

# Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan Paparan PM<sub>2.5</sub> dan Gas Sulfur Dioksida (SO<sub>2</sub>) pada Pekerja di Unit Produksi PT Semen Tonasa

## *Environmental Health Risk Assessment of Particulate Matter (PM<sub>2.5</sub>) and Sulfur Dioxide (SO<sub>2</sub>) Exposure at Workers in Production Unit of PT Semen Tonasa*



**ACHMAD  
K062222007**



**PROGRAM STUDI MAGISTER KESEHATAN LINGKUNGAN  
FAKULTAS KESEHATAN MASYARAKAT  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
MAKASSAR  
2024**

**Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan Paparan PM<sub>2,5</sub> dan Gas Sulfur Dioksida (SO<sub>2</sub>) pada Pekerja di Unit Produksi PT Semen Tonasa**

**ACHMAD  
K062222007**



**PROGRAM STUDI S2 KESEHATAN LINGKUNGAN  
FAKULTAS KESEHATAN MASYARAKAT  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
MAKASSAR  
2024**

**Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan Paparan PM<sub>2,5</sub> dan Gas Sulfur Dioksida (SO<sub>2</sub>) pada Pekerja di Unit Produksi PT Semen Tonasa**

Tesis

sebagai salah satu syarat untuk mencapai gelar magister

Program Studi Kesehatan Lingkungan

Disusun dan diajukan oleh

**ACHMAD  
K062222007**

kepada

**PROGRAM STUDI S2 KESEHATAN LINGKUNGAN  
FAKULTAS KESEHATAN MASYARAKAT  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
MAKASSAR  
2024**

**TESIS**

**Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan Paparan PM<sub>2,5</sub> dan Gas Sulfur Dioksida (SO<sub>2</sub>) pada Pekerja di Unit Produksi PT Semen Tonasa**

**ACHMAD  
K062222007**

telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian Magister pada tanggal 13 Maret 2024 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

pada

Program Studi S2 Kesehatan Lingkungan  
Fakultas Kesehatan Masyarakat  
Universitas Hasanuddin  
Makassar

Mengesahkan:

Pembimbing Utama

Pembimbing Pendamping,



Prof. Dr. Anwar Daud, SKM., M.Kes  
NIP 19661012 199303 1 002



Dr. Hasnawati Amqam, SKM., M.Sc  
NIP 19760418 200501 2 001

Ketua Program Studi S2  
Kesehatan Lingkungan,



Prof. Dr. Anwar Daud, SKM., M.Kes  
NIP 19661012 199303 1 002

Dekan Fakultas Kesehatan Masyarakat  
Universitas Hasanuddin,



Prof. Sukri Paluturi, SKM., M.Kes., M.Sc.PH., Ph.D  
NIP 19720529 200112 1 001

**PERNYATAAN KEASLIAN TESIS  
DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA**

Dengan ini saya menyatakan bahwa, tesis berjudul "Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan Paparan PM<sub>2,5</sub> dan Gas Sulfur Dioksida (SO<sub>2</sub>) pada Pekerja di Unit Produksi PT Semen Tonasa" adalah benar karya saya dengan arahan dari tim pembimbing Prof. Dr. Anwar Daud, SKM.,M.Kes sebagai Pembimbing Utama dan Dr. Hasnawati Amqam, SKM.,M.Sc sebagai Pembimbing Pendamping. Karya ilmiah ini belum diajukan dan tidak sedang diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. 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 Internasional Journal of Chemical and Biochemical Sciences sebagai artikel dengan judul "Environmental Health Risk Assessment of Particulate Matter (PM<sub>2,5</sub>) and Sulfur Dioxide (SO<sub>2</sub>) Exposure at Workers in Production Unit of A Cement Plant In Indonesia". Apabila di kemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan tesis ini adalah karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut berdasarkan aturan yang berlaku.

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

Makassar, 13 Maret 2024



**ACHMAD**  
NIM K062222007

## UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur senantiasa penulis panjatkan kehadiran Allah SWT atas segala nikmat yang diberikan berupa nikmat kesehatan, kesempatan sehingga penulisan Tesis dengan judul "**ANALISIS RISIKO KESEHATAN LINGKUNGAN PAJANAN PM<sub>2,5</sub> DAN GAS SULFUR DIOKSIDA (SO<sub>2</sub>) PADA PEKERJA DI UNIT PRODUKSI PT SEMEN TONASA**" ini dapat diselesaikan. Salam serta shalawat kita kirimkan kepada junjungan kita Nabi Besar Muhammad SAW semoga kita semua termasuk ummatnya yang mendapatkan syafaatnya di akhirat kelak.

Tesis ini disusun untuk memenuhi persyaratan tugas akhir dalam penyelesaian studi pada Program Studi Magister Kesehatan Lingkungan, Fakultas Kesehatan Masyarakat Universitas Hasanuddin.

Dalam penyusunan tesis ini, penulis menyadari masih banyak kekurangan dan kelemahan sebagai keterbatasan dari peneliti. Namun atas bantuan, dorongan dan bimbingan dari berbagai pihak sehingga penyusunan ini dapat diselesaikan. Maka dari itu melalui kesempatan ini penulis senantiasa mengharapakan kritik dan saran dari para pembaca.

Pada kesempatan ini pula penulis mengucapkan terima kasih yang setinggi – tingginya kepada:

1. Bapak **Prof. Dr. Ir. Jamaluddin Jompa.,M.Sc** sebagai Rektor Universitas Hasanuddin Makassar
2. Bapak **Prof. Sukri Palutturi, SKM.,M.Kes.,M.Sc.Ph.,Ph.D** sebagai Dekan Fakultas Kesehatan Masyarakat Universitas Hasanuddin Makassar.
3. Bapak **Prof. Dr. Anwar Daud, SKM.,M.Kes** sebagai Ketua Program Studi Magister Kesehatan Lingkungan Universitas Hasanuddin Makassar.
4. Bapak **Prof. Dr. Anwar Daud, SKM.,M.Kes** dan Ibu **Dr. Hasnawati Amqam, SKM.,M.Sc** yang telah membimbing penulis dalam penyusunan Tesis.
5. Bapak **Prof. Anwar, SKM.,M.Sc.,Ph.D.**, Bapak **Prof. Dr. Atjo Wahyu, SKM.,M.Kes** dan Bapak **Dr. Irwandy, SKM.,M.Sc.PH.,M.Kes** sebagai penguji yang telah banyak memberikan saran serta tanggapan dalam penyusunan Tesis.
6. PT Semen Tonasa dalam hal ini Bapak **Suryadi Pasambangi** dan bapak **M. Yasin** yang telah membantu proses perizinan penelitian di Pabrik Semen PT Semen Tonasa Unit V.
7. PT Sucofindo dalam hal ini bapak **Abdul Muis Karim** yang telah memberi izin untuk melanjutkan pendidikan ke jenjang Magister.

8. Orang Tua saya Bapak **Parela Dg. Nai** (Alm) dan Ibu **Pati** Tercinta yang telah memberikan dukungan, motivasi dan yang terpenting memberikan do'a untuk kemudahan penulis.
9. Kepada Istriku **Multazam Abubakar S.S.,M.Hum** dan anak- anakku **Jihan Lutfiah Afizah Achmad, Jasmine Zafirah Azizah Achmad, Muhammad Zidan Muqsith, dan Muhammad Zayn Kamil**, atas segala do'a dan pengorbanan, pengertian, motivasi, materi yang telah diberikan kepada penulis.
10. Teman – teman angkatan pertama dan angkatan kedua Prodi S2 Kesehatan Lingkunga atas segala bantuan mulai semester I sampai terakhir

## ABSTRAK

Achmad. **ANALISIS RISIKO KESEHATAN LINGKUNGAN PAJANAN PM<sub>2.5</sub> DAN GAS SULFUR DIOKSIDA (SO<sub>2</sub>) PADA PEKERJA DI UNIT PRODUKSI PT SEMEN TONASA** (dibimbing Oleh Anwar Daud dan Hasnawati Amqam)

**Latar Belakang.** Partikulat (PM<sub>2.5</sub>) dan Sulfur Dioksida (SO<sub>2</sub>) merupakan bahan pencemar yang banyak terdapat pada pabrik semen, khususnya pada unit produksi. **Tujuan.** Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui risiko kesehatan lingkungan akibat pajanan PM<sub>2.5</sub> dan gas SO<sub>2</sub> pada pekerja di PT Semen Tonasa Unit V dan kandungan material pada PM<sub>2.5</sub>. **Metode.** Metode penelitian ini adalah deskriptif kuantitatif dengan pendekatan Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan. Terdapat dua jenis sampel dalam penelitian ini, yaitu pekerja dan lingkungan. Sebanyak 95 pekerja dipilih dengan teknik accidental untuk mengetahui pola aktivitasnya seperti waktu pajanan, frekuensi pajanan, durasi pajanan, dan berat badan pekerja dan sampel lingkungan, yaitu kualitas udara ambien untuk mengukur konsentrasi PM<sub>2.5</sub> dan gas SO<sub>2</sub> pada area Raw mill, Coal Mill, Kiln, Finish Mill, dan Packer. **Hasil.** Hasil penelitian menunjukkan bahwa konsentrasi SO<sub>2</sub> berkisar antara 0,0424 – 0,0660 mg/m<sup>3</sup> dengan konsentrasi SO<sub>2</sub> tertinggi diperoleh di daerah Kiln; sedangkan konsentrasi PM<sub>2.5</sub> berkisar antara 0,0679 – 0,1762 mg/m<sup>3</sup> dengan konsentrasi PM<sub>2.5</sub> tertinggi diperoleh di daerah Packer. Selain itu, diperoleh nilai RQ SO<sub>2</sub> < 1 untuk seluruh area penelitian yang berarti tidak ada risiko kesehatan bagi pekerja yang terpajan konsentrasi SO<sub>2</sub> sebesar 0,0424 – 0,0660 mg/m<sup>3</sup>, dengan waktu pajanan 3,22 jam, frekuensi pajanan selama 265 hari, durasi pajanan 9,38 tahun, dengan berat badan rata-rata 66,22 Kg. Sedangkan untuk nilai RQ PM<sub>2.5</sub>, terdapat 47 pekerja memiliki nilai RQ > 1 akibat pajanan PM 2.5 sebesar 0,0679 – 0,1762 mg/m<sup>3</sup>, dengan waktu pajanan rata-rata 3,22 jam, frekuensi pajanan rata-rata 265 hari, durasi pajanan rata-rata 9,38 tahun, dengan berat badan pekerja rata-rata 66,22 Kg. Kandungan yang ditemukan pada PM<sub>2.5</sub> antara lain SiO<sub>2</sub> (12,82% - 28,08%), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0,61% – 3,03%), TiO<sub>2</sub> (0,22% - 0,77%), Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (2,04% - 4,51%), MnO (0,07% - 0,08%), dan Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (32,71%) pada area Coal Mill. **Kesimpulan:** Sebanyak 49,47% pekerja pada unit produksi PT Semen Tonasa beresiko mengalami gangguan kesehatan pernapasan, penyakit kardiovaskular akibat pajanan PM<sub>2.5</sub>

Kata Kunci: Pabrik semen; Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan; PM<sub>2.5</sub>, Sulfur Dioksida; pekerja



## ABSTRACT

Achmad. ENVIRONMENTAL HEALTH RISK ASSESSMENT OF PARTICULATE MATTER (PM<sub>2.5</sub>) AND SULFUR DIOXIDE (SO<sub>2</sub>) EXPOSURE AT WORKERS IN PRODUCTION UNIT OF PT. SEMEN TONASA (supervised by Anwar Daud and Hasnawati Amqam)

**Background.** Particulate Matter (PM<sub>2.5</sub>) and Sulfur Dioxide (SO<sub>2</sub>) are pollutants that can be found in cement factories, specifically in production units. **Aims.** This research aims at investigating environmental health risk due to exposure of PM<sub>2.5</sub> and SO<sub>2</sub> gas at workers in the PT Semen Tonasa Production Unit and the material contained in PM<sub>2.5</sub>. **Method.** The method of this study was descriptive quantitative using the Environmental Health Risk Analysis (EHRA) approach. There are two kinds of sample in this research, workers and environment. 95 workers in the cement factory were selected using accidental sampling technique to investigate their activity patterns, such as exposure time, exposure frequency, exposure duration, and body weight; while, environmental samples were the ambient air quality with parameters of PM<sub>2.5</sub> and SO<sub>2</sub> in Raw mill, Coal Mill, Kiln, Finish Mill, and Packer. The duration of measuring ambient air quality for each sampling point was 24 hours. **Results.** The findings of this research revealed that SO<sub>2</sub> concentrations ranged from 0.0424 – 0.0660 mg/m<sup>3</sup> and the highest SO<sub>2</sub> concentration was obtained in the Kiln area. Concurrently, PM<sub>2.5</sub> values vary between 0.0679 and 0.1762/m<sup>3</sup>. The Packer area has the highest level of PM<sub>2.5</sub> contamination. Moreover, the SO<sub>2</sub> RQ value <1 was obtained for the entire study, indicating that workers exposed to SO<sub>2</sub> in the range of 0,0424 – 0,0660 mg/m<sup>3</sup>, exposure time 3,22 hours, exposure frequency for 265 days, exposure duration 9,38 years, with an average body weight of 66,22 kg, are not at risk; however, 47 workers obtained the PM<sub>2.5</sub> RQ value >1, indicating that they may be at risk for health problems as a result of exposure to 0,0679 – 0,1762 mg/m<sup>3</sup>, exposure time 3,22 hours, exposure frequency for 265 days, and exposure duration 9,38 years with an average body weight of 66,22 kg. Moreover, material contained in PM<sub>2.5</sub> are SiO<sub>2</sub> (12,82% - 28,08%), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0,61% – 3,03%), TiO<sub>2</sub> (0,22% - 0,77%), Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (2,04% - 4,51%), MnO (0,07% - 0,08%), and Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (32,71%) in Coal Mill area. **Conclusion.** Due to PM<sub>2.5</sub> exposure, 49.47% of the workforce at the PT Semen Tonasa production facility is susceptible to cardiovascular illness and respiratory health issues.

Keywords: Cement plant; environmental health risk assessment; fine particulate matter, sulfur dioxide; workers



## DAFTAR ISI

	<b>Halaman</b>
HALAMAN JUDUL .....	i
PERNYATAAN PENGAJUAN.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN .....	iii
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS.....	iv
UCAPAN TERIMA KASIH .....	v
ABSTRAK .....	vii
ABSTRACT.....	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR TABEL.....	x
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR LAMPIRAN .....	xii
BAB I. PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	8
1.3 Tujuan Penelitian.....	8
1.4 Manfaat Penelitian.....	8
BAB II METODE PENELITIAN.....	10
2.1 Jenis Penelitian.....	10
2.2 Waktu dan Lokasi Penelitian .....	10
2.3 Populasi dan sampel.....	11
2.4 Pengumpulan Data.....	13
2.5 Pengelolaan data dan Analisis data.....	14
2.6 Instrumen Penelitian.....	15
2.7 Penyajian Data .....	15
2.8 Etika Penelitian.....	15
2.9 Kerangka Konsep.....	15
2.10 Defenisi Operasional dan Kriteria Objektif .....	17
BAB III HASIL DAN PEMBAHASAN.....	20
3.1 Hasil Penelitian.....	20
3.2 Pembahasan .....	26
3.3 Keterbatasan Penelitian .....	31
BAB IV PENUTUP .....	32
4.1 Kesimpulan.....	32
4.2 Saran .....	32
DAFTAR PUSTAKA.....	33
LAMPIRAN .....	40

## DAFTAR TABEL

Nomor urut	Halaman
1. Distribusi jumlah populasi pekerja unit produksi .....	.11
2. Distribusi jumlah Sampel pada masing masing area .....	.12
3. Defenisi Operasional dan Kriteria Objektif .....	.17
4. Karakteristik Responded/pekerja pada unit produksi .....	.20
5. Konsentrasi gas Sulfur Dioksida (SO <sub>2</sub> ) dan Partikulat Matter 2,5 mikron (PM <sub>2.5</sub> ) pada area produksi unit V PT Semen Tonasa .....	.21
6. Pola karakteristik pekerja di area Produksi unit V PT Semen Tonasa .....	.23
7. Nilai ADD dan Risk Quotient SO <sub>2</sub> dan PM <sub>2.5</sub> pada pekerja di area produksi .....	.24
8. Distribusi nilai RQ SO <sub>2</sub> dan PM <sub>2.5</sub> pada pekerja di area produksi.....	.25
9. Kandungan Material Partikulat Matter 2.5 (PM <sub>2.5</sub> ) di area produksi .....	.26

## DAFTAR GAMBAR

Nomor urut	Halaman
1. Proses pembuatan Semen .....	1
2. Jalur pajanan Inhalasi .....	4
3. Lokasi Penelitian .....	10
4. Kerangka Konsep .....	15
5. Diagram Konsentrasi SO <sub>2</sub> dan PM <sub>2.5</sub> area Produksi .....	22

**DAFTAR LAMPIRAN**

Nomor urut	Halaman
1. Surat Izin Penelitian dari PT Semen Tonasa.....	. 40
2. Rekomendasi Etik Penelitian .....	. 42
3. Kuisisioner Penelitian dan Lembar Informed Consent.....	. 43
4. Hasil Laboratorium .....	. 46
5. Dokumentasi kegiatan Penelitian .....	. 61

# BAB I

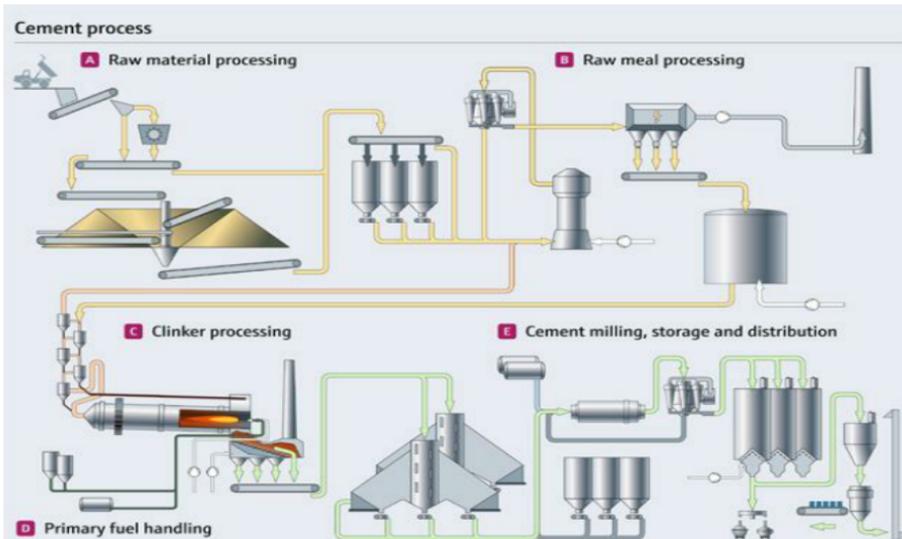
## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Semen biasanya terdiri dari tiga bahan dasar: clinker, gypsum, dan bahan lain seperti batu kapur, pozzolan, dan *fly ash* (Dyatmiko & Chalim, 2022). Semen adalah komponen penting dari material konstruksi. Dibuat dari batu kapur dan bahan tambahan lainnya, semen dibuat melalui proses yang panjang, termasuk penambangan bahan baku, persiapan bahan baku, reaksi di kiln pada suhu tinggi, penyesuaian ukuran, finalisasi produk, dan pengemasan produk (Lestianingrum et al., 2022).

Kapasitas produksi PT Semen Tonasa kurang lebih 6 juta ton per tahun terdiri dari pabrik unit V, yang memproduksi 2,5 juta ton per tahun, serta pabrik unit II, III, dan IV, yang memproduksi 3,480 juta ton per tahun (Rizal et al., 2018). Pembuatan semen dilakukan melalui metode proses kering, atau proses kering. Proses ini dimulai dengan menyediakan bahan mentah, seperti bahan baku utama (batu kapur, tanah liat), gypsum, dan bahan baku tambahan (pasir silika, pasir besi). Setelah bahan mentah tersedia, bahan mentah digiling, dibakar, didinginkan, dan kemudian digiling kembali untuk memulai tahap pengantongan semen (Riskiah & Safaruddin, 2022).

Uraian singkat proses produksi semen dapat dilihat pada diagram alir proses pembuatan semen dibawah ini:



**Gambar 1.** Proses Pembuatan Semen

Bahan yang telah ditambang dibelah menjadi ukuran yang lebih kecil, lalu diangkut dan disimpan. Homogenisasi pasir silika dan biji besi dilakukan sebelum pemanasan awal pada suhu sekitar 500 °C. Kemudian campuran dipanaskan lagi pada suhu sekitar 1300 °C hingga 1500 °C untuk membentuk klinker. Klinker yang terbentuk didinginkan dan disimpan di silo penyimpanan sementara sebelum dicampur dengan zat aditif seperti *gypsum*, abu vulkanik, dan *pozzolan*. Setelah campuran digiling dengan *ball mill* sampai menjadi semen, campuran disimpan di silo penyimpanan. Sebelum dipasarkan, semen dikemas dalam unit pengantungan (Utama, 2021).

Kawasan industri menghasilkan polutan udara seperti debu, nitrogen dioksida (NO<sub>2</sub>), sulfur dioksida (SO<sub>2</sub>), karbon monoksida (CO), dan hidrokarbon (HC) (Safira et al., 2022). Total Partikel tersuspensi (TSP) mencapai ukuran 100 mikron, PM10, dan PM2,5, atau partikel di bawah 2,5 mikron (Duppa et al., 2020). Sulfur dioksida, radioaktif debu, hidrogen klorida, hidrogen fluorida, organik senyawa, dioksin, furan, nitrogen oksida, hidrokarbon, logam berat, dan karbon monoksida adalah beberapa polutan yang dihasilkan dari proses pembuatan semen dan berkontribusi pada masalah kesehatan dan dampak lingkungan (Astuti et al., 2022).

Dianggap sebagai kerugian terbesar, pabrik semen menyebabkan polusi udara. Selama proses produksi, debu, hidrogen klorida, nitrogen oksida, sulfur dioksida, gas rumah kaca, dan amonia dilepaskan ke lingkungan. Statistik menunjukkan bahwa pabrik semen mengeluarkan 500.000 ton polutan SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, dan CO ke atmosfer setiap tahun. Sebagai contoh, transportasi, peralatan penggilingan, dan pengemasan dan penyimpanan menyebabkan debu. Baik kehadiran belerang dalam bahan

baku maupun pembakaran senyawa belerang menyebabkan pelepasan gas sulfur dioksida ( $\text{SO}_2$ ) ke atmosfer.  $\text{PM}_{2.5}$  dapat berasal dari penambangan bahan baku, transportasi, pendinginan klinker, penggilingan semen (*finish mill*), dan proses pengemasan. (Zhu et al., 2022).

Industri semen menghasilkan polutan partikulat pada area *Raw mill*, *Coal mill*, *Kiln*, dan *area Finish mill* (Gusti & Yurnal, 2019). Selain area tersebut, Partikulat Matter ukuran  $< 2,5$  mikron dapat ditemukan pada area unit *Packer* (Kurniati et al., 2018). Sementara itu, Gas Sulfur Dioksida ( $\text{SO}_2$ ) diemisikan di preheater karena oksidasi belerang dan belerang organik di *Raw Mill*, sedangkan sisa  $\text{SO}_2$  dilepaskan di *precalciner* dan kiln karena oksidasi belerang dan belerang organik dalam bahan bakar serta dekomposisi sulfat dari bahan baku dan bahan bakar (Zhang et al., 2019).

*Particulate Matter 2.5* adalah partikel udara dengan diameter  $\leq 2,5 \mu\text{m}$ , ditandai dengan partikel yang kecil (Du et al., 2018). Partikulat Matter ukuran  $\text{PM}_{2.5}$  adalah debu partikulat dengan diameter aerodinamik  $2,5 \mu\text{m}$  yang dikumpulkan dengan 50% efisiensi melalui pengumpulan sampel  $\text{PM}_{2.5}$ . Komposisi yang membentuk  $\text{PM}_{2.5}$  dapat berdampak negatif pada kesehatan manusia (Gunaprawira et al., 2021). Sementara sulfur dioksida ( $\text{SO}_2$ ) adalah gas pencemar udara yang terdiri dari belerang dan oksigen, terbentuk ketika bahan bakar yang mengandung belerang, seperti batu bara, minyak, atau solar dibakar, sumber pajanan  $\text{PM}_{2.5}$  dan  $\text{SO}_2$  di pabrik semen dapat ditemukan di unit produksi seperti *reclaimer*, *raw mill*, *pembakaran (pre-heater, rotary kiln, dan cooler)*, *finish mill*, dan *packer* (Kurniati et al., 2018).

Partikulat Matter (PM) biasanya terbentuk di atmosfer sebagai hasil dari reaksi kimia antara polutan-polutan yang berbeda. Studi telah menunjukkan hubungan antara partikel (*Particulate Matter*) dan efek kesehatan yang merugikan, dengan fokus pada jangka pendek (akut) atau pajanan *Particulate Matter* jangka panjang (kronis) (Manisolidis et al., 2020). Partikel  $< 10 \mu\text{m}$  diameter ( $\text{PM}_{10}$ ) setelah terhirup dapat menyerang paru-paru dan bahkan mencapai aliran darah. Partikel halus,  $\text{PM}_{2.5}$ , menimbulkan risiko yang lebih besar terhadap kesehatan. Beberapa studi epidemiologi telah dilakukan pada efek kesehatan dari *Particulate Matter*. Hubungan positif ditunjukkan antara pajanan  $\text{PM}_{2.5}$  jangka pendek dan jangka panjang dan akut nasofaringitis. Selain itu, pajanan jangka panjang terhadap *Particulate Matter* selama bertahun-tahun ditemukan terkait dengan penyakit kardiovaskular dan kematian bayi (Zhang et al., 2019).  $\text{PM}_{2.5}$  berdampak buruk pada kardiovaskular, sistem pernapasan dan endokrin. Telah diindikasikan bahwa pajanan  $\text{PM}_{2.5}$  dikaitkan dengan proporsi penting dari kematian karena berbagai penyakit, termasuk kanker paru-paru (23,9%), COPD (18,7%), stroke (40,3%) dan penyakit jantung iskemik (IHD) (26,8%) (Song et al., 2017). Penurunan Konsentrasi  $\text{PM}_{2.5}$  pajanan jangka pendek telah terbukti mengurangi populasi risiko kanker paru-paru (Xie et al., 2017).

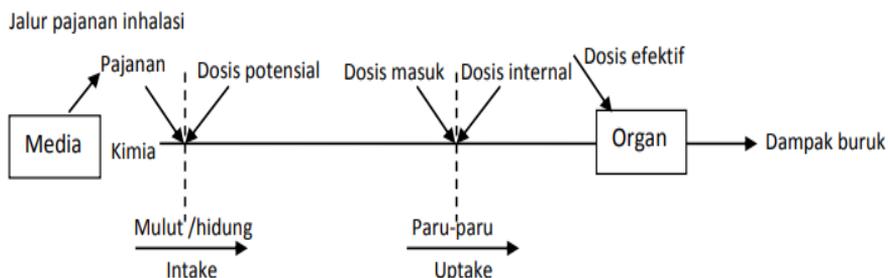
Sulfur dioksida ( $\text{SO}_2$ ) adalah gas berbahaya yang dipancarkan terutama dari fosil konsumsi bahan bakar atau kegiatan industri. Standar tahunan untuk  $\text{SO}_2$  adalah 0,03 ppm. Itu mempengaruhi manusia, hewan, dan tumbuhan kehidupan. Orang yang rentan seperti orang dengan penyakit paru-paru, orang tua, dan anak-anak, yang menghadirkan risiko kerusakan yang lebih tinggi. Mayor masalah kesehatan yang terkait dengan emisi sulfur dioksida di daerah industri adalah iritasi pernapasan, bronkitis, lendir produksi, dan bronkospasme, karena merupakan iritasi sensorik dan menembus jauh ke dalam paru-paru diubah menjadi bisulfit dan berinteraksi dengan reseptor sensorik, menyebabkan bronkokonstriksi. Selain itu, kemerahan pada kulit, kerusakan pada mata (lakrimasi dan kekeruhan kornea) dan selaput lendir, dan memburuknya penyakit kardiovaskular yang sudah ada sebelumnya telah diamati (Manisalidis et al., 2020).

Risiko adalah peluang atau kemungkinan bahwa seseorang akan dirugikan atau mengalami dampak kesehatan yang merugikan jika terpapar bahaya. Bahaya adalah sumber potensi kerusakan, kerugian, atau efek kesehatan yang merugikan pada sesuatu atau seseorang. Pada dasarnya, bahaya adalah potensi kerugian atau efek yang merugikan baik bagi kesehatan, maupun terhadap lingkungan (Government of Canada, 2023). Analisis risiko kesehatan lingkungan adalah proses untuk memperkirakan sifat dan kemungkinan efek kesehatan yang merugikan pada manusia yang mungkin terpapar bahan kimia di media lingkungan yang terkontaminasi, sekarang atau di masa depan (US EPA, 2014b).

Secara umum Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan terdiri dari empat tahap yaitu identifikasi bahaya, analisis dosis-respon, analisis paparan, dan karakterisasi risiko

(Direktorat Jenderal PP dan PL Kementerian Kesehatan, 2012).

Apabila terpapar dengan dosis yang tepat dan waktu yang cukup untuk mempengaruhi tingkat kesehatan, agen risiko lingkungan dapat berdampak buruk pada kesehatan. Paparan oleh agen risiko ke media lingkungan dapat terjadi melalui berbagai jalur. Ini termasuk jalur kulit (dermal), jalur makanan atau ingesti (oral), dan jalur pernapasan (inhalasi). Jalur paparan inhalasi dapat dilihat pada gambar 2.



**Gambar 2.** Jalur Paparan Inhalasi

Pajanan dan dosis (inhalasi) terjadi ketika zat berbahaya masuk ke dalam mulut atau hidung melalui filter bulu hidung dan kelenjar. Dosis potensial yang kemudian masuk ke mulut disebut exposure. Dosis aplikasi kemudian masuk ke paru-paru dan diserap oleh tubuh melalui proses toksikokinetik dan toksikodinamik. Dalam hal ini, dosis aplikasi masuk ke paru-paru (Mallongi, 2021).

Adapun rumus perhitungan Intake pada jalur pajanan inhalasi efek non karsinogenik adalah sebagai berikut:

$$\text{Keterangan: } ADD = \frac{C_{\text{air}} \times \text{InhR} \times \text{ET} \times \text{EF} \times \text{ED}}{\text{BW} \times \text{AT}} \quad \text{Persamaan (1)}$$

- ADD : *Average Daily Dose*, Dosis harian rata-rata (mg/kg/hari)  
 $C_{\text{air}}$  : *Concentration of contaminant in air*, Konsentrasi Polutan di udara ambien (mg/m<sup>3</sup>)  
 InhR : *Inhalation rate*, Laju Inhalasi (m<sup>3</sup>/jam)  
 ET : *Exposure time*, waktu pajanan (jam/hari)  
 EF : *Exposure frequency*, frekuensi pajanan hari dalam setahun (hari/tahun)  
 ED : *Exposure duration*, Durasi pajanan, jumlah tahun terjadinya pajanan (tahun)  
 BW : *Body weight*, Berat badan (Kg)  
 AT : *Averaging time*, Periode waktu rata-rata (hari)  
 Periode waktu untuk efek non karsinogenik, 30 tahun x 365 hari/tahun = 10.950 hari.

Dengan menggunakan pedoman kesehatan non karsinogenik yang tersedia, karakterisasi risiko kesehatan diukur dengan menggunakan Risk Quotient (RQ) untuk mengevaluasi kemungkinan bahaya kesehatan non karsinogenik yang dapat disebabkan oleh pajanan kontaminan (*MRL*, *RfD*, *RfC*). Nilai RQ diperoleh dengan membagi intake nonkarsinogenik dengan *RfD* atau *RfC* menurut persamaan 2.

$$RQ = \frac{ADD}{RfC} \quad \text{Persamaan (2)}$$

Nilai  $RQ \leq 1$  menandakan efek non karsinogenik tidak menjadi masalah dan tetap dipertahankan kondisinya, dan untuk nilai  $RQ \geq 1$  menandakan efek non karsinogenik yang serius dan diperlukan pengelolaan risiko dan dilakukan efek toksikologi yang mendalam (ATSDR, 2022).

Tindak lanjut harus dilakukan setelah Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan selesai dan diperoleh nilai Risk Quotient (RQ) setidaknya 1. Penetapan batas aman adalah salah satu strategi yang digunakan dalam pengelolaan risiko (Direktorat Jenderal PP dan PL Kementerian Kesehatan, 2012):

- a) Konsentrasi agen risiko (C)

Penurunan konsentrasi hingga ke batas aman

$$C_{aman} = \frac{RfC \times BW \times AT}{InhR \times ET \times EF \times ED} \quad \text{Persamaan (3)}$$

- b) Waktu Paparan (ET), Frekuensi Paparan (EF) dan Durasi Paparan (ED)

Melakukan pembatasan jam kerja, hari kerja atau lamanya bekerja (tahun).

$$ET_{aman} = \frac{RfC \times BW \times AT}{C_{air} \times InhR \times EF \times ED} \quad \text{Persamaan (4)}$$

$$EF_{aman} = \frac{RfC \times BW \times AT}{C_{air} \times InhR \times ET \times ED} \quad \text{Persamaan (5)}$$

$$ED_{aman} = \frac{RfC \times BW \times AT}{C_{air} \times InhR \times ET \times EF} \quad \text{Persamaan (6)}$$

Dianggap penting untuk melakukan analisis risiko kesehatan lingkungan Paparan Particulate Matter (PM<sub>2,5</sub>) karena paparan PM<sub>2,5</sub> jangka panjang dan jangka pendek dapat menyebabkan masalah pernapasan. Partikel lebih kecil dari 2,5 mikrometer dapat masuk dan menyimpan diri di dalam sistem paru-paru, terutama di alveolus. Hal ini dapat menyebabkan penurunan fungsi paru-paru, pneumonia, kronis bronkitis, dan PPOC (Kurniati et al., 2018).

Penelitian yang dilakukan oleh Putri et al (2019) menyimpulkan bahwa Konsentrasi PM<sub>2,5</sub> di area Batching Plant melebihi baku mutu dan pedoman kualitas udara WHO. Selain itu, nilai risiko kesehatan (RQ) adalah 0,412 dan tidak berbahaya dalam waktu nyata. Namun, nilai RQ adalah 1,096 untuk pekerja seumur hidup atau yang bekerja selama sekitar 25 tahun atau 9 tahun lagi. Akibatnya, pengurangan konsentrasi PM<sub>2,5</sub> memungkinkan manajemen risiko (Putri et al., 2019). Dalam penelitian Nasri et al (2023) juga menyimpulkan adanya konsentrasi PM<sub>2,5</sub> yang tinggi pada industri semen dan konsentrasi tersebut lebih tinggi dari Standar WHO dan standar United State *Environmental Protection Agency (US EPA)*. Dari kondisi ini disebutkan bahwa hampir seperempat pekerja menjadi tidak normal terhadap pembatasan paru-paru, obstruksi dan bahkan keduanya (Nasri et al., 2023).

Selain PM<sub>2,5</sub>, analisis risiko Paparan Sulfur dioksida (SO<sub>2</sub>) bagi pekerja juga penting dilakukan. Hal ini disebabkan oleh Paparan Sulfur dioksida (SO<sub>2</sub>) jangka pendek telah dikaitkan dengan morbiditas pernapasan pada orang dewasa dan anak-anak, terutama penderita asma dan lansia. Selain itu, ada lonjakan konsentrasi SO<sub>2</sub> yang terputus-putus, yang dapat membahayakan kesehatan (Nurhisnahan & Hasyim, 2022).

Menurut penelitian Nurhisanah dan Hasyim (2022), risiko non-karsinogenik adalah 0,0959 mg/kg/hari pada pajanan waktu-nyata, dan risiko seumur hidup adalah 0,2668 mg/kg/hari. Untuk memastikan bahwa pekerja tidak terpapar SO<sub>2</sub> atau gas emisi lainnya yang dihasilkan oleh kegiatan pabrik, upaya harus dilakukan untuk memastikan bahwa tingkat pajanan SO<sub>2</sub> di udara ambien di area pabrik tidak membahayakan kesehatan mereka (Nurhisanah & Hasyim, 2022).

Penelitian pajanan SO<sub>2</sub> yang dilakukan oleh Nurhisanah & Hasyim (2022) berfokus pada pekerja di area Power Plant; sedangkan penelitian pajanan SO<sub>2</sub> bagi pekerja di Pabrik Semen masih terbatas. Penelitian Pajanan SO<sub>2</sub> bagi di Industri Semen pada umumnya dilakukan di masyarakat yang berada di area pabrik semen.

Analisis risiko kesehatan lingkungan adalah proses untuk memperkirakan sifat dan kemungkinan efek kesehatan yang merugikan pada manusia yang mungkin terpajan bahan kimia di media lingkungan yang terkontaminasi, sekarang atau di masa depan (US EPA, 2014b). Analisis risiko kesehatan lingkungan bagi pekerja di industri semen penting dilakukan untuk mengetahui risiko kesehatan lingkungan pekerja saat ini dan masa yang akan datang sehingga dapat diambil kebijakan dan upaya mitigasi risiko guna menurunkan angka Penyakit Akibat Kerja (PAK) yang dapat mempengaruhi produktifitas pekerja dan kapasitas produksi pabrik. Selain analisis risiko pajanan PM<sub>2.5</sub> dan SO<sub>2</sub> pada pekerja di unit produksi, juga pentingnya dilakukan analisis kandungan material yang terdapat pada masing-masing area di unit produksi. Kandungan material yang dianalisis lebih berfokus pada kadar silika, logam besi, dan logam berat lainnya dikarenakan senyawa tersebut digunakan sebagai bahan baku dan bahan penolong dalam pembuatan semen.

Sumber polusi seperti partikulat bahan (PM), nitrogen oksida (NO<sub>x</sub>), dan sulfur dioksida (SO<sub>2</sub>) dapat ditemukan di unit produksi pabrik semen, seperti pabrik semen raw, pabrik semen yang dipanaskan, kiln, pabrik coal, pabrik semen, silo penyimpanan, dan bagian pembungkus. Iritasi tenggorokan, iritasi hidung, dan kematian akibat menghirup SO<sub>2</sub> dalam konsentrasi tinggi. Penyakit pernapasan dan kardiovaskular juga dapat menjadi akibat dari pajanan SO<sub>2</sub>. Pengendapan asam atau hujan asam disebabkan oleh emisi gas SO<sub>2</sub> (Rampuri, 2017). Hal ini yang menjadi pertimbangan lokasi unit produksi ini dijadikan titik pengambilan sampel PM<sub>2.5</sub> dan SO<sub>2</sub>.

PT Semen Tonasa merupakan salah satu produsen semen terbesar di kawasan Indonesia Timur yang mengoperasikan pabrik semen terintegrasi dengan kapasitas 7,4 juta ton/tahun di Kabupaten Pangkep, Sulawesi Selatan. PT Semen Tonasa memiliki pabrik pengantongan semen yang tersebar di kawasan Indonesia Timur diantaranya di Makassar (Sulawesi

Selatan), Bitung (Sulawesi Utara), Palu (Sulawesi Tengah), Mamuju (Sulawesi Barat), Kendari (Sulawesi Tenggara), Ambon (Maluku), Oba (Maluku Utara), Samarinda dan Balikpapan (Kalimantan Timur) serta Sorong (Papua Barat). Hal ini juga yang menjadi alasan pemilihan lokasi penelitian dimana hasil analisis risiko kesehatan lingkungan area *Packer* dapat menjadi *referensi* hasil analisis risiko untuk dilakukan pengelohasil analisis risiko pada unit pengantongan lainnya yang berada di luar Pabrik PT Semen Tonasa.

Berdasarkan uraian diatas, maka peneliti tergerak untuk melakukan penelitian mengenai analisis risiko kesehatan lingkungan akibat Paparan  $PM_{2,5}$  dan Gas  $SO_2$  pada pekerja di Unit Produksi PT Semen Tonasa.

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang, peneliti merumuskan masalah yaitu bagaimana risiko Paparan  $PM_{2,5}$  dan Gas Sulfur Dioksida ( $SO_2$ ) pada kesehatan Pekerja di unit Produksi PT Semen Tonasa?

## 1.3 Tujuan Penelitian

1. Tujuan Umum  
Untuk menganalisis risiko kesehatan paparan  $PM_{2,5}$  dan Gas Sulfur Dioksida ( $SO_2$ ) pada pekerja di unit Produksi PT Semen Tonasa.
2. Tujuan Khusus  
Tujuan khusus yang ingin dicapai dalam penelitian ini adalah:
  - a. Untuk mengetahui konsentrasi  $PM_{2,5}$  dan Gas Sulfur Dioksida ( $SO_2$ ) di unit Produksi PT Semen Tonasa.
  - b. Untuk menganalisis risiko kesehatan pekerja di PT Semen Tonasa akibat paparan  $PM_{2,5}$  dan Gas Sulfur Dioksida ( $SO_2$ )
  - c. Untuk mengetahui kandungan material dalam  $PM_{2,5}$  di masing-masing bagian pada unit Produksi PT Semen Tonasa
  - d. Melakukan Mitigasi Risiko Kesehatan lingkungan pekerja PT Semen Tonasa

## 1.4 Manfaat Penelitian

1. Manfaat ilmiah  
Menambah wawasan dan ilmu pengetahuan bagi akademisi, khususnya bidang toksikologi, serta menjadi bahan rujukan untuk pengembangan penelitian-penelitian selanjutnya yang berkaitan dengan konsentrasi partikulat pada industri semen dan dampaknya pada kesehatan manusia.

2. Manfaat Institusi

Menjadi sumber informasi, bahan evaluasi, dan bahan pertimbangan dalam pengambilan keputusan terkait manajemen risiko baik bagi risiko kualitas lingkungan dan risiko kesehatan bagi pekerja khususnya di unit Produksi PT Semen Tonasa.

3. Manfaat Praktis

Penelitian ini diharapkan dapat menambah wawasan dan pengetahuan mengenai dampak kesehatan akibat paparan PM 2,5 dan gas Sulfur Dioksida (SO<sub>2</sub>) bagi pekerja, serta dapat menjadi sarana pengembangan ilmu pengetahuan yang secara teoritis didapatkan selama perkuliahan.