

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Industri semen menjadi salah satu kontributor utama dalam pelepasan emisi ke atmosfer, yang mencemari udara melalui proses pembakaran dan pengolahan bahan baku di dalam kiln (tungku pembakaran). Emisi partikel halus yang dihasilkan kemudian dilepaskan ke udara melalui cerobong, dan seringkali tidak sepenuhnya tertangkap oleh sistem pengendalian emisi seperti *elektrostatik presipitator* atau *bag filter*, terutama jika sistem tersebut tidak berfungsi secara optimal. Hal ini menyebabkan peningkatan konsentrasi PM_{2.5} di udara dan berisiko terhadap kesehatan masyarakat di sekitar kawasan industri (Saputra & Akmal, 2021).

Penelitian Wahyu dkk (2024), menyatakan bahwa konsentrasi PM_{2.5} di Kawasan PT Semen Tonasa, Pangkep, tercatat berkisar antara 0,0598 mg/m³ hingga 0,1985 mg/m³. Temuan yang menunjukkan bahwa paparan PM_{2.5} cukup signifikan di mana 47 dari 95 pekerja (49,47%) memiliki nilai RQ>1, yang mengindikasikan potensi risiko terhadap kesehatan akibat paparan partikel halus tersebut.

PT Semen Tonasa adalah industri semen terbesar di kawasan timur Indonesia yang terletak di Desa Biringere, Kecamatan Bungoro, Kabupaten Pangkep, Sulawesi Selatan. Perusahaan ini memiliki empat unit pabrik dengan total kapasitas produksi 6 juta ton semen per tahun. Proses produksinya menggunakan sistem kering dan membutuhkan energi tinggi. Aktivitas industri ini berpotensi menghasilkan emisi udara yang dapat mencemari lingkungan sekitar (Anwar dkk, 2019).

Particulate Matter 2.5 (PM_{2.5}) merupakan salah satu jenis polutan berukuran kurang dari 2.5 µm (mikrometer) yang dapat meningkatkan risiko kematian akibat paparannya. Secara alami, PM_{2.5} berasal dari fenomena alam seperti debu yang ada di tanah kering yang terbawa angin, namun sebagian besar PM_{2.5} dihasilkan dari proses kegiatan manusia, termasuk kegiatan industri. Partikel halus ini mudah terhirup dan dapat mencapai pernapasan manusia dan berpotensi menyebabkan gangguan pernapasan serta masalah kesehatan kronis (Anindya & Hendrasarie, 2023).

Faktor meteorologi berperan signifikan dalam produksi (pembentukan), dekomposisi (penguraian), dan dispersi (penyebaran) polutan udara (Aditya dkk, 2022). Parameter cuaca seperti kecepatan dan arah angin, suhu udara, serta kelembapan relatif dapat menentukan arah dan sejauh mana partikel polutan tersebar di atmosfer. Pada fase *La Niña* umumnya terjadi peningkatan curah hujan, kelembapan tinggi, dan pola angin yang berbeda dibandingkan kondisi normal, yang dapat mempengaruhi pola penyebaran emisi (Anindya & Hendrasarie, 2023).



tersebut, penulis terdorong untuk melakukan penelitian yang konsentrasi *Particulate Matter 2.5* (PM_{2.5}) dari Emisi Pabrik Cuaca Selama Fase *La Niña* di Kawasan PT Semen Tonasa, ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh fase *La Niña* dan kondisi sebaran PM_{2.5}. Hasil analisis diharapkan dapat mendukung upaya

pengendalian emisi dan perlindungan lingkungan, serta memberikan rekomendasi bagi kebijakan lingkungan di masa mendatang.

1.2 Tujuan Dan Manfaat

1.2.1. Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui dampak fase *La Niña* pada sebaran partikulat di Kawasan Tonasa
2. Mengidentifikasi faktor cuaca dominan yang mempengaruhi peningkatan atau penurunan konsentrasi PM selama fase *La Niña* di kawasan industri PT Semen Tonasa

1.2.2 Manfaat

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat antara lain:

1. Memberikan informasi yang bermanfaat bagi masyarakat sekitar mengenai potensi risiko paparan polutan udara pada kondisi cuaca tertentu.
2. Menambah wawasan mengenai dampak fenomena *La Niña* terhadap kualitas udara di kawasan industri lokal.

1.3 Landasan Teori

1.3.1 *Particulate Matter 2.5 (PM2.5)*

Particulate Matter 2.5 (PM2.5) merupakan salah satu parameter utama dalam kualitas udara yang memiliki dampak signifikan terhadap manusia dan lingkungan. PM2.5 mengacu pada partikel udara yang berukuran lebih kecil dari 2.5 μm (mikrometer), yang Ketika terhirup tidak dapat disaring dalam sistem pernapasan bagian atas dan akan menembus bagian terdalam paru-paru (Akmal & Carolina, 2023).

PM2.5 dapat dihasilkan dari aktivitas alam, kendaraan bermotor, maupun aktivitas industri. Salah satu sumber utama PM2.5 dari sektor industri adalah proses pembakaran dan produksi di pabrik semen, yang melepaskan partikel halus ke atmosfer. Emisi dari cerobong pabrik, pengangkutan bahan baku, serta proses penggilingan dan pemanasan dapat meningkatkan konsentrasi PM2.5 di lingkungan sekitar (Anindya & Hendrasarie, 2023).

Jenis zat pencemar yang biasanya diemisikan oleh industri semen adalah *Particulate Matter (PM)*, *sulfur dioksida (SO₂)*, dan *nitrogen oksida (NOx)*. Karena lokasi penelitian ini berada di kawasan industri semen, maka fokus utama penelitian diarahkan pada PM, khususnya PM2.5, sesuai dengan tujuan dan ketersediaan data (Dewi dkk, 2018).



2.5 dengan PM10

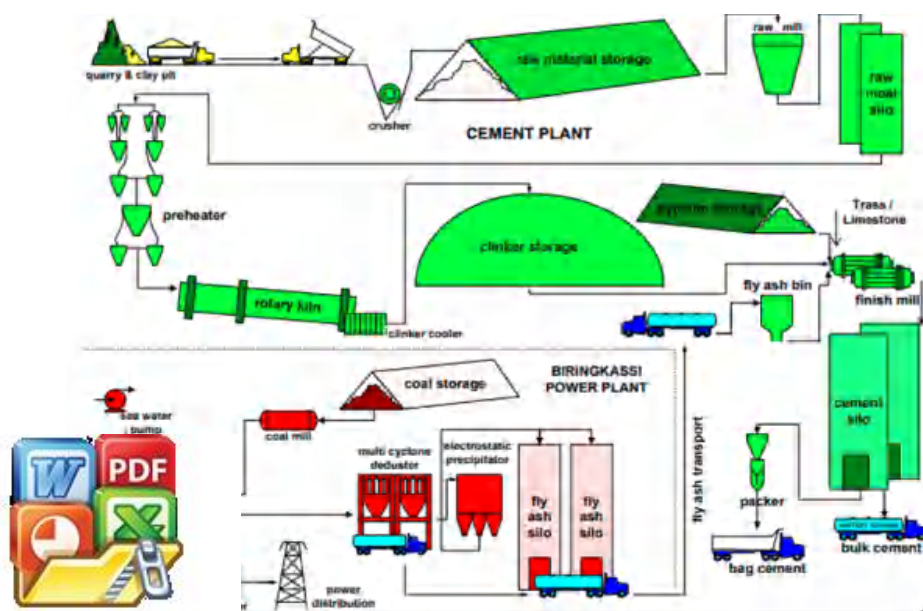
PM10 merupakan salah satu jenis pencemar udara yang terdiri dari termasuk sulfat, ammonia, materi organik, nitrat, garam laut, debu, rawa lainnya (Alviani dkk, 2022). Partikulat Matter dikategorikan berdasarkan aerodinamik partikel. Dua jenis ukuran partikel PM yang sering

1. *Particulate Matter* (PM10) merupakan salah satu polutan udara dengan tingkat toksisitas yang tinggi dan berkontribusi terhadap pencemaran udara ambient. Debu terdiri dari partikel zat padat dan cair yang tersebar diudara, berpotensi mencemari lingkungan serta menimbulkan gangguan pada sistem pernafasan (Nur dkk, 2021). Partikel udara berbentuk padat yang berdiameter $\leq 10 \mu\text{m}$ (mikrometer) ini tidak dapat disaring oleh bulu hidung, sehingga dapat menembus ke jaringan sistem pernafasan manusia dan memicu berbagai gangguan kesehatan. Dampak tersebut diakibatkan karena sifatnya yang karsinogenik maupun non karsinogenik (Handika dkk, 2019).
2. *Particulate Matter* (PM2.5) merupakan partikel udara dengan diameter kurang dari $2,5 \mu\text{m}$. Ukurannya yang jauh lebih kecil memungkinkan partikel ini mencapai alveoli di dalam paru-paru manusia, bahkan dapat masuk ke dalam aliran darah. Karena karakteristik tersebut, partikel PM2.5 memiliki potensi bahaya kesehatan yang lebih tinggi (Anindya & Hendrasarie, 2023).

1.3.3 Industri PT Semen Tonasa

PT. Semen Tonasa merupakan salah satu industri semen terbesar di Kawasan Timur Indonesia yang menempati lahan seluas 715 hektar di Desa Biringere, Kecamatan Bungoro, Kabupaten Pangkep. Sebagai industri dengan konsumsi enegi tinggi, produksi semen di perusahaan membutuhkan banyak bahan bakar pada saat proses pembakaran di kalsiner dan tanur (kiln) (Anwar dkk, 2019). PT. Semen Tonasa memiliki kapasitas terpasang sebesar 5.980.000 ton semen per tahun dengan empat unit pabrik, yaitu Tonasa II, III, IV, dan V. Untuk memastikan kualitas produk, proses produksinya dipantau oleh satuan Quality Control (Soamole, 2022).

1.3.4 Mekanisme produksi semen hingga menghasilkan emisi PM 2.5



1. Mining
Penambangan adalah proses mengambil bahan baku dari area tambang. Untuk membuat semen portland, digunakan bahan alam yang mengandung oksida kalsium, silika, dan alumina, terutama batu kapur (*limestone*) dan tanah liat (*clay*).
2. Crusher
Crusher adalah alat utama yang digunakan untuk menghancurkan bahan baku yang telah ditambang. Proses ini dalam dua tahap yaitu *primary crusher*, mengecilkan batu kapur hingga di bawah 125 mm. kemudian *secondary crusher* melanjutkan hingga di bawah 80 mm. hasil akhirnya disimpan di Gudang penyimpanan yang disebut *mix pile*.
3. Storage
Storage adalah tempat penyimpanan bahan baku seperti batu kapur, tanah liat, pasir silika, dan pasir besi setelah melalui proses *crushing*, namun sebelum diproses lebih lanjut di *raw mill*.
4. Raw mill
Raw mill adalah alat utama untuk menggiling dan mengeringkan bahan baku. Proses ini menggunakan udara panas dari *cooler* dan *pre-heater* sebagai media pengering sekaligus pembawa material halus ke tahap berikutnya. Bahan baku digiling di bagian tengah *raw mill*, sementara udara panas masuk dari bawah dan membawa hasil gilingan halus keluar melalui bagian atas.
5. Cf silo
Raw mill dipindahkan ke *CF Silo* menggunakan alat transportasi seperti *fluxoslide* dan *belt bucket elevator*. Di dalam *CF Silo*, material tersebut dihomogenisasi, disimpan, dan disiapkan untuk tahap proses berikutnya.
6. Preheater
Pemanasan *raw mill* dilakukan di *preheater cyclone* 4 tingkat menggunakan gas panas dari *rotary kiln*. Material dari silo dibawa ke bagian atas *preheater* oleh *belt conveyor*, sementara gas panas masuk dari bawah dan mengalir berlawanan arah. Gas mengalir karena isapan kipas *fan*, sedangkan material turun akibat gravitasi. Di dalam *cyclone* material dan gas berputar, dan melalui gaya sentrifugal, material dipisahkan dari gas.
7. Kiln
Rotary kiln adalah silinder baja sepanjang 75 meter yang dilapisi batu tahan api untuk menahan panas dan melindungi struktur kiln. Kiln berfungsi membakar *raw meal* menjadi *klinker* melalui proses pemanasan bertahap dari zona *preheating*, *kalsinasi*, *transisi*, *sintering*, hingga *pendinginan*. Suhu tinggi di dalam kiln memungkinkan terjadinya reaksi kimia pembentukan senyawa utama semen seperti C3S, C2S, C3A, dan C4AF.



ran dalam kiln menghasilkan partikel halus atau *particulate matter* (PM) karena suhu tidak optimal, reaksi tidak sempurna, atau terjadi kelebihan gas seperti CaO. Pembentukan PM juga bisa dipicu oleh senyawa volatil seperti alkali, belerang, dan klorida yang tidak terbakar sempurna dan lolos. PM ini berasal dari hasil pembakaran bahan bakar (misalnya batu bara) yang halus dari *raw meal* yang ikut terbawa aliran gas panas.

1.3.5 Variabel Cuaca

Variabel cuaca adalah elemen-elemen yang menentukan kondisi atmosfer pada suatu waktu tertentu dan bersifat berubah-ubah seiring waktu. Faktor-faktor cuaca meliputi curah hujan, suhu udara, kelembapan, serta kecepatan angin, yang dapat mempengaruhi lingkungan serta berdampak pada kesehatan manusia (Utami & Windraswara, 2019).

1.3.6 Suhu

Suhu merupakan derajat panas atau dinginnya suatu benda yang diukur berdasarkan skala tertentu. Satuan suhu yang biasa digunakan yaitu derajat celsius ($^{\circ}\text{C}$). Salah satu faktor yang mempengaruhi suhu di udara adalah durasi penyinaran matahari (Hidayat & Sari, 2021). Suhu memiliki pengaruh terhadap konsentrasi *Particulate Matter* (PM) di udara, di mana penelitian menunjukkan bahwa pada malam hari konsentrasi polutan ini lebih tinggi dibandingkan siang hari (Sari dkk, 2019).

1.3.7 Kecepatan Angin

Menurut Prawirowardoyo (1996), angin merupakan gerak udara yang sejajar dengan permukaan bumi. Angin bergerak dari suatu daerah bertekanan tinggi ke daerah bertekanan rendah. Kecepatan angin adalah kecepatan udara yang bergerak secara horizontal yang dapat dipengaruhi oleh gradien barometris letak tempat, tinggi tempat, dan keadaan topografi. Kecepatan angin dapat mempengaruhi penyebaran polutan diudara, termasuk partikulat halus seperti PM2.5. Selain itu, angin memiliki peran dalam menentukan kondisi cuaca, seperti tingkat kelembapan serta kemungkinan terjadinya hujan disuatu daerah (Fitria & Hasanah, 2017).

Berdasarkan pengertian kecepatan angin yang tidak pasti atau selalu berubah-ubah dalam setiap keadaan maka kita dapat melakukan pengamatan melalui skala standar internasional yaitu dengan menggunakan skala Beaufort.

Tabel 1. Kekuatan Angin menurut Skala Beaufort (Sujitno Ah.M.G.1978)

Skala Beaufort	Kecepatan Angin		Nama Uraian Angin	Nama Inggris	Keterangan
	m/s	Knots			
0	0,0-0,2	0-1	Angin reda	Calm	Tiang asap tegak
1	0,3-0,5	1-3	Angin sepoi-sepoi	Light air	Tiang asap miring
2	1,6-3,3	4-6	Angin lemah	Ligth breeze	Daun-daun bergerak
3	3,4-5,4	7-10	Angin sedang	Gentle breeze	Ranting-ranting bergerak
		11-16	Angin tegang	Moderate breeze	Dahan-dahan bergerak
		17-21	Angin keras	Fresh breeze	Batang pohon bergerak
		22-27	Angin keras sekali	Strong breeze	Batang pohon besar bergerak



7	13,9-17,1	28-33	Angin ribut	High wind, Moderate gale	Dahan-dahan patah
8	17,2-20,7	34-40	Angin ribut hebat	Gale, Fresh gale	Pohon-pohon kecil patah
9	20,8-24,4	41-47	Angin badai	Strong gale	Pohon-pohon besar patah
10	24,5-28,4	48-55	Angin badai hebat	Storm, Whole gale	Rumah-rumah roboh
11	28,5-32,6	56-63	Angin taifun	Violent storm	Benda berat berterbangan
12	32,7	64	Angin taifun hebat	Hurricane	Kerusakan hebat

1.3.8 Arah Angin

Arah angin merupakan arah dari mana angin berhembus dan dinyatakan dalam satuan derajat arah (*Direction Degree*), yang diukur searah dengan arah jarum jam mulai dari titik utara Bumi. Arah angin digunakan untuk memprediksi pergerakan udara yang terjadi secara alami dengan arah dan kecepatan tertentu. Pergerakan ini diakibatkan oleh rotasi bumi sehingga angin bergerak dari daerah bertekanan tinggi menuju daerah bertekanan rendah. Oleh karena itu, hembusan angin menunjukkan asal datangnya angin, bukan arah pergerakannya (Wijayanti, 2015).

Tabel 2. Susunan kode biner terhadap arah mata angin

Dec	Biner	Arah	Singkatan	Besar Derajat
0	0000	Utara	U	0° atau 360°
1	0001	Utara Timur Laut	UTL	022.5°
2	0010	Timur Laut	TL	45°
3	0011	Timur Timur Laut	TTL	67.5°
4	0100	Timur	T	90°
5	0101	Timur Menenggara	TM	112.5°
6	0110	Tenggara	TG	135°
7	0111	Selatan Menenggara	SM	157.5°
8	1000	Selatan	S	180°
9	1001	Selatan Barat Daya	SBD	202.5°
10	1010	Barat Daya	BD	225°
11	1011	Barat Barat Daya	BBD	247.5°
12	1100	Barat	B	270°
13	1101	Barat Barat Laut	BBL	292.5°
14	1110	Barat Laut	BL	315°
15	1111	Utara Barat Laut	UBL	337.5°



1.3.9 Kelembapan Relatif

Kelembapan udara relatif adalah ukuran yang menunjukkan jumlah uap air yang terkandung dalam udara. Semakin banyak uap air dalam udara, semakin lembab udara tersebut. Kelembapan udara dinyatakan dalam persen (%) dengan rentang kelembapan udara dalam ruangan yang dianggap ideal berkisar antara 40 – 60%. Dalam lingkungan industri, kelembapan yang tidak terkontrol dapat berdampak pada kualitas udara dan kesehatan pekerja. Kelembapan tinggi akan memicu pertumbuhan jamur, sedangkan kelembapan rendah meningkatkan penyebaran debu yang berpotensi mengganggu sistem pernapasan (Murniati, 2018).

1.3.10 Kelembapan Spesifik

Menurut Joko & Winarno (2019), kelembapan spesifik merupakan perbandingan massa uap air di udara dengan satuan massa udara dan dinyatakan dalam gram/kg. Kelembapan spesifik ini berkaitan dengan suhu titik embun, yang di mana perubahan suhu titik embun dapat mempengaruhi jumlah uap air dalam udara. Selain itu, tekanan barometer juga berperan dalam menentukan kelembapan spesifik. Penurunan tekanan barometer menyebabkan volume per satuan masa udara naik, sedangkan kenaikan tekanan barometer akan menyebabkan kelembapan spesifik menurun (Sari dkk, 2017).

1.3.11 Tekanan permukaan

Tekanan permukaan merupakan gaya yang diberikan oleh atmosfer pada suatu ketinggian tertentu dan cenderung menurun seiring dengan bertambahnya ketinggian dari permukaan laut akibat jumlah molekul udara yang semakin sedikit. Salah satu faktor utama yang mempengaruhi kerapatan udara selain suhu adalah tekanan. Semakin tinggi suatu lokasi, tekanan semakin rendah, yang juga berdampak pada kadar oksigen yang tersedia. Perubahan tekanan udara berperan dalam memengaruhi kondisi cuaca, seperti pembentukan awan, hujan, dan angin. Tekanan yang rendah sering dikaitkan dengan cuaca buruk, sedangkan tekanan udara tinggi umumnya menunjukkan kondisi cuaca yang lebih stabil (Emor dkk, 2021)

1.3.12 Curah Hujan

Curah hujan merupakan salah satu parameter iklim yang perilaku atau gejalanya tampak jelas akibat anomali iklim. Anomali iklim seringkali terjadi berulang karena dipengaruhi oleh dinamika atmosfer. Pengukuran curah hujan dapat menggunakan alat penakar hujan dengan satuan milimeter (mm). Curah hujan dengan ukuran 1 mm setara dengan volume air sebanyak 1 liter/m² (Yusuf dkk, 2022). Menurut BMKG terdapat lima kriteria curah hujan sebagai berikut:

Tabel 3. Kategori Curah Hujan



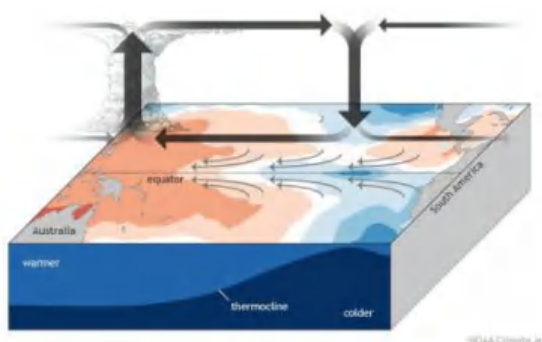
Optimized using
trial version
www.balesio.com

Status	Rentang Curah Hujan
Kerawanan	0 mm/hari
Ringan	<5 mm/hari
Cukup	5-20 mm/hari
Sedang	21-50 mm/hari
Berat	51-100 mm/hari

1.3.13 La Niña

Menurut Halide dkk (2024), *La Niña* merupakan fase dingin dari fenomena ENSO yang ditandai dengan suhu permukaan laut (SST) lebih rendah dari $-0,5^{\circ}\text{C}$. Kondisi ini menyebabkan angin pasat timur menguat dan mendorong awan hujan terkonsentrasi di wilayah barat pasifik, sehingga meningkatkan curah hujan di daerah tersebut. Ismiati (2022) menjelaskan bahwa *La Niña* terjadi akibat adanya penurunan suhu di Samudra pasifik tengah dan timur dan menurunnya tekanan di pasifik bagian barat sehingga terbentuklah awan *cumulus nimbus* yang mengandung curah hujan cukup banyak yang disertai petir.

Fenomena *La Niña* merupakan kebalikan dari *El Nino* dan biasanya terjadi ketika *El Nino* mulai melemah. Ketika suhu air laut kembali seperti semula (dingin), dan *upwelling* kembali terjadi, kondisi cuaca pun berangsur kembali normal (Wicaksono, 2022).



Gambar 2. Siklus Terjadinya *La Niña*

Berdasarkan intensitasnya, *La Niña* di kategorikan sebagai berikut (Wicaksono, 2022):

1. *La Niña* Lemah (Weak *La Niña*), jika penyimpangan suhu muka laut di Pasifik ekuator $-1,0^{\circ}\text{C}$ s/d $-0,5^{\circ}\text{C}$ dan berlangsung minimal selama 3 bulan berturut-turut.
2. *La Niña* sedang (Moderate *La Niña*), jika penyimpangan suhu muka laut di Pasifik ekuator $-1,5^{\circ}\text{C}$ s/d $-1,0^{\circ}\text{C}$ dan berlangsung minimal selama 3 bulan berturut-turut.
3. *La Niña* kuat (Strong *La Niña*), jika penyimpangan suhu muka laut di Pasifik ekuator $< -1,5^{\circ}\text{C}$ dan berlangsung minimal selama 3 bulan berturut-turut.

1.3.14 Pengaruh *La Niña* di Indonesia

La Niña memberikan dampak signifikan terhadap kondisi cuaca di Indonesia. Fenomena ini menyebabkan peningkatan curah hujan yang lebih tinggi dari biasanya, terutama di berbagai wilayah yang rentan terhadap hujan lebat seperti Sumatra, Jawa, Kalimantan, dan Sulawesi. Peningkatan curah hujan ini terjadi akibat pergerakan massa udara yang banyak membawa uap air ke Indonesia, dipengaruhi oleh perbedaan tekanan yang menyebabkan angin dari Samudra Pasifik dan Samudra Hindia bergerak menuju Indonesia.



La Niña meliputi meningkatnya risiko bencana hidrometeorologi, seperti banjir, longsor, dan badai tropis di beberapa daerah. Selain itu, sektor pertanian akan terdampak, baik secara positif maupun negatif. Meskipun

meningkatnya curah hujan dapat mendukung pertumbuhan tanaman, tetapi hujan yang berlebihan dapat merusak tanaman, menyebabkan gagal panen, serta meningkatkan risiko penyakit tanaman. Selain itu, *La Niña* juga dapat mempengaruhi sektor perikanan dan kelautan, karena curah hujan tinggi dan gelombang besar dapat menghambat aktivitas nelayan (Safitri, 2015).

1.3.15 Pengaruh *La Niña* di Sulawesi Selatan

La Niña memiliki pengaruh signifikan terhadap curah hujan di Sulawesi Selatan, terutama selama periode musim kemarau hingga awal musim hujan, yang berlangsung antara Juni hingga November. Selama fenomena *La Niña*, suhu permukaan laut di Pasifik Ekuator Timur lebih rendah dari biasanya, sementara suhu laut di sekitar Indonesia, termasuk Sulawesi Selatan, menjadi lebih hangat. Perbedaan suhu ini memicu peningkatan pembentukan awan dan curah hujan yang lebih tinggi dibandingkan kondisi normal (Wicaksono, 2022). Berdasarkan penelitian sebelumnya, menunjukkan bahwa curah hujan akibat *La Niña* di Sulawesi Selatan dapat mencapai 100–400%, terutama di bagian selatan dan timur wilayah tersebut.

Pengaruh ini berpotensi mengubah pola musim, menyebabkan kemarau basah dan majunya awal musim hujan. Dengan kondisi geografis Sulawesi Selatan yang memiliki topografi bervariasi, peningkatan curah hujan akibat *La Niña* dapat meningkatkan risiko bencana hidrometeorologi seperti banjir dan tanah longsor, terutama di wilayah dataran rendah dan daerah dengan kemiringan lereng curam (Trisnakusumawati dkk, 2022).

1.3.16 Pengaruh *La Niña* di Pangkep

La Niña berpengaruh terhadap peningkatan curah hujan lebih tinggi dari biasanya, terutama selama musim hujan. Fenomena ini menyebabkan akumulasi curah hujan yang lebih besar, meningkatkan risiko bencana hidrometeorologi seperti banjir dan tanah longsor di wilayah pesisir. Selain itu, *La Niña* juga berkontribusi pada peningkatan dinamika laut yang dapat memperkaya nutrient di perairan sekitar, mendukung produktivitas perikanan lokal. Dampak ini sangat terasa di wilayah pesisir barat Sulawesi Selatan, termasuk Pangkep, yang secara geografis dipengaruhi oleh perubahan pola angin monsun dan sirkulasi laut global (Matandung dkk, 2023).

1.3.17 Penelitian Terdahulu Tentang Emisi

Industri semen dikenal sebagai salah satu penyumbang terbesar emisi partikulat di dunia, yang berasal dari proses pembakaran dan pengolahan material. Berbagai studi telah menunjukkan bahwa paparan jangka panjang terhadap partikel halus seperti PM_{2.5} dapat meningkatkan risiko gangguan pernapasan, penyakit kardiovaskular, bahkan kematian dini (Duppa dkk, 2020).



Optimized using
trial version
www.balesio.com

Terdahulu tentang Emisi Isu Global

Ignitive Road Dust (FRD) di Kota Lanzhou, China, berkontribusi pencemaran udara serta meningkatkan risiko kesehatan masyarakat. ng tinggi menyebabkan peningkatan paparan partikel berbahaya gam berat dan senyawa karsinogenik, yang dapat memicu penyakit skular, dan kanker. Selain itu, emisi dari sektor industri dan pabrik

turut menyumbang polusi udara dengan melepaskan partikel halus yang berbahaya ke atmosfer. Kombinasi emisi dari FRD dan pabrik secara signifikan meningkatkan kadar PM2.5, memperburuk kualitas udara di kawasan perkotaan. Akibatnya, dampak kesehatan yang ditimbulkan mencapai 234,5 kematian dini pada tahun 2017 (Chen dkk, 2019).

1.3.19 Penelitian terdahulu tentang emisi di Indonesia

Emisi PM2.5 dari sektor industri di Indonesia, khususnya di kawasan industri dan pabrik semen, berkontribusi signifikan terhadap pencemaran udara dan berdampak pada kesehatan masyarakat. Berdasarkan laporan *World Air Quality Report* tahun 2020, Indonesia mencatat rata-rata konsentrasi PM2.5 tertinggi di Asia Tenggara dengan rata-rata 40,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, yang tergolong tidak sehat bagi kelompok sensitif (Engel, 2021).

Penelitian yang dilakukan di berbagai industri semen menunjukkan bahwa kadar debu PM10 dan PM2.5 sering kali melebihi baku mutu yang ditetapkan, seperti di industri semen di Cilegon dengan kadar PM10 mencapai 1002,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ di ruang pengepakan (Ferial dkk, 2021). Menurut Duppa dkk (2020), Polusi udara akibat emisi industri dipengaruhi oleh faktor lingkungan seperti suhu, kelembapan, dan kecepatan angin yang memengaruhi penyebaran partikulat. Dampaknya, pekerja industri serta masyarakat sekitar berisiko mengalami gangguan pernapasan, penyakit kardiovaskular, dan gangguan fungsi paru (Citra dkk, 2018).

1.3.20 Penelitian terdahulu tentang emisi di PT Semen Tonasa

Penelitian oleh Wahyu dkk (2024), mengungkapkan bahwa konsentrasi PM2.5 di kawasan PT Semen Tonasa, Pangkep, bervariasi di beberapa area produksi. Konsentrasi PM2.5 tercatat berkisar antara 0,0598 mg/m^3 hingga 0,1985 mg/m^3 , dengan konsentrasi tertinggi ditemukan di area Packer sebesar 0,1985 mg/m^3 dan konsentrasi terendah di area Kiln sebesar 0,0598 mg/m^3 . Temuan ini menunjukkan bahwa paparan PM2.5 di lingkungan kerja PT Semen Tonasa cukup signifikan, di mana 47 dari 95 pekerja (49,47%) memiliki nilai RQ (Risk Quotient) lebih dari 1, yang mengindikasikan potensi risiko terhadap kesehatan akibat paparan partikel halus tersebut.

1.3.21 Analisis Komposit

Analisis komposit merupakan metode statistik yang digunakan untuk mengidentifikasi dan memahami pola atau hubungan antara dua variabel dengan membandingkan kondisi rata-rata suatu parameter selama kejadian tertentu seperti El Niño dan La Niña. Teknik ini dilakukan dengan menghitung nilai rata-rata konsentrasi partikulat selama periode terjadinya suatu fenomena, kemudian dibandingkan dengan rata-rata pada periode netral. Hasilnya disajikan dalam bentuk anomali atau deviasi yang menunjukkan



jaruh fenomena iklim terhadap kualitas udara. Analisis komposit dalam memperlihatkan keterkaitan yang lebih nyata antara dua lingkungan memungkinkan pemahaman yang lebih mendalam terhadap dampaknya, 2021).

1.3.22 Analisis *Multiple Regression Stepwise*

Menurut Hapsery & Lubis (2019), metode stepwise adalah salah satu teknik dalam analisis regresi linier berganda yang digunakan untuk memperoleh model dengan kontribusi yang tinggi. Metode ini juga berfungsi untuk mengidentifikasi faktor-faktor yang berpengaruh signifikan terhadap variabel dependen.

Analisis regresi linier berganda adalah hubungan secara linear antara dua atau lebih variabel independent. Dimana bertujuan untuk mengetahui arah hubungan antara variabel independent dengan variabel dependen (Matulessy & Tambunan, 2023). Berikut persaaamaan yang dapat digunakan dalam menghitung Regresi Linier Berganda (Wijaya & Widjaja, 2022).

$$Y = a + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + \dots + b_nX_n \quad (1)$$

Keterangan:

Y : Variabel tak bebas/terikat

a : Konstanta

b_1, b_2, b_n : Koefisien

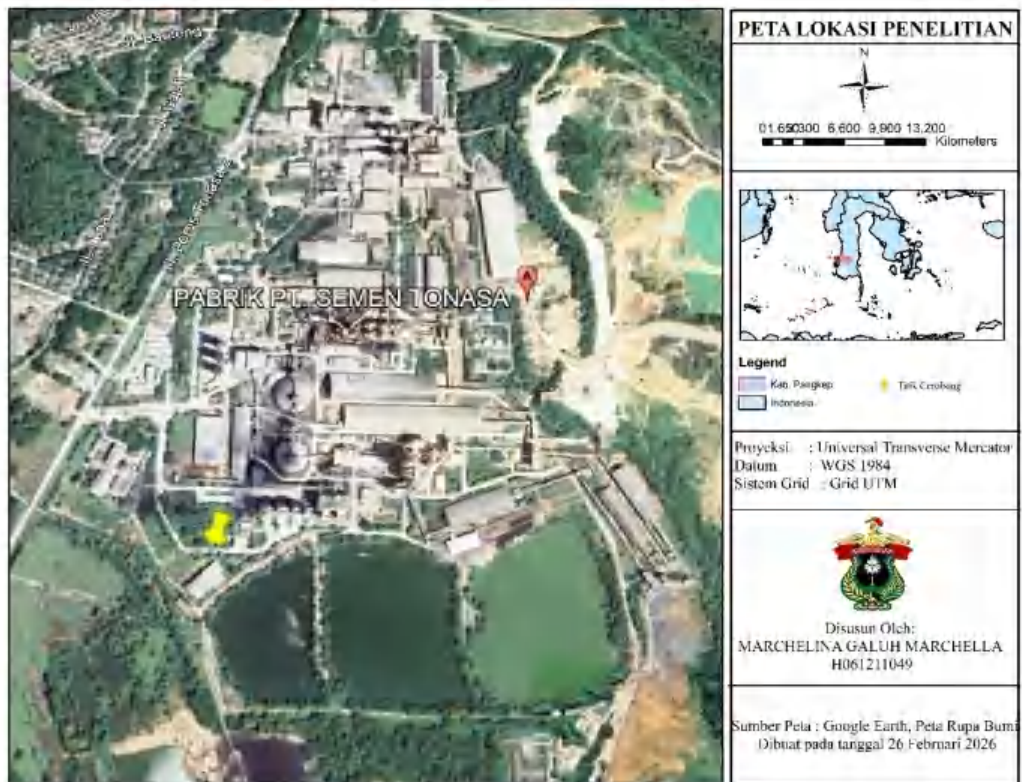
X_1, X_2, X_n : Variabel bebas



BAB II METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilakukan di PT Semen Tonasa, yang terletak di Kabupaten Pangkajene dan Kepulauan (Pangkep), Sulawesi Selatan. PT Semen Tonasa merupakan pabrik semen terbesar di Indonesia bagian timur, yang beroperasi dalam skala besar dan berkontribusi terhadap emisi partikulat ke atmosfer, dengan fokus pada titik sumber emisi dari Kiln 5 yang memiliki koordinat $04^{\circ}47'32.5''$ LS dan $119^{\circ}36'51.3''$ BT.



Gambar 3. Lokasi Penelitian

2.2 Alat dan Bahan

2.2.1 Alat

Alat yang digunakan pada penelitian Tugas Akhir ini yaitu:



Keras terdiri dari:

laptop
komputer
printer

lunak terdiri dari:

re Matlab R2021a

- b) *Software* Microsoft Excel 2021
- c) *Software* ArcGIS 10.8
- d) Notepad

2.2.2 Bahan

Data yang diolah berupa data sekunder mengenai PM2.5, *El Niño-Southern Oscillation* (ENSO), serta variasi cuaca di wilayah Pangkep, Indonesia. Data tersebut diperoleh dari *Washington University in St. Louis* dan *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA).

1. Data PM2.5

Data PM2.5 yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data sekunder dari tahun 2014-2022 yang diperoleh dari situs yang disediakan *Washington University in St. Louis*

<https://wustl.box.com/v/ACAG-V5GL04-GWRPM25>

2. Data *El Nino-Southern Oscillation* (ENSO)

Data *Nino* yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data sekunder dari tahun 2014-2022 yang diperoleh dari situs yang disediakan oleh *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA). NOAA menyediakan data cuaca, iklim, lautan dan lingkungan berdasarkan dataset dan instansi yang menyediakan data-data tersebut dengan skala global.

(<https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis2.html>)

3. Data Variasi Cuaca

Penelitian ini menggunakan data sekunder variasi cuaca yang mencakup suhu, kecepatan angin, arah angin, kelembapan relatif, kelembapan spesifik, tekanan permukaan, dan curah hujan dari tahun 2014-2022 yang diperoleh dari situs yang disediakan oleh *National Aeronautics and Space Administration* (NASA).

(<https://power.larc.nasa.gov/>)

Enam variabel dipilih karena merupakan parameter meteorologi yang umum digunakan serta memiliki pengaruh langsung terhadap pergerakan dan penyebaran partikulat. Sementara itu, variabel lain seperti radiasi matahari, UV, dan indeks awan tidak digunakan karena lebih berpengaruh terhadap reaksi kimia diatmosfer, bukan secara langsung terhadap jumlah partikulat yang dihasilkan dari emisi industri.

2.3 Pengumpulan Data

Data sekunder mengenai PM2.5, variasi cuaca, dan ENSO dikumpulkan dari *Washington University*, NASA dan NOAA untuk wilayah Indonesia pada periode 2014-2022, namun analisis difokuskan pada wilayah Pangkep di PT Semen Tonasa. Tahap persiapan



cari dan mengumpulkan informasi yang relevan serta teori-teori sebagai sumber seperti jurnal dan buku. Selanjutnya, dilakukan sekunder yang digunakan dalam penelitian ini.

a

han data dalam penelitian ini, dilakukan dengan mempersiapkan pengolahan data. Langkah-langkahnya yakni sebagai berikut:

1. Mengolah data PM2.5 pada *Software* Matlab untuk menghasilkan peta spasial temporal di PT Semen Tonasa dengan sumber emisi pada Kiln 5 selama periode 2014-2022.
2. Mengklasifikasikan data *Nino* 3.4 dalam 3 fase yaitu fase *El Nino*, fase netral, dan fase *La Niña*. Data *Nino* 3.4 yang bernilai lebih dari -5 (> -5) diklasifikasikan menjadi fase *El Nino*, data yang bernilai -0.5 sampai 0.5 dikelompokkan menjadi fase netral, dan data yang bernilai kurang dari -5 (< -5) dikelompokkan menjadi fase *La Niña*. Setelah pengelompokan selesai, hasil klasifikasi ini diolah dalam MATLAB untuk membuat deret waktu (*time series*) fase ENSO.
3. Mengolah data PM2.5 pada fase *La Niña* menggunakan metode *composite* untuk menghasilkan peta spasial yang menunjukkan sebaran PM2.5 di area penelitian. Proses ini menggunakan data *Nino* 3.4 yang telah diklasifikasikan sebelumnya.
4. Menganalisis kecepatan dan arah angin selama fase *La Niña* untuk membuat peta *windrose*, yang digunakan untuk mengidentifikasi pola arah angin di wilayah penelitian.
5. Mengolah data variasi cuaca, termasuk suhu, kecepatan angin, kelembapan relatif, kelembapan spesifik, tekanan permukaan, dan curah hujan selama fase *La Niña* menggunakan metode *stepwise*, dengan tujuan mengidentifikasi variabel cuaca yang paling berpengaruh terhadap konsentrasi PM2.5.



2.5 Bagan Alir Penelitian

