

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Semakin berkembangnya aktivitas pembangunan industri, maka *volume* limbah yang dihasilkan juga cenderung meningkat (Hendrasarie & Maria, 2021). Limbah udara umumnya berasal dari proses produksi yang melibatkan pembakaran atau pemanasan, yang menghasilkan partikel maupun gas (Novirsa & Achmadi, 2012).

Salah satu jenis partikel udara yang paling berbahaya bagi kesehatan adalah PM2.5, yaitu partikel dengan diameter aerodinamis kurang dari 2,5 mikrometer. Karena ukurannya yang sangat kecil, PM2.5 dapat dengan mudah masuk ke dalam sistem pernapasan hingga ke bagian terdalam paru-paru, sehingga sulit disaring dan berpotensi menyebabkan gangguan pernapasan, kanker paru-paru, penyakit kardiovaskular, hingga kematian dini (Hester dan Harrison, 2016). Secara alami, PM2.5 berasal dari debu tanah kering yang terbawa angin, abu vulkanik dari letusan gunung berapi, serta semburan uap panas di sekitar sumber panas bumi. Sementara itu, sumber PM2.5 yang disebabkan oleh aktivitas manusia umumnya berasal dari pembakaran bahan bakar minyak, pembakaran batu bara, aktivitas industri, serta kebakaran hutan dan lahan (Alviani, 2022).

PT Semen Tonasa merupakan produsen semen terbesar di wilayah timur Indonesia yang berlokasi di Desa Biringere, Kecamatan Bungoro, Kabupaten Pangkep, Sulawesi Selatan. Perusahaan ini mengoperasikan empat unit pabrik dengan kapasitas produksi gabungan mencapai 6 juta ton semen setiap tahunnya. Produksi dilakukan dengan metode proses kering yang memerlukan konsumsi energi cukup besar. Kegiatan operasional industri ini berisiko menimbulkan emisi udara yang dapat berdampak negatif terhadap kualitas lingkungan di sekitarnya (Anwar dkk., 2019).

Penelitian yang dilakukan oleh Duppa dkk. (2020) di kawasan industri semen Bosowa, Kabupaten Maros, menggunakan metode observasi analitik untuk menganalisis konsentrasi PM2.5. Hasil penelitian menunjukkan bahwa konsentrasi PM2.5 tertinggi tercatat sebesar 20,92 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, sedangkan konsentrasi terendah sebesar 11,30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Rata-rata konsentrasi PM2.5 di lokasi tersebut mencapai 15,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, yang mencerminkan adanya potensi paparan partikulat halus di sekitar kawasan industri semen tersebut.



memiliki peran yang sangat penting dalam proses pembentukan, penyebaran polutan di atmosfer (Aditya dkk., 2022). Variabel-mengaruhi arah dan seberapa jauh partikel-partikel polutan bernya. Perubahan ini dapat berdampak signifikan terhadap pola

dan intensitas penyebaran emisi, terutama yang berasal dari aktivitas industri (Anindya & Hendrasarie, 2023).

Berdasarkan permasalahan tersebut, penulis terdorong untuk melakukan penelitian yang berjudul “Analisis Konsentrasi *Particulate Matter* 2,5 (PM2.5) dari Emisi Pabrik Berdasarkan Variasi Cuaca Selama Fase *El Niño* di Kawasan PT Semen Tonasa, Pangkep.” Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh kondisi cuaca dan fase *El Niño* terhadap konsentrasi serta pola penyebaran PM2.5 di wilayah industri PT Semen Tonasa.

1.2 Tujuan dan Manfaat

1.2.1 Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah:

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

1.2.2 Manfaat

Adapun Manfaat dari penelitian ini adalah;

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

1.3 Landasan Teori

1.3.1 *Particulate Matter* 2.5 (PM2.5)

Particulate Matter (PM) adalah salah satu jenis polutan udara yang terdiri dari campuran berbagai zat, termasuk sulfat, amonia, materi organik, nitrat, garam laut, debu, air, serta beragam unsur dan senyawa lainnya (Alviani dkk., 2022).

Secara alami, PM2.5 berasal dari debu tanah kering yang terbawa angin, abu vulkanik dari letusan gunung berapi, serta semburan uap panas di sekitar sumber panas bumi. Sementara itu, sumber PM2.5 yang disebabkan oleh aktivitas manusia umumnya berasal dari pembakaran bahan bakar minyak, pembakaran batu bara, aktivitas industri serta kebakaran hutan dan lahan (Alviani, 2022).



ntuk melalui dua mekanisme, yaitu secara primer dan sekunder. ah partikel yang langsung dilepaskan ke atmosfer dari sumber- perti aktivitas industri, emisi kendaraan bermotor, dan kebakaran tu, PM2.5 sekunder terbentuk secara tidak langsung di atmosfer antara berbagai zat pencemar (Fathulloh et al., 2021).

PM2.5 merupakan partikel udara berukuran lebih kecil dari 2,5 mikrometer. Karena ukurannya yang sangat halus, partikel ini tidak mampu disaring oleh sistem pernapasan bagian atas dan dapat masuk hingga ke bagian terdalam paru-paru. Paparan PM2.5 dalam udara tercemar berisiko menyebabkan berbagai gangguan kesehatan, seperti Infeksi Saluran Pernapasan Akut (ISPA), penyakit kardiovaskular, kanker paru-paru, penyakit paru obstruktif kronis (PPOK), hingga kematian dini. Selain dampak kesehatan, konsentrasi PM2.5 yang tinggi juga diketahui dapat menurunkan jarak pandang (visibilitas), sehingga berpotensi mengganggu keselamatan transportasi (Akmal & Carolina, 2023).

1.3.2 Perbedaan PM2.5 dengan PM10

Particulate Matter (PM) diklasifikasikan berdasarkan ukuran partikelnya, salah satu metode umum yang digunakan adalah berdasarkan diameter aerodinamiknya. Dua jenis PM yang sering disebut adalah (Alviani, 2022) :

1. PM10 – Partikel dengan diameter aerodinamik kurang dari 10 μm . Partikel ini dapat terhirup oleh manusia dan mencapai saluran pernapasan atas, namun sebagian besar dapat tersaring oleh rambut hidung dan saluran pernapasan bagian atas.
2. PM2.5 – Partikel dengan diameter aerodinamik kurang dari 2,5 μm . Karena ukurannya yang jauh lebih kecil. Hal ini menjadikan PM2.5 lebih berbahaya bagi kesehatan dibandingkan PM10.

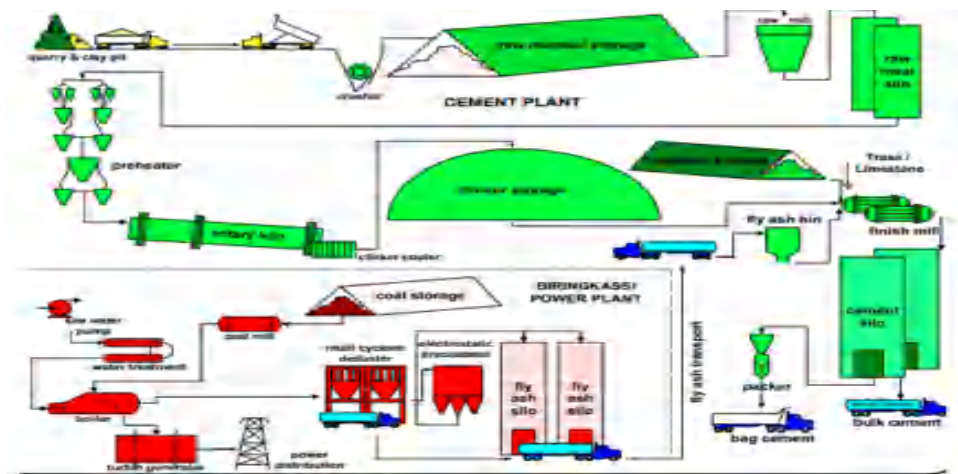
1.3.3 Industri PT Semen Tonasa

PT Semen Tonasa adalah perusahaan yang berfokus pada produksi semen dan melakukan aktivitas penambangan batugamping di wilayah Kabupaten Pangkep, Sulawesi Selatan. Dalam kegiatan penambangannya, perusahaan ini menggunakan metode peledakan untuk menghancurkan batugamping sebagai bahan baku utama dalam pembuatan semen (Nilasari et al., 2017).

PT Semen Tonasa merupakan salah satu industri semen terbesar di wilayah Indonesia bagian timur, yang berlokasi di Desa Biringere, Kecamatan Bungoro, Kabupaten Pangkep, dengan luas area mencapai 715 hektar. Perusahaan ini memiliki total kapasitas produksi sekitar 6 juta ton semen per tahun dan mengoperasikan empat unit pabrik, yaitu Unit II, III, IV, dan V. Seluruh unit tersebut menerapkan sistem proses kering, dengan kapasitas produksi masing-masing sebesar 590.000 ton per tahun untuk Unit II dan III, 2.300.000 ton per tahun untuk Unit IV, serta 2.500.000 ton per tahun untuk Unit V (Anwar dkk., 2019).



1.3.4 Mekanisme produksi semen hingga menghasilkan emisi PM_{2.5}



Gambar 1. Alur Produksi Semen
Sumber: PT Semen Tonasa (2021)

Proses produksi semen di PT Semen Tonasa dapat dilihat pada **Gambar 1**. Tahapan produksi dimulai dari kegiatan penambangan batu kapur dan tanah liat yang berasal dari area tambang milik perusahaan. Batu kapur yang ditambang akan dihancurkan menjadi ukuran lebih kecil menggunakan mesin *crusher*, lalu disimpan di tempat penyimpanan bahan baku (*raw material storage*). Selanjutnya, bahan-bahan seperti batu kapur, tanah liat, silika, dan pasir besi digiling menggunakan mesin *raw mill*. Campuran bahan mentah tersebut kemudian dikirim ke pabrik untuk melalui tahap pemanasan awal (*preheater*), dilanjutkan ke mesin *rotary kiln*, suhu di dalam *kiln* sangat ekstrem, sehingga kondisi batu tahan api harus rutin diperiksa untuk memastikan kelayakannya (Caronge, 2018).

1.3.5 Variabel cuaca

Variabel cuaca merupakan faktor-faktor yang mempengaruhi kondisi atmosfer pada suatu waktu tertentu dan bersifat dinamis, sehingga dapat mengalami perubahan dari waktu ke waktu. Cuaca adalah kondisi atmosfer yang terjadi pada waktu dan lokasi tertentu, dengan cakupan wilayah yang terbatas serta berlangsung dalam periode waktu yang singkat (Miftahuddin, 2016).



atur merupakan besaran yang digunakan untuk menyatakan
dingin suatu benda atau lingkungan. Suhu udara sendiri
at panas atau dinginnya udara, yang diukur menggunakan
skala *Celcius* ($^{\circ}\text{C}$), *Reamur* ($^{\circ}\text{R}$), dan *Fahrenheit* ($^{\circ}\text{F}$) (Winarno

1.3.7 Kecepatan angin

Kecepatan angin didefinisikan sebagai jarak yang ditempuh oleh angin atau pergerakan udara dalam satu satuan waktu. Nilai kecepatan angin dapat diukur dengan berbagai satuan, seperti kilometer per jam (km/jam) atau knot, di mana 1 knot setara dengan 0,5148 meter per detik (m/s) atau 1,854 km/jam (Siregar & Supani, 2018).

Klasifikasi angin dilakukan untuk menentukan besar kecepatan angin, salah satunya dengan menggunakan skala Beaufort. Skala Beaufort adalah skala yang digunakan untuk mengukur kecepatan angin berdasarkan pengaruhnya terhadap lingkungan sekitar. Skala ini menggunakan angka dan simbol, di mana semakin besar angka skala Beaufort, semakin kencang angin berhembus dan semakin besar potensi kerusakannya (Sari & Maulidany, 2020),

Skala Beaufort dimulai dari angka 1 yang menunjukkan hembusan angin paling tenang hingga angka 12 yang menunjukkan angin dengan kekuatan destruktif. Skala ini tetap relevan dan masih digunakan hingga saat ini untuk berbagai keperluan, termasuk navigasi maritim dan prakiraan cuaca. Berikut merupakan tabel Skala Beaufort:

Tabel 1. Klasifikasi Kecepatan Angin (knot), menurut Skala Beaufort (V. Sari & Maulidany, 2020).

<i>Number of Scale</i>	<i>Description</i>		<i>Wind Speed</i>
0	<i>Calm</i>	<i>Light Winds</i>	<1 knot
1	<i>Light Air</i>		1-3 knots
2	<i>Light Breeze</i>		4-6 knots
3	<i>Gentle Breeze</i>		7-10 knots
4	<i>Moderate Breeze</i>		11-16 knots
5	<i>Fresh Breeze</i>		17-21 knots
6	<i>Strong Breeze</i>	<i>High Winds</i>	22-27 knots
7	<i>Near Gale</i>		28-33 knots
8	<i>Gale</i>	<i>Gale-force</i>	34-40 knots
9	<i>Strong Gale</i>		41-47 knots
	<i>Storm</i>	<i>Storm-force</i>	48-55 knots
	<i>Violent Storm</i>		56-63 knots
	<i>Hurricane Force</i>	<i>Hurricane-force</i>	>63 knots



Selain tabel di atas, terdapat pula tabel skala Beaufort dengan satuan m/s. (Abdy & Sanusi, 2020). Berikut di bawah ialah tabel skala Beaufort:

Tabel 2. Klasifikasi Kecepatan Angin (m/s), menurut Skala Beaufort (Abdy & Sanusi, 2020).

Skala Beaufort	Kategori Angin	Kecepatan Angin (m/s)
0	Tenang	0 - 0,2
1	Udara ringan	0,3 - 1,5
2	Hembusan lemah	1,6 - 3,3
3	Hembusan lembut	3,4 - 5,4
4	Hembusan sedang	5,5 - 7,9
5	Hembusan segar	8,0 - 10,7
6	Hembusan kuat	10,8 - 13,8
7	Angin ribut lemah	13,9 - 17,1
8	Angin ribut	17,2 - 20,7
9	Angin ribut kuat	20,8 - 24,4
10	Badai	24,5 - 28,4
11	Badai amuk	28,5 - 32,6
12	Siklon	> 32,7

1.3.8 Arah Angin

Angin adalah pergerakan udara yang sejajar dengan permukaan bumi, di mana udara mengalir dari wilayah bertekanan tinggi ke wilayah bertekanan rendah. Nama angin ditentukan berdasarkan arah asalnya. Misalnya, angin timur berasal dari arah timur, angin laut bertiup dari laut menuju daratan, sedangkan angin lembah bergerak dari lembah ke arah pegunungan (Lusiani dkk., 2018).

Arah angin didefinisikan sebagai arah asal angin bertiup, yang dinyatakan dalam satuan derajat ($^{\circ}$). Penentuan arah ini mengikuti perputaran jarum jam dengan titik sesuai dengan penunjuk pada kompas (Lusiani dkk., 2018).



Relatif

Relatif (*Relative Humidity/RH*) adalah perbandingan antara uap air yang ada di udara dengan tekanan uap air jenuh pada suhu yang sama dalam persen (%RH). Pengukuran RH memiliki peran penting

dalam analisis serta prakiraan cuaca, karena sangat berkorelasi dengan perubahan fase air di atmosfer, seperti kondensasi, penguapan, dan pembentukan awan (Ananda dkk., 2023)

1.3.10 Kelembapan Spesifik

Specific humidity adalah jumlah kandungan uap air dalam udara yang dinyatakan dalam satuan grains per pound udara. *Specific humidity* mengukur massa uap air dalam satuan massa udara kering dan sering digunakan dalam studi meteorologi dan klimatologi untuk memahami distribusi kelembapan di atmosfer (Mursyid, 2018).

1.3.11 Tekanan

Tekanan permukaan merupakan gaya yang dihasilkan oleh atmosfer pada suatu titik ketinggian, dan umumnya akan menurun seiring bertambahnya elevasi dari permukaan laut karena semakin sedikitnya jumlah molekul udara. Selain suhu, tekanan merupakan salah satu faktor utama yang memengaruhi kerapatan udara. Semakin tinggi suatu tempat, maka tekanannya semakin rendah, yang secara langsung juga berdampak pada berkurangnya kadar oksigen. Perubahan tekanan ini memainkan peran penting dalam dinamika cuaca, termasuk dalam proses terbentuknya awan, hujan, dan pergerakan angin. Tekanan rendah biasanya berkaitan dengan kondisi cuaca yang tidak stabil atau buruk, sedangkan tekanan tinggi sering menunjukkan cuaca yang lebih tenang dan stabil (Emor dkk., 2021).

1.3.12 Curah hujan

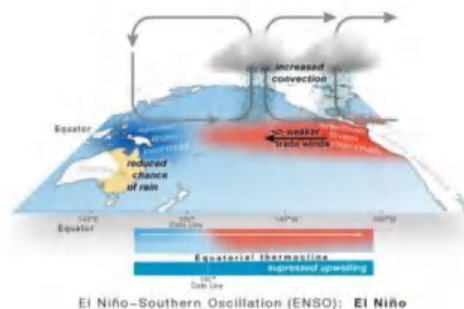
Curah hujan adalah ketinggian air hujan yang terkumpul pada permukaan datar tanpa mengalami penguapan, peresapan, atau aliran. Satuan curah hujan umumnya dinyatakan dalam milimeter (mm) atau inci, tetapi di Indonesia lebih sering digunakan milimeter (mm). Jumlah curah hujan pada interval waktu yang diamati, intensitas curah hujan dapat diklasifikasikan ke dalam kategori berikut (Spiridonov & Curic, 2020) :

- a) Hujan sangat lemah – intensitas hujan $< 0,25$ mm/jam.
- b) Hujan lemah – intensitas curah hujan $0,25\text{--}1,0$ mm/jam.
- c) Hujan sedang – intensitas curah hujan $1,0\text{--}4,0$ mm/jam.
- d) Berat – intensitas curah hujan $4,0\text{--}16,0$ mm/jam.
- e) Hujan lebat – intensitas curah hujan $16,0\text{--}50,0$ mm/jam.
- f) Hujan ekstrim – intensitas curah hujan $> 50,0$ mm/jam



berarti bahwa dalam luasan satu meter persegi pada permukaan g tertampung mencapai ketinggian 1 mm, atau setara dengan 1 persegi (Dwirani, 2019).

ditandai dengan kenaikan suhu permukaan laut di wilayah khatulistiwa bagian tengah dan timur. Fenomena ini merupakan perubahan iklim global yang disebabkan oleh pemanasan suhu permukaan air laut di Pasifik bagian timur. *El Niño* terjadi dalam siklus 2 hingga 7 tahun dan dapat bertahan selama 12 hingga 15 bulan. Ciri-ciri utama *El Niño* meliputi peningkatan suhu permukaan laut secara berkala di kawasan Pasifik serta perubahan pola tekanan udara yang berdampak pada gangguan sistem cuaca global, termasuk berkurangnya curah hujan di beberapa daerah dan meningkatnya curah hujan di wilayah lain (Taufiq & Marnita, 2011).



Gambar 2. Siklus Terjadinya *El Niño*

Sumber: BOM (2017)

El Niño adalah peristiwa pemanasan suhu air permukaan laut di pantai barat Peru dan Ekuador di Amerika Selatan yang menyebabkan gangguan iklim secara global. Secara normal, suhu air permukaan laut di daerah tersebut cenderung lebih dingin karena adanya *upwelling*, yaitu proses naiknya arus dari dasar laut ke permukaan yang membawa air dingin dan kaya nutrisi. Namun, saat *El Niño* terjadi, *upwelling* melemah atau bahkan berhenti, menyebabkan suhu air permukaan meningkat dan berdampak pada perubahan pola cuaca di berbagai belahan dunia (Safitri, 2015).

Proses terjadinya *El Niño* dimulai ketika air laut yang panas dari perairan Indonesia bergerak ke arah timur menyusuri garis khatulistiwa hingga mencapai pantai barat Amerika Selatan, khususnya di wilayah Peru dan Ekuador. Pada saat yang bersamaan, air laut yang panas dari pantai Amerika Tengah bergerak ke arah selatan hingga bertemu dengan massa air panas dari Indonesia di pantai barat Peru dan Ekuador. Pertemuan ini menyebabkan berkumpulnya massa air laut panas dalam jumlah besar, menciptakan daerah dengan suhu permukaan laut yang lebih tinggi dari biasanya (Safitri, 2015).



air laut yang panas ini kemudian mentransfer panasnya ke udara di atasnya. Udara memuai ke atas melalui proses konveksi dan menciptakan tekanan rendah di pantai barat Peru dan Ekuador. Akibatnya, angin biasanya bertiup dari timur ke barat melemah, sehingga uap air di wilayah Indonesia berkurang. Hal ini menyebabkan penurunan

curah hujan dan berujung pada musim kemarau yang lebih panjang dan lebih kering di wilayah Indonesia serta bagian lain di Asia Tenggara (Safitri, 2015).

1.3.14 Pengaruh *El Niño* di Indonesia

Ketika *El Niño* berlangsung, Indonesia mengalami musim kemarau yang lebih kering dari biasanya, dengan permulaan musim hujan yang tertunda. Peningkatan tekanan udara di Pasifik tengah dan timur selama *El Niño* menyebabkan pembentukan awan yang lebih intensif di wilayah tersebut, sehingga curah hujan meningkat di kawasan Pasifik tengah dan timur. Sebaliknya, di Pasifik barat, termasuk Indonesia, terjadi kekeringan yang lebih parah dari kondisi normal (Safitri, 2015).

Selain itu, meningkatnya suhu permukaan laut di perairan yang biasanya dingin mengakibatkan perubahan ekosistem laut. Perairan yang sebelumnya kaya akan ikan menjadi kurang, sehingga nelayan mengalami kesulitan dalam mendapatkan hasil tangkapan. Secara keseluruhan, fenomena *El Niño* berdampak pada penurunan jumlah curah hujan yang signifikan di berbagai daerah di Indonesia, yang dapat berujung pada kekeringan berkepanjangan, gagal panen, serta meningkatnya risiko kebakaran hutan dan lahan (Safitri, 2015).

1.3.15 Pengaruh *El Niño* di Sulawesi selatan

Sulawesi Selatan memiliki pola curah hujan yang bervariasi antara wilayah pesisir barat dan timur serta memiliki tingkat kerentanan yang tinggi terhadap variabilitas iklim, terutama akibat fenomena ENSO. Sebagai salah satu sentra produksi pangan nasional, dampak kekeringan di provinsi ini dapat berakibat serius terhadap produksi pangan nasional. Pada tahun 2005 dan 2006, luas lahan sawah yang terdampak kekeringan di Sulawesi Selatan mencapai 13.625 hektar, dengan 670 hektar di antaranya mengalami puso atau gagal panen. Jika kekeringan terus terjadi di wilayah-wilayah sentra produksi pangan, maka produksi pangan nasional dapat mengalami penurunan yang signifikan, sehingga mengancam ketahanan pangan nasional (Sugiarto & Kurniawan, 2009).

1.3.16 Pengaruh *El Niño* di Pangkep

Kekeringan merupakan bencana yang berdampak luas terhadap kehidupan masyarakat, terutama dalam hal ketersediaan air bersih. Penurunan pasokan air bersih akibat kekeringan dapat mempengaruhi ketahanan pangan, pertanian, ekonomi, serta lingkungan. Salah satu faktor yang memperburuk kekeringan adalah fenomena *El Niño* yang menyebabkan curah hujan menurun drastis di beberapa wilayah Indonesia. Dampaknya tidak hanya terbatas pada sektor pertanian tetapi juga mempengaruhi kesehatan masyarakat akibat kurangnya air bersih. Selain itu, perubahan iklim (*climate change*) turut meningkatkan frekuensi dan intensitas kekeringan. Oleh karena itu, perlu dilakukan dengan pendekatan yang komprehensif, seperti konservasi sumber daya air yang berkelanjutan, perbaikan sistem irigasi, serta



peningkatan kesadaran masyarakat terhadap dampak perubahan iklim (Tenriawi, 2023).

1.3.17 Penelitian Terdahulu tentang Emisi

Penelitian yang dilakukan oleh Duppa dkk. (2020) di kawasan industri semen Bosowa, Kabupaten Maros, menggunakan metode observasi analitik untuk menganalisis konsentrasi PM2.5. Hasil penelitian menunjukkan bahwa konsentrasi PM2.5 tertinggi tercatat sebesar 20,92 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, sedangkan konsentrasi terendah sebesar 11,30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Rata-rata konsentrasi PM2.5 di lokasi tersebut mencapai 15,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, yang mencerminkan adanya potensi paparan partikulat halus di sekitar kawasan industri semen tersebut.

Polutan udara yang biasa ditemui pada kawasan industri adalah debu, nitrogen dioksida (NO₂), sulfur dioksida (SO₂), karbon monoksida (CO), dan hidrokarbon (HC) (Helmy, 2019). Partikel tersuspensi di udara ambien mempunyai beragam ukuran, dikelompokkan menjadi *Total Suspended Particel* (TSP) berukuran hingga 100 mikron, PM10 (partikel dengan ukuran < 2,5 mikron) (Duppa dkk., 2020).

1.3.18 Penelitian Terdahulu tentang Emisi Isu Global

Emisi karbondioksida dari pembakaran bahan bakar fosil dan proses industri menyumbang sekitar 78% dari total peningkatan emisi gas rumah kaca dari tahun 1970 hingga 2010 (Nurdiawansyah dkk., 2018)

1.3.19 Penelitian Terdahulu tentang Emisi di Indonesia

Nilai dari PM2.5 yang tinggi dikarenakan faktor kelembapan, tekanan udara, dan suhu sehingga udara di sekitar daerah dapat berdampak menimbulkan iritasi mata merah, fungsi paru-paru menurun, alergi, dan gangguan sistem pernapasan. Perhitungan risiko (RQ) mendapatkan nilai 2,976847, lebih besar dari 1 sehingga Desa Kaloran, Kecamatan Ngronggot, Kabupaten Nganjuk sudah tidak aman lagi, dengan nilai PM2,5 maksimum sebesar 0,15 mg/m³ (Ridayanti, 2022).

1.3.20 Penelitian Terdahulu tentang Emisi di PT Semen Tonasa

Tingkat risiko dari paparan debu PM2,5 dan SO₂ di Pabrik Semen Tonasa terhadap pekerja di ruangan *kiln coal mill* sampai ke ruangan pengepakan. Sebanyak 47 responden memiliki nilai RQ > 1 sehingga dapat dikatakan sebanyak 47 orang pekerja berisiko akibat paparan dari debu PM2,5. Nilai konsentrasi yang dipatkan ng 0,0598 mg/m³ sampai 0,1985 mg/m³ (Anwar dkk., 2019).



nposite

merupakan salah satu metode statistik yang digunakan untuk nahami pola atau keterkaitan antara dua variabel, dengan cara ai rata-rata suatu parameter pada saat terjadi peristiwa tertentu,

seperti *El Niño* dan *La Niña*. Teknik ini melibatkan perhitungan rata-rata konsentrasi partikulat selama periode terjadinya fenomena iklim. Metode analisis komposit juga memiliki keunggulan dalam menampilkan hubungan yang lebih jelas antar variabel (Aditya, 2021).

1.3.22 Stepwise Multiple Regression

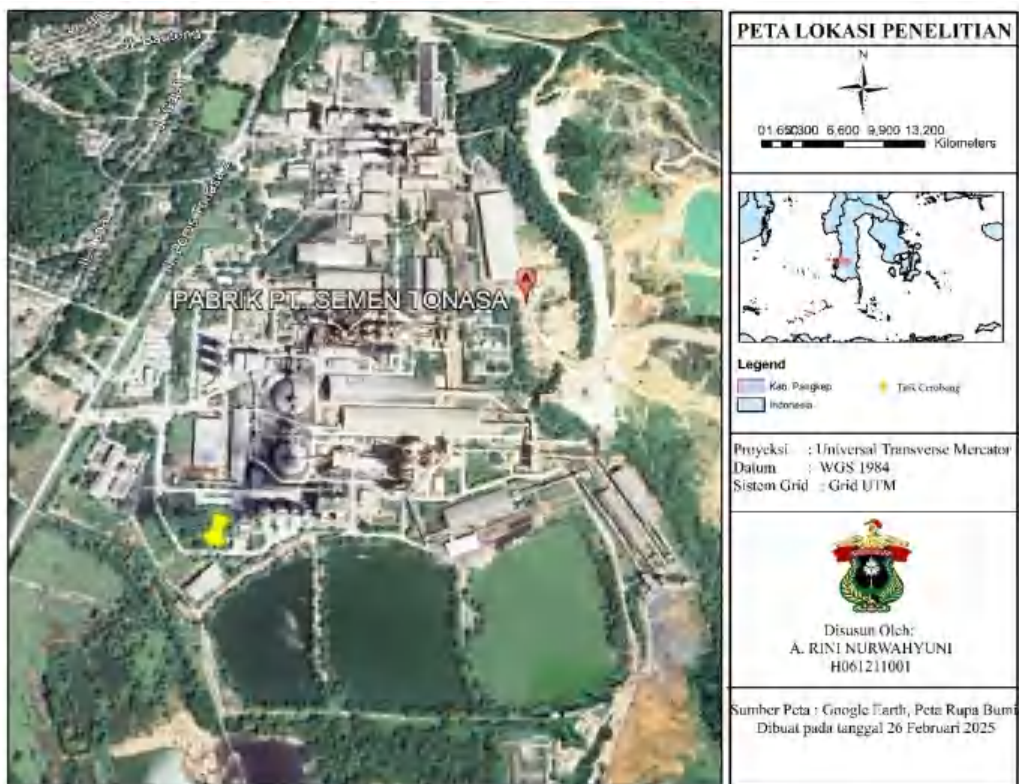
Dijelaskan oleh metode *stepwise* merupakan salah satu teknik dalam analisis regresi linier berganda yang digunakan untuk memperoleh model dengan kontribusi tinggi (Hapsery & Lubis, 2019). Metode ini berguna dalam menentukan faktor-faktor yang memiliki pengaruh signifikan terhadap variabel dependen (Andayani dkk., 2016).



BAB II METODE PENELITIAN

2.1 Lokasi 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. Peta Lokasi Penelitian

2.2 Alat dan Bahan

2.2.1 Alat



n pada penelitian Tugas Akhir ini yaitu:
 it Keras terdiri dari:
 ih laptop
 ih komputer
 ih printer
 it lunak terdiri dari:

- a) *Software* 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 PM_{2.5}, *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 PM 2.5
Data PM_{2.5} 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 Niño-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, kelembaban relatif, kelembaban 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/>

2.3 Pengumpulan Data

Data sekunder mengenai PM 2.5, 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 dimulai dengan mencari dan mengumpulkan informasi yang relevan serta teori-teori pendukung dari berbagai sumber seperti jurnal dan buku. Untuk melakukan pengumpulan data sekunder yang digunakan dalam



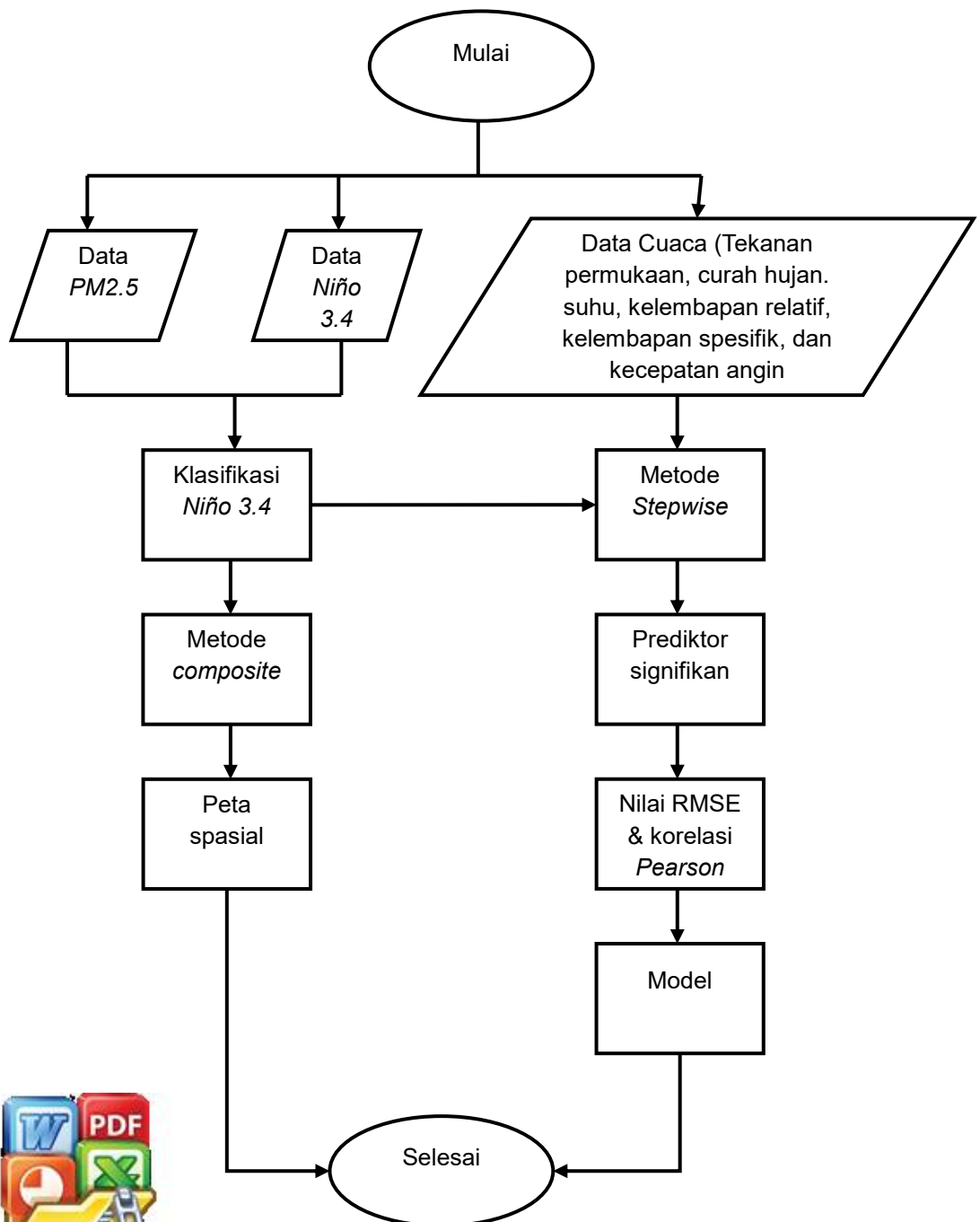
2.4 Pengolahan Data

Untuk tahap pengolahan data dalam penelitian ini, dilakukan dengan mempersiapkan data dan *software* 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 Niño*, fase netral, dan fase *La Nina*. Data Nino 3.4 yang bernilai lebih dari -5 (> -5) diklasifikasikan menjadi fase *El Niño*, data yang bernilai -0.5 sampai 0.5 dikelompokkan menjadi fase netral, dan data yang bernilai kurang dari -5 (< -5) dikelompokkan menjadi fase *La Nina*. Setelah pengelompokan selesai, hasil klasifikasi ini diolah dalam MATLAB untuk membuat deret waktu (*time series*) fase *ENSO*.
3. Mengolah data PM2.5 pada fase *El Niño* 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 *El Niño* 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 *El Niño* menggunakan metode *stepwise*, dengan tujuan mengidentifikasi variabel cuaca yang paling berpengaruh terhadap konsentrasi PM2.5.



2.5 Bagan Alir Penelitian



Gambar 4. Bagan alir

