minyak, batubara) pada mesin-mesin penggerak transportasi (Hadihardaja dalam Damara 2017). Hal ini dapat dilihat sebagai berikut:

**Tabel 3.** Sumber Pencemar Karbon Monoksida (CO)

| <b>Sumber Pencemar CO Bergerak</b>       | <b>Jumlah Presentase</b> |
|--|--------------------------|
| 1. Transportasi                          | 63,8%                    |
| <b>Sumber Pencemar CO Tidak Bergerak</b> |                          |
| 1. Pembakaran Stasioner                  | 1,9 %                    |
| 2. Proses Industri                       | 9,6 %                    |
| 3. Pembuangan Limbah Padat               | 7,8 %                    |
| 4. Lain-Lain                             | 16,9 %                   |

Sumber : *Hadihardaja 1997*

Cara Pengukuran CO menggunakan Air Sampler Impinger.

Pada penelitian ini dilakukan pengukuran konsentrasi Karbon Monoksida pada Udara Ambien Alat analisis gas CO bekerja atas dasar sinar infra merah yang terabsorpsi oleh analit. Sinar infra merah yang digunakan adalah sinar infra merah non dispersive. Gas nol (zero gas) dan contoh uji masuk dalam sel pengukuran dalam jumlah yang tetap dan diatur oleh katup selenoid yang bekerja dalam rentang waktu tertentu. Pengukuran ini berdasarkan kemampuan gas CO menyerap sinar infra merah. Banyaknya intensitas sinar yang diserap sebanding dengan konsentrasi CO. Peralatan pengukuran CO secara *Non-Dispersive Infra Red* (NDIR). Spektrum absorpsi maksimum sinar infra merah *non dispersive* terjadi pada puncak serapan  $2165\text{ cm}^{-1}$  ( $4,67\ \mu\text{m}$ ).



Perhitungan

Konsentrasi gas CO dibaca langsung dari pencatat (recorder) dengan satuan ppm. Konversi ke satuan  $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$  menggunakan rumus sebagai berikut:

$$C_2 = C_1 \times \frac{28}{24.45} \times 1000 \quad (1)$$

Ket :

$C_2$  = adalah konsentrasi CO dalam udara ambien ( $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ )

$C_1$  = adalah konsentrasi CO dalam udara ambien (ppm)

28 = adalah berat molekul CO

24.45 = adalah volume gas pada kondisi normal 25°C, 760 mmHg (L)

Kualitas udara ambien yang baik merupakan prasyarat untuk hidup sehat. Laju industrialisasi yang cepat telah menyebabkan emisi yang lebih tinggi dari banyak gas dan partikulat atau Particulate Matter (PM). Polutan ini merupakan pencemar primer dan di ubah menjadi pencemar sekunder melalui reaksi kimia. *Ambient air pollution* (AAP) adalah masalah global yang berkaitan dengan kesehatan manusia. Semua non-CO dan emisi adalah polutan yang menyebabkan perubahan iklim dan dampak kesehatan yang parah, ini dinyatakan oleh IPCC dan banyak organisasi lainnya (Asghar, K., et al., 2022).

## 2.9 AERMOD

AERMOD merupakan model penyebaran polutan dengan pendekatan Gaussian yang dikembangkan oleh AERMIC (*American Meteorological Society {AMS}/ United States Environmental Protection Agency {EPA} Regulatory Model Improvement Committee*). AERMOD merupakan sistem pemodelan dispersi atmosferik yang terdiri dari tiga modul yang terintegrasi yaitu model dispersi untuk kondisi tunak, pra pengolah data meteorologi dan pra pengolah data permukaan bumi. AERMOD menggunakan pendekatan Gaussian dan bi-Gaussian dalam model dispersinya, yang menghasilkan konsentrasi polutan di udara ambien dalam periode harian, bulanan maupun tahunan. AERMOD dapat digunakan untuk area perkotaan dan pedesaan, permukaan bumi yang rata atau berelevasi, emisi yang dihasilkan dari permukaan atau dari ketinggian, dan emisi yang dikeluarkan oleh banyak sumber (termasuk sumber titik, area atau volume) (Junarto dkk, 2021).

AERMOD merupakan model gaussian jangkauan pendek (kurang dari 50 km) untuk mensimulasikan penyebaran emisi cerobong dari aktivitas industri.

Model ini telah dikalibrasi dan diadopsi oleh US.EPA sejak tahun 2005 untuk menggantikan model (Industrial Source Complex) ISC3. AERMOD menggunakan teori similaritas Planetary Boundary Layer (PBL) untuk memperhitungkan dispersi yang dipengaruhi oleh pemanasan permukaan dan gesekan. Model ini membutuhkan informasi permukaan berupa panjang kekasaran, kelembaban, dan reflektifitas. Selain itu, informasi atmosfer atas yang lengkap diperlukan untuk menentukan kedalaman lapisan pencampuran (mixing height), dan membangun penetrasi plume parsial sepanjang bagian atas lapisan pencampuran (Assegaf dan Jayadipraja, 2015).

Model AERMOD mempertimbangkan aspek refleksi dan dispersi vertikal dipandang sebagai proses bi-gaussian. Parameter meteorologi yang memberikan turbulensi yang digunakan juga lebih lengkap seperti: kecepatan kekerasan (*friction velocity*), skala kecepatan konvektif (*convective velocity scale*), tinggi lapisan batas (*mechanical and convective boundary layer height*) dan *monin-obukhov length*. Pada model AERMOD tersebut karakteristik atmosfer diperkirakan dengan baik, sehingga penentuan nilai koefisien yang terlibat dalam perhitungan dapat dilakukan dengan lebih baik (Assegaf, 2018).

AERMET menggunakan data meteorologi dan karakteristik permukaan untuk menghitung parameter lapisan batas (mis. Tinggi pencampuran, kecepatan gesekan, dll) yang dibutuhkan oleh AERMOD. Data ini, apakah diukur di luar lokasi atau di lokasi, harus mewakili meteorologi dalam domain pemodelan. AERMAP menggunakan data terrain kisi-kisi untuk area pemodelan untuk menghitung ketinggian pengaruh medan yang representatif yang terkait dengan setiap lokasi reseptor. Data kisi-kisi diberikan ke AERMAP dalam format data *Digital Elevation Model (DEM)* (USGS 1994). *Preprocessor terrain* juga dapat digunakan untuk menghitung ketinggian untuk reseptor terpisah dan kisi reseptor (Cimorelli, 2004). Parameter penskalaan ini digunakan untuk menganalisa kecepatan angin dan turbulensi, gradien suhu potensial dan suhu potensial. Analisa ini belum mencakup situasi medan perkotaan, tetapi evaluasi secara keseluruhan telah menunjukkan bahwa parameterisasi ini mengarah pada perkiraan konsentrasi yang sebanding dengan pengamatan di lapangan (Cimorelli, et al., 2005).

Nauli (2002) menjelaskan bahwa model dispersi Gaussian dapat menyatakan secara sederhana penyimpangan partikel di udara terhadap jarak dan waktu. Banyaknya polutan yang dikeluarkan secara tetap dari cerobong asap ( $Q$ ) akan terbawa angin dengan kecepatan ( $u$ ) dalam arah horizontal ( $x$ ) dengan

kecepatan massa  $Q/u$ . Untuk polutan yang tidak bereaksi, massa polutan yang terkandung dalam setiap jarak akan sama harganya. Akan tetapi kadarnya akan berkurang sesuai dengan bertambahnya jarak dan waktu, karena turbulensi atmosfer cenderung menyebarkan material ke arah horisontal dan vertikal. Kadar rata-rata polutan pada suatu titik akan berbanding terbalik terhadap lebar sebaran dan kecepatan angin. Model Gauss diekspresikan dalam Persamaan 2.

$$C = \frac{Q}{2\pi\mu_s\sigma_y\sigma_z} \exp\left(-\frac{1y^2}{2\sigma_y^2}\right) x \left\{ \exp\left(-\frac{1(z-He)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{1(z+He)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right\} \quad (2)$$

Keterangan:

- C = Konsentrasi polutan udara dalam massa per volume ( $\text{mg}/\text{m}^3$ )
- Q = Laju emisi polutan dalam massa per waktu ( $\text{mg}/\text{s}$ )
- $\mu_s$  = Kecepatan angin di titik sumber ( $\text{m}/\text{s}$ )
- $\sigma_y$  = Koefisien dispersi secara horisontal (m)
- $\sigma_x$  = Koefisien dispersi secara vertikal (m)
- $\pi$  = Konstanta matematika (3,14)
- He = Tinggi efektif stack (cerobong) di pusat kepulan (m)
- Y = Jarak pengamatan sejajar dengan sumbu-y dari sumber emisi (m)

AERMOD View dapat dijalankan sehingga membutuhkan data laju emisi. Laju emisi diekspresikan sebagai satuan massa polutan yang dilepaskan per satuan waktu dimana satuan laju emisi yang digunakan adalah dalam  $\text{g}/\text{s}$ . Namun dalam pengaplikasiannya, nilai debit terhitung secara otomatis berdasarkan luas cerobong. Untuk mendapatkan satuan tersebut dapat dihitung dengan Persamaan 3.

$$E = \frac{L \times v \times C}{1000} \quad (3)$$

Keterangan:

- E : Laju Emisi ( $\text{g}/\text{s}$ )
- L : Luas cerobong ( $\text{m}^2$ )
- v : Kecepatan gas buang ( $\text{m}/\text{s}$ )
- C : Konsentrasi emisi polutan ( $\text{mg}/\text{m}^3$ )

## 2.10 Dampak Polusi Udara Terhadap Kesehatan Masyarakat

Polusi udara adalah kehadiran suatu atau lebih substansi fisik, kimia, atau biologi di atmosfer dalam jumlah yang dapat membahayakan kesehatan manusia, hewan dan tumbuhan, mengganggu estetika dan kenyamanan, atau merusak properti. Menurut Soemirat (2014), manusia setiap detik selama hidupnya akan membutuhkan udara. Secara rata-rata manusia tidak dapat mempertahankan hidupnya tanpa udara lebih dari tiga menit. Karena udara dalam bentuk gas, maka terdapat dimana-mana, sebagai akibatnya manusia tidak pernah memikirkannya ataupun memperhatikannya. Pada dewasa ini pencemaran udara menyebabkan terjadinya kematian dan penyakit dalam proporsi epidemik di beberapa tempat di dunia. Secara umum bahan pencemar senyawa kimia ozon, sulfur dioksida, nitrogen oksida, karbon monoksida, dan partikulat di udara menyebabkan gangguan kesehatan manusia (Surhato, 2011).

Berdasarkan hasil penelitian Hazsya at al. (2018) terdapat hubungan antara lama paparan karbon monoksida dengan konsentrasi COHb dalam darah manusia. Konsentrasi dari Karbon Monoksida (CO) disepanjang jalan Setiabudi yang diambil pada 3 titik lokasi jalan berada pada rentang 11.000 hingga 13.000  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Hal tersebut menyebabkan banyak masyarakat berisiko yang berada disepanjang jalan Setiabudi Kota Semarang mulai dari pedagang kaki lima, petugas parkir, pekerja tambal ban, satpam, dan lain sebagainya.

Menurut Mukono (2010), baik gas maupun partikel yang berada di atmosfer dapat menyebabkan kelainan pada tubuh manusia. Secara umum efek pencemaran udara terhadap individu atau masyarakat dapat berupa:

1. Sakit, baik yang akut maupun kronis.
2. Penyakit yang tersembunyi, yang dapat memperpendek umur, menghambat pertumbuhan dan perkembangan.
3. Mengganggu fungsi fisiologi dari:
  - a. Paru
  - b. Saraf
  - c. Transpor oksigen oleh hemoglobin
  - d. Kemampuan sensorik
4. Kemampuan penampilan, misalnya pada:
  - a. Aktivitas atlet
  - b. Aktivitas motorik

- c. Aktivitas belajar
- d. Iritasi sensorik
- e. Penimbunan bahan berbahaya dalam tubuh
- f. Rasa tidak nyaman karena faktor bau.

Secara umum efek pencemaran udara terhadap saluran pernafasan dapat menyebabkan terjadinya:

1. Iritasi pada saluran pernafasan. Hal ini dapat menyebabkan pergerakan silia menjadi lambat, bahkan dapat terhenti, sehingga tidak dapat membersihkan saluran pernafasan.
2. Peningkatan produksi lendir akibat iritasi oleh bahan pencemar.
3. Produksi lendir dapat menyebabkan penyempitan saluran pernafasan.
4. Rusaknya sel pembunuh bakteri di saluran pernafasan.
5. Pembengkakan saluran pernafasan dan merangsang pertumbuhan sel, sehingga saluran pernafasan menjadi menyempit.
6. Lepasnya silia dan lapisan sel selaput lendir.
7. Akibat dari hal tersebut di atas, akan menyebabkan terjadinya kesulitan bernapas sehingga benda asing termasuk bakteri/mikroorganisme lain tidak dapat dikeluarkan dari saluran pernafasan dan hal ini akan memudahkan terjadinya infeksi saluran pernafasan.

Menurut Mukono (2010), manusia yang terpapar dengan bahan polutan yang tinggi, dapat menurunkan umur harapan hidup (*life expectancy*). Didapatkan adanya hubungan antara peningkatan bahan polutan  $SO_2$  dan TSP (*Total Suspended Solid*) dengan meningkatnya kematian penderita kelainan kardiovaskuler. Selain itu tampak pula adanya hubungan langsung antara tingginya bahan pencemar  $SO_2$  dan partikel debu dengan penderita bronkitis dan emfisema.

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. Pada aplikasinya, ARKL dapat digunakan untuk memprediksi besarnya risiko dengan titik tolak dari kegiatan pembangunan yang sudah berjalan, risiko saat ini dan memprakirakan besarnya risiko di masa yang akan datang. Analisis risiko menggunakan berbagai macam ilmu seperti *science, engineering, probability, dan statistic* untuk mengestimasi dan mengevaluasi seberapa besar dan seberapa mungkin risiko tersebut berdampak pada kesehatan dan lingkungan. Pada dasarnya ARKL terdiri dari empat langkah

dasar, yaitu identifikasi bahaya, analisis dosis respon, analisis pemajanan, dan karakteristik risiko.

## 2.11 Kerangka Pikir

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) yang terdapat di Desa Bulucindea, Kecamatan Bungoro, Kabupaten Pangkep merupakan pembangkit listrik yang berkapasitas 2 x 25 MW dan 2 x 35 MW yang dibangun untuk memperkuat sistem kelistrikan daerah Sulawesi Selatan. PLTU Tonasa mampu pendukung operasi lainnya yang berkontribusi besar terhadap pencapaian laba perusahaan. Dengan hadirnya PLTU, pasokan kebutuhan listrik PT. Tonasa bisa lebih terjaga sehingga tidak hanya memenuhi kebutuhan listrik masyarakat, tapi juga mampu menyuplai kebutuhan listrik untuk industri kecil. PLTU dapat memberikan dampak positif bagi masyarakat namun PLTU juga dapat memberi dampak negatif karena penggunaan bahan bakarnya diestimasi menghabiskan 2.000an ton batu bara yang didatangkan dari Kalimantan. Pembangkit listrik berbahan bakar batu bara mempunyai potensi dalam menimbulkan pencemaran udara. Pencemaran udara akibat pembangkit listrik ini dapat berupa gas buang CO (Karbon monoksida). Pencemaran udara oleh zat-zat ini memberikan dampak buruk berupa menurunnya kualitas udara yang berdampak negatif pada kesehatan manusia.

Berdasarkan dari masalah tersebut, maka dilakukan studi literatur untuk memperoleh berbagai kebutuhan data yang dapat menunjang Penelitian. Kebutuhan berupa data bersumber dari literatur dan informasi pihak PT. Semen Tonasa. Kebutuhan data dalam Penelitian ini terbagi menjadi dua yakni data primer dan sekunder. Data primer meliputi data-data hasil pengukuran CO pada kedua cerobong Tonasa, sedangkan data sekunder meliputi data-data penunjang seperti data meteorologi dan topografi lokasi studi.

Sebaran gas buang CO dimodelkan menggunakan AERMOD dengan dukungan data-data meteorologi yang dapat diperoleh dari instansi yang bertanggung jawab seperti Badan Meteorologi Dan Geofisika (BMKG) dan *Nation Oceanic And Atmospheric* (NOAA). Model yang kelak dihasilkan menjadi acuan untuk mendapatkan gambaran secara cepat tentang arah dan luas penyebaran polutan.

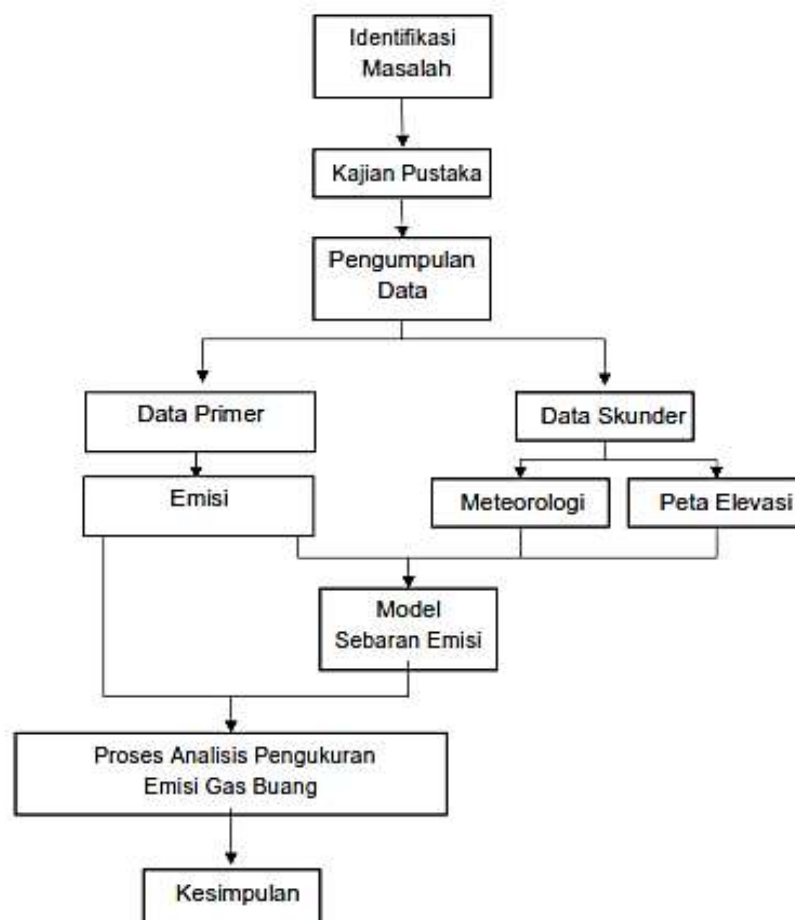
Penelitian ini dengan judul “ Penerapan Model AERMOD untuk Mensimulasikan Pola Dispersi Emisi Karbon Monoksida (CO) Sebagai Gas Buangan Industri” diharapkan dapat memberikan informasi mengenai tingkat



konsentrasi polutan dan dijadikan sebagai arahan kepada pemerintah, PT. Semen Tonasa serta masyarakat untuk mengantisipasi dampak penyakit yang dapat ditimbulkan dari emisi gas buang industri serta informasi ini dapat dijadikan panduan dalam penetapan titik sampling kualitas udara dan batas area studi untuk parameter lingkungan kualitas udara.

## 2.12 Hipotesis

AERMOD merupakan model sebaran emisi sehingga mampu memberikan asumsi penyebaran emisi dalam arah horizontal dan vertikal dengan menggunakan distribusi konsentrasi Gaussian, sehingga dapat menunjukkan pola sebaran emisi arah yang dominan.



**Gambar 4.** Metodologi Penelitian.