



## Analisis Persebaran Emisi PM<sub>2.5</sub> dari Cerobong *Spray dryer* Industri Keramik Menggunakan Pemodelan *Software Graz Lagrangian Model (GRAL)*

Adila Putri Anindya<sup>1</sup>, Novirina Hendrasarie<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Program Studi Teknik Lingkungan, Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur

Email Korespondensi(Penulis): [novirina@upnjatim.ac.id](mailto:novirina@upnjatim.ac.id)

**Diterima:** 15-10-2023

**Disetujui:** 16-10-2023

**Diterbitkan:** 17-10-2023

### **Kata Kunci:**

Cerobong *Spray dryer*, Emisi PM<sub>2.5</sub>, GRAL, Industri Keramik, Pemodelan Lingkungan, Polusi Partikulat, *Software Graz Lagrangian Model*

### **ABSTRAK**

*Particulate Matter 2.5 (PM<sub>2.5</sub>)* merupakan salah satu jenis polutan dengan ukuran kurang dari 2.5 mikron yang dapat menyebabkan peningkatan mortalitas dari paparannya. PM<sub>2.5</sub> dapat dihasilkan dari aktivitas alam, kendaraan bermotor, aktivitas industri, dan aktivitas rumah tangga. PM<sub>2.5</sub> di industri keramik terus meningkat dari tahun ke tahun. *Graz Lagrangian Model (GRAL)* adalah aplikasi yang dapat memodelkan polusi udara dengan memasukkan data meteorologi dan konsentrasi polutan. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui hasil pengukuran konsentrasi PM<sub>2.5</sub> pada salah satu industri keramik di Mojokerto dari November 2022 sampai Februari 2023 dan perbandingannya dengan baku mutu yang berlaku serta memodelkan sebaran PM<sub>2.5</sub> di wilayah Mojokerto menggunakan GRAL. Pada penelitian ini pengukuran dilakukan 1 kali per bulan pada tanggal 21 selama 15 jam. Arah angin dominan terjadi dari arah tenggara dan arah barat daya ke barat, kemudian sedikit terjadi di arah utara dan selatan. Arah angin dari tenggara sering terjadi umumnya dengan kecepatan 2-3 m/s. Pada pemodelan ini salah satu pabrik keramik di kawasan Ngoro Industri Persada (NIP) merupakan titik emisi dengan kawasan domain terdapat 2 titik, yaitu di SMAN 1 Ngoro dan Wisata Sumber Dhuwur Sidorejo. Jarak antar kawasan domain sebesar 4926 m, dengan hasil penyebaran PM 2,5 merata dengan konsentrasi 0 µg/m<sup>3</sup> hingga 0,02 µg/m<sup>3</sup>

**Received:** 15-10-2023

**Accepted:** 16-10-2023

**Published:** 17-10-2023

### **Keywords:**

*Spray dryer Chimney, Emissions PM<sub>2.5</sub>, GRAL, Ceramic Industry, Environmental Modelling, Particulate Matter, Software Graz Lagrangian Model*

### **ABSTRACT**

*Particulate Matter 2.5 (PM<sub>2.5</sub>) is one type of pollutant with a size of less than 2.5 microns which can cause increased mortality due to exposure. PM<sub>2.5</sub> can be generated from natural activities, motor vehicles, industrial activities, and household activities. PM<sub>2.5</sub> in Ceramic Industry continues to increase from year to year. Graz Lagrangian Model (GRAL) is an application that can model air pollution by entering meteorological data and pollutant concentrations. This study aims to determine the results of measuring the concentration of PM<sub>2.5</sub> in one of Ceramic Industry in Mojokerto from November 2022 until February 2023 and its comparison with the applicable quality standards and to model the distribution of PM<sub>2.5</sub> in the Mojokerto area using GRAL. In this study, measurements were carried out 1 times per month on 21th for 15 hours. The dominant wind direction occurs from the southeast and southwest to the west, with occasional occurrences from the north and south. Wind from the southeast commonly occurs at speeds of 2-3 m/s. In this modeling, one of the ceramic factories in the Ngoro Industri Persada (NIP) area is an emission point, with two points in the domain area, namely SMAN 1 Ngoro and Wisata Sumber Dhuwur Sidorejo. The distance between the domain areas is 4926 m, with a uniform distribution of PM 2,5 with concentrations ranging from 0 µg/m<sup>3</sup> to 0.02 µg/m<sup>3</sup>.*

## 1. PENDAHULUAN

Semakin meningkatnya aktivitas pembangunan industri maka semakin meningkatkan jumlah limbah yang akan dihasilkan. Beberapa jenis limbah yang dihasilkan dari aktivitas industri antara lain banyaknya kontaminan yang

dihasilkan dari limbah cair sisa produksi rumah makan (Hendrasarie & Maria, 2021), sedangkan pada industri produksi tempe juga menghasilkan Nitrogen dan Fosfat yang masuk ke dalam limbah cair yang dihasilkan (Hendrasarie & Trilita, 2019). Selain itu, terdapat limbah cair yang dihasilkan dari rumah tangga atau domestic yaitu limbah air tinja yang

hingga saat ini proses pengolahannya dominan dilakukan di *Septic Tank* (Trilita et al., 2016).

Limbah udara juga umum dihasilkan dari proses yang menggunakan pembakaran atau pemanasan dalam proses produksinya sehingga menghasilkan partikulat atau gas. Industri yang menggunakan tungku dan cerobong dalam proses produksinya merupakan penyumbang terbesar 51,27% emisi partikulat udara yang dihasilkan (Novirsa & Achmadi, 2012). Limbah udara yang dihasilkan dapat menurunkan kualitas udara ambien di sekitar wilayah titik emisi ataupun udara dalam ruangan (Umardani & Bukhori, 2007).

Pada industri keramik memiliki beberapa proses yang menggunakan pembakaran, pemanasan dengan suhu yang sangat tinggi dan penggilingan bahan baku menjadi butiran halus bahan baku, seluruh proses tersebut dapat menghasilkan emisi udara berupa *Particulate Matter (PM<sub>2.5</sub>)*. Partikulat memiliki berbagai jenis, ukuran dan komposisi kimia yang berbeda, apabila didasarkan pada proses distribusi partikelnya dapat dibedakan menjadi PM berukuran  $\leq 2,5 \mu\text{m}$ , PM berukuran  $\leq 10 \mu\text{m}$  dan PM berukuran  $\leq 100 \mu\text{m}$  (Regia et al., 2021).

Pada pabrik keramik yang terletak di Mojokerto ini memiliki beberapa cerobong penghasil emisi, salah satunya cerobong *spray dryer* yang mengeluarkan uap panas dan partikulat sisa dari proses pemanasan dengan suhu tinggi. Penggunaan *spray dryer* ini dapat mengubah bahan baku yang berbentuk lumpur atau *slip* menjadi butiran-butiran serbuk dengan ukuran tertentu, kemudian serbuk tersebut akan dijadikan bahan baku badan keramik yang akan dipadatkan pada proses *body pressing*. Dampak penggunaan *spray dryer* yaitu menghasilkan emisi berupa partikulat berukuran 2,5 yang dapat dengan mudahnya masuk ke alveolus dan meningkatkan risiko kematian dalam jangka panjang (Regia et al., 2021). Selain menghasilkan emisi, kegiatan industri ini juga menurunkan kualitas air karena banyaknya polutan yang masuk ke badan air dikarenakan kegiatan manusia disekitarnya (Hendrasarie & Swandika, 2020).

Pada pabrik ini menggunakan *spray dryer* secara kontinyu selama 24 jam, hal ini dilakukan untuk mengurangi penggunaan energi apabila setiap hari harus menyalakan dan mematikan peralatan sebesar *spray dryer* yang membutuhkan energi listrik besar dan waktu yang cukup lama untuk siap digunakan. *Spray dryer* merupakan alat yang berfungsi untuk mengubah lumpur atau cairan menjadi serbuk kering tanpa merusak bahan-bahan tersebut. Cara kerja *Spray dryer* yaitu lumpur atau cairan akan disemprotkan ke media pengering di dalam *Spray dryer* yang memiliki temperature tinggi, hal ini secara otomatis akan menghilangkan kadar air dalam lumpur dengan menguapkannya. Terdapat beberapa faktor yang berpengaruh dalam proses pengeringan di *Spray dryer* yaitu temperatur, tekanan udara, dan kecepatan udara (Mardiawan, 2020). Terbentuknya serbuk kering dari proses *Spray dryer* ini membuat terjadinya pencemaran udara apabila tidak dilakukan pengelolaan mesin yang tepat.

Pencemaran udara merupakan proses masuk atau dimasukkannya zat, energi, atau komponen lainnya ke udara ambien dikarenakan kegiatan manusia sehingga kadar parameter pencemar di atas baku mutu (Permen LH, 2010). Terdapat beberapa bahan pencemar di udara yang dapat mengakibatkan kelainan pada saluran pernapasan apabila

terhirup, yaitu gas SO<sub>2</sub>, gas O<sub>3</sub>, gas NO<sub>2</sub>, dan partikel debu PM<sub>2.5</sub> (Arba, 2019).

*Particulate Matter (PM)* merupakan salah satu jenis pencemar udara yang terdiri dari beberapa campuran sulfat, amonia, materi organik, nitrat, garam laut, debu, air, serta unsur-unsur senyawa lainnya (Alviani et al., 2022). Partikulat Matter dibagi berdasarkan ukuran partikelnya. Salah satu cara umum untuk mengklasifikasikan PM adalah melalui ukuran diameter aerodinamik partikel. Dua ukuran partikel PM yang sering disebut adalah:

1. PM<sub>10</sub>: Partikel dengan diameter aerodinamik kurang dari 10  $\mu\text{m}$ . Partikel ini dapat dihirup oleh manusia dan mencapai saluran pernapasan atas, tetapi sebagian besar tertangkap oleh rambut hidung dan saluran pernapasan atas.
2. PM<sub>2.5</sub>: Partikel dengan diameter aerodinamik kurang dari 2,5  $\mu\text{m}$ . Partikel ini jauh lebih kecil dan dapat mencapai alveoli di dalam paru-paru manusia, dan bahkan bisa masuk ke dalam aliran darah. Karena ukuran ini, partikel PM<sub>2.5</sub> memiliki potensi bahaya kesehatan yang lebih tinggi.

Secara alami, PM<sub>2.5</sub> berasal dari beberapa benda-benda alam, seperti debu yang ada di tanah kering yang terbawa angin, abu vulkanik dari proses letusan gunung berapi, dan semburan uap panas dekat dengan sumber panas bumi. Akan tetapi, PM<sub>2.5</sub> juga banyak dihasilkan dari proses kegiatan manusia, seperti pembakaran bahan bakar minyak, kegiatan industri, dsb (Alviani et al., 2022).

Berdasarkan Peraturan Menteri Negara LH No. 17 Tahun 2008 tentang Baku Mutu Emisi Sumber Tidak Bergerak Bagi Usaha dan/atau Kegiatan Industri Keramik hasil konsentrasi emisi PM<sub>2.5</sub> pada Cerobong *Spray dryer* baku mutu yang ditetapkan yaitu 150 mg/Nm<sup>3</sup>. Studi yang dilakukan di China menunjukkan bahwa paparan PM<sub>2.5</sub> dalam waktu singkat memiliki dampak pada peningkatan risiko gangguan kardiovaskular serta beberapa masalah fisiologis pada sistem pernapasan, seperti penurunan fungsi paru-paru, dan juga bisa mengganggu fungsi saluran pernapasan pada individu dengan riwayat penyakit asma (Arba, 2019).

Pada industri keramik PM<sub>2.5</sub> dapat dihasilkan dari berbagai tahap produksi seperti proses persiapan bahan baku, pencampuran, pembentukan, pengeringan, penggilingan, peleburan dan pengukiran. Proses pembuatan keramik dapat menghasilkan debu dan partikel halus yang mengandung PM<sub>2.5</sub>. Proses-proses seperti penggilingan, pengukiran, atau peleburan bahan baku dapat menghasilkan partikel kecil yang terlepas ke udara. Jenis bahan baku yang digunakan dalam industri keramik dapat memengaruhi jumlah dan jenis partikel yang dihasilkan. Bahan baku yang mengandung mineral berat atau senyawa kimia tertentu dapat meningkatkan potensi pembentukan PM<sub>2.5</sub> yang berpotensi berbahaya. Emisi PM<sub>2.5</sub> dari industri keramik dapat memiliki dampak buruk terhadap kualitas udara di sekitarnya. Partikel halus ini dapat mencapai pernapasan manusia dan berpotensi menyebabkan gangguan pernapasan, masalah kesehatan kronis, dan penyakit jangka panjang. Selain itu, PM<sub>2.5</sub> juga dapat berkontribusi terhadap pencemaran udara dan dampak lingkungan lainnya.

Bahan baku keramik yaitu tanah liat, feldspar, dan dolomit yang berbentuk bubuk atau partikel kecil sehingga sangat mudah untuk terbentuk PM<sup>2.5</sup>, bahan baku tersebut

akan mengalami proses produksi yang menghasilkan limbah atau buangan dari setiap tahapannya. Titik sampling yang diambil merupakan cerobong *Spray dryer* dan *kiln* dikarenakan pada proses pembakaran atau *kiln* terdapat menghasilkan partikel padat. Sisa-sisa bahan bakar dan hasil reaksi kimia selama pembakaran dapat membentuk partikel-partikel yang terbawa oleh aliran gas dan keluar melalui cerobong. Proses ini melibatkan penyemprotan cairan dalam ruangan dengan suhu tinggi, yang mengakibatkan penguapan air dan pembentukan partikel padat yang kemudian terbawa oleh udara panas ke dalam cerobong. *Spray dryer* menggunakan proses atomisasi cairan untuk membentuk *droplets*, kemudian *droplets* yang telah terbentuk akan dilakukan pengeringan menggunakan udara kering dengan suhu dan tekanan yang tinggi (Putri et al., 2021). *Spray dryer* merupakan salah satu alat utama pengering yang dapat mengubah bahan cair menjadi bubuk atau *powder* (Huda, 2020). *Spray dryer* memiliki beberapa ciri khas yaitu memiliki siklus pengeringan yang cepat, dapat menyimpan produk di ruang pengering secara singkat dan hasil akhir dari produk akan siap dikemas saat proses pengeringan selesai (Darmawan et al., 2023).

Kualitas udara yang ada di suatu pabrik dipengaruhi oleh sumber emisi dan kondisi meteorologi seperti kecepatan angin, arah angin, dan stabilitas angin yang ada di daerah pabrik tersebut (Trilita et al., 2018). Kecepatan angin berpengaruh pada persebaran dan pelarutan dari polutan, arah angin berpengaruh pada persebaran polutan pada daerah tersebut dan stabilitas angin berpengaruh pada bagaimana pengendapan polutan tersebut (Hendrasarie & Maria, 2021). Sehingga diperlukan penelitian terkait persebaran *PM2.5* untuk mengetahui persebaran polusi udara di suatu pabrik sebagai acuan dilakukannya penanganan yang lebih lanjut, salah satu *software* yang berfungsi untuk mengetahui sebaran polusi udara di lingkungan yaitu GRAL (*Graz Lagrangian Model*) merupakan *software* yang dikembangkan sejak tahun 1999 oleh *Graz University of Technology* (TUG). GRAL telah digunakan untuk menyimulasi dan memprediksi polutan udara pada dataran maupun perbukitan, yang didasarkan kepada data rata-rata harian, bulanan, dan tahunan. GRAL dapat digunakan untuk menyimulasikan polutan baik skala mikro maupun skala meso. Model Lagrangian dianggap lebih fleksibel dalam hal konfigurasi dan variasi sumber yang berbeda sehingga menjadikannya sebuah alat yang efektif dan kuat dalam mengevaluasi polusi udara serta skenario dibandingkan dengan model Eulerian.

## 2. METODE PENELITIAN

### 2.1 Lokasi dan Data

Penelitian ini dilakukan di salah satu pabrik keramik yang terletak di Kawasan Ngoro Industri Persada (NIP). Penelitian ini menggunakan data primer konsentrasi *PM 2,5* yang dilakukan pengujian secara regular setiap 6 bulan dan data sekunder berupa kecepatan angin dan data arah angin yang didapatkan dari website POWER NASA. Data sekunder yang digunakan pada tanggal 21 setiap bulannya dari bulan November 2022 hingga tanggal 12 Juli 2023 dari pukul 08.00 – 23.00 WIB.

## 2.2 Metode Penelitian

Metode penelitian yang dilakukan terdiri dari 3 tahapan yaitu penyusunan data arah angin, data kecepatan angin, dan data stabilitas angin, kemudian akan dilakukan pengolahan data tersebut dengan cara *running* di *software* GRAL dan dilakukan analisis terkait hasil dari *running* data tersebut. *Software Model Graz Lagrangian* (GRAL) yang telah dibuat sejak tahun 1999 secara luas telah digunakan untuk mengetahui peserbaran dari suatu pencemar udara dalam suatu lingkup wilayah kecil. Hasil dari proses *running* data di *Software* GRAL berupa peta sebaran parameter yang diolah dengan ketinggian tertentu.

## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Berikut merupakan data kecepatan dan arah angin yang didapatkan dari website POWER NASA, yaitu

**Tabel 1.** Data Kecepatan Angin dan Arah Angin

PUKUL	TANGGAL							
	21.11.2022		21.12.2022		21.01.2023		21.02.2023	
	Kec Angin	Arah Angin						
08.00.00	1.02	270.44	2.8	190.46	1.74	190.35	1.88	224.66
09.00.00	1.51	298.82	2.6	198.54	1.39	207.0	3.02	253.3
10.00.00	1.98	310.85	2.49	211.8	1.05	231.34	3.66	264.62
11.00.00	2.51	317.27	2.62	222.46	1.16	260.73	4.18	270.21
12.00.00	2.87	319.53	2.91	226.96	1.31	278.9	4.4	271.63
13.00.00	3.07	321.0	3.23	228.24	1.32	293.38	4.32	269.59
14.00.00	3.15	324.5	3.61	227.37	1.32	305.85	4.15	269.78
15.00.00	3.1	331.44	3.65	226.04	1.33	317.14	3.9	271.72
16.00.00	2.87	340.08	3.42	223.43	1.22	321.74	3.44	273.38
17.00.00	2.45	346.94	3.12	218.91	1.01	320.65	2.68	274.18
18.00.00	1.97	351.81	2.42	213.69	0.86	314.63	1.92	276.06
19.00.00	1.76	356.95	2.07	209.56	0.71	313.67	1.75	274.61
20.00.00	1.66	356.76	2.09	208.39	0.63	303.89	1.73	270.52
21.00.00	1.55	352.77	2.08	210.71	0.54	278.37	1.7	269.47
22.00.00	1.53	345.18	2.13	213.81	0.57	236.75	1.71	272.61
23.00.00	1.58	340.31	2.17	216.66	0.79	214.48	1.88	275.47

PUKUL	21.03.2023		21.04.2023		21.05.2023		21.06.2023		12.07.2023	
	Kec Angin	Arah Angin								
	08.00	1.49	50.54	1.77	80.87	3.61	126.82	2.95	148.33	4.02
09.00	2.09	48.63	2.05	79.68	3.8	120.42	3.12	143.45	4.45	149.74
10.00	2.46	42.3	2.09	75.7	3.49	115.99	3.18	140.48	4.19	147.79
11.00	2.85	35.08	2.16	71.89	3.19	111.98	3.11	137.54	3.88	143.85
12.00	3.18	30.09	2.17	66.02	2.91	110.23	2.97	136.7	3.61	138.42
13.00	3.32	28.19	2.22	57.48	2.69	111.49	2.85	137.56	3.33	133.39
14.00	3.23	27.8	2.42	51.17	2.54	114.75	2.8	139.42	3.05	129.19
15.00	3.03	29.21	2.42	51.28	2.44	117.63	2.85	141.12	2.78	126.64
16.00	2.76	33.69	2.24	55.37	2.2	117.93	2.82	141.41	2.57	127.08
17.00	2.27	38.01	2.1	58.56	2.13	119.85	2.47	142.84	2.4	131.43
18.00	1.89	41.14	1.71	59.57	1.83	121.93	2.0	143.76	2.15	137.95
19.00	1.8	42.54	1.73	63.2	2.0	124.99	2.09	143.99	2.36	144.15
20.00	1.53	49.14	1.75	69.29	2.13	129.19	2.17	143.34	2.46	152.78
21.00	0.96	64.48	1.75	76.09	2.21	134.71	2.23	141.68	2.54	163.18
22.00	0.56	93.18	1.78	85.22	2.27	140.02	2.27	139.89	2.58	168.66
23.00	0.34	90.0	1.78	93.03	2.31	144.75	2.29	140.27	2.55	172.44

Berdasarkan data pada Tabel 1. yang didapatkan dari Power Nasa didapatkan bahwa kecepatan angin paling besar bernilai

4.45 m/s pada pukul 09.00 tanggal 12 Juli 2023 sehingga berpotensi terjadi disperse yaitu semakin besar kecepatan angin maka semakin besar potensi untuk membantu penyebaran partikel *PM2.5* di wilayah sekitar titik emisinya. Semakin kuat angin yang berhembus pada hari itu maka semakin jauh partikel *PM2.5* dari titik emisinya, sehingga konsentrasi di dekat titik emisi akan berkurang. Sedangkan, kecepatan angin paling rendah bernilai 0.34 m/s pada pukul 23.00 tanggal 21 Maret 2023 sehingga berpotensi terjadi deposisi yaitu semakin lemahnya kecepatan angin atau semakin stagnan kecepatan angin dapat menyebabkan penumpukan partikel *PM2.5* di daerah tertentu. Partikel yang diangkut oleh angin lemah akan memiliki peluang lebih besar untuk mengendap dan menempel pada permukaan tanah atau benda-benda di sekitarnya. Ukuran dan berat partikel *PM2.5* juga akan memengaruhi cara mereka bergerak dalam angin. Partikel yang lebih berat mungkin kurang terpengaruh oleh kecepatan angin rendah, sementara partikel yang sangat halus dapat lebih mudah diangkut bahkan oleh angin yang lemah. Menurut (Hendrasarie, 2011), dispersi pencemar termasuk partikulat dipengaruhi oleh kondisi meteorologi seperti temperatur, arah angin, kecepatan angin, stabilitas atmosfer, dan *mixing height* yang berubah-ubah setiap saat.

Arah angin merupakan arah dimana angin berhembus atau darimana arus angin datang, kecepatan angin merupakan kecepatan dari panjangnya arus angin yang dinyatakan dalam knot atau km/jam atau m/s (Fadholi et al., 2013). Arah angin memiliki peran yang sangat penting dalam penyebaran *Particulate Matter (PM2.5)* dalam udara dan dapat memengaruhi seberapa jauh partikel-partikel ini akan tersebar dari sumbernya. Arah angin akan menentukan arah di mana partikel *PM2.5* akan diangkut oleh udara. Jika sumber pencemaran berada di satu arah tertentu dari lokasi pemantauan, arah angin akan menunjukkan sejauh mana area pemantauan akan terpapar oleh partikel *PM2.5*. Arah angin dapat memengaruhi daerah mana yang akan terpapar secara langsung oleh partikel *PM2.5*. Hal ini krusial dalam penilaian risiko kesehatan manusia karena orang yang tinggal atau bekerja di arah angin yang berasal dari sumber emisi tertentu memiliki potensi lebih tinggi untuk terpapar.

Pada penelitian ini digunakan data dari pengujian laboratorium PT X yang bergerak di bidang produksi keramik di Mojokerto. Data kadar parameter *PM2.5* yang digunakan merupakan hasil pengujian laboratorium pada tanggal 12 Juli 2023 dengan titik sampling di cerobong *Spray dryer* 1 yang ada di pabrik tersebut. Berikut merupakan data laboratorium *PM2.5* pada bulan Juli 2023, yaitu

**Tabel 2.** Hasil Pengujian Laboratorium Juli 2023

Description	Result	Regulatory Limit	Unit
Particulate Matter <sup>2.5</sup>	1.0	150	Mg/Nm <sup>3</sup>
Opacity	<20	20	mmHg

Diperlukan juga data-data terkait temperatur udara dan laju alir dari partikel di titik sampling tersebut, berikut merupakan data pengecekan fisik parameter, yaitu

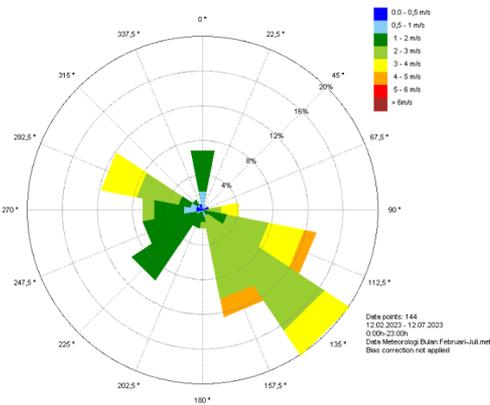
**Tabel 3.** Pengecekan Fisika *PM2.5* di Cerobong *Spray dryer*

Measuring Physical Data	Result	Unit
Oxygen	-	%
Correction Factor	-	-
Correction Calculate Factor	0,98	-
Air Temperature	30,4	°C
Flue Gas Temperature	-	°C
Ambient Pressure	760,0	mmHg
Flow Rate	38,17	m/s

### 3.1 Windrose November 2022 – Juli 2023

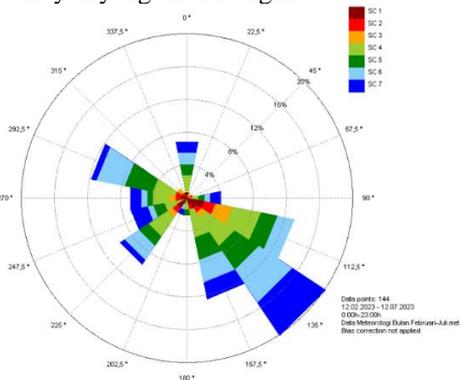
*Windrose* merupakan grafik yang dapat menggambarkan distribusi arah dan kecepatan angin di suatu lokasi selama periode tertentu. Ini merupakan representasi yang sangat berguna karena memungkinkan penyajian data yang besar dalam bentuk diagram yang ringkas (Hendrasarie & Trilita, 2019). *Windrose* adalah salah satu metode untuk merepresentasikan suatu kejadian angin yang memiliki kecepatan tertentu dari berbagai arah dengan periode waktu pencatatan (Qothrunada et al., 2022). Ada berbagai cara untuk memvisualisasikan data angin, dan beberapa pendekatan mungkin lebih efektif daripada yang lain. Baru-baru ini, jenis *windrose* yang lebih modern telah diperkenalkan untuk meningkatkan pemahaman (Crutcher, 1956). *Wind rose* memberikan gambaran yang komprehensif tentang bagaimana angin terdistribusi, dengan presentasi dalam format lingkaran yang menunjukkan frekuensi angin dari berbagai arah. Panjang sektor-sektor lingkaran tersebut mengindikasikan berapa sering angin bertiup dari arah tertentu selama periode waktu tertentu (Fadholi et al., 2013). Kecepatan angin merupakan cepat atau lambatnya angin yang bertiup pada suatu tempat, karena angin adalah besaran vektor yang memiliki arah dan kecepatan (Aminuddin et al., 2016).

*Wind rose* berfungsi untuk memberikan gambaran visual terkait arah dan kecepatan angin di suatu lokasi atau wilayah tertentu dengan periode atau rentang waktu tertentu. Penggambaran *windrose* ini dapat mempermudah memahami pola angin dan *variability* nya (Pongratz et al., 2012). *Wind rose* juga dapat digunakan sebagai suatu gambaran untuk memahami persebaran polusi udara, persebaran bahan kimia berbahaya, dan mengetahui perbuahan iklim yang terjadi (Trilita et al., 2016). *Wind rose* membantu dalam pengambilan keputusan yang lebih baik dengan menyediakan data visual tentang bagaimana angin berperilaku di suatu wilayah. Ini adalah alat penting dalam pemahaman dan manajemen faktor cuaca dan iklim yang berkaitan dengan arah dan kecepatan angin.



Gambar 1. Windrose November 2022 – Juli 2023

Arah angin dominan terjadi dari arah tenggara dan arah barat daya ke barat, kemudian sedikit terjadi di arah utara dan selatan. Arah angin dari tenggara sering terjadi umumnya dengan kecepatan 2-3 m/s. Pada Gambar 3.1 mewakili kondisi kecepatan angin dan arah angin pada bulan November 2022 – Februari 2023 di titik emisi dan sekitarnya. Berdasarkan gambar tersebut, tampak arah tenggara yang dominan sebagai arah angin selama bulan November hingga Februari. Sehingga konsentrasi emisi *PM2.5* banyak ditiupkan ke arah tenggara, menjauhi titik emisi. Semakin kuat kecepatan angin maka konsentrasi emisi *PM2.5* akan semakin menjauhi titik emisi awal dan akan menyebarkan emisi tersebut ke wilayah yang dilalui angin.



Gambar 2. Windrose Stability November 2022-Juli 2023

*Windrose stability* merupakan suatu gambaran atau visualisasi untuk menggambarkan stabilitas atau ketidakstabilan atmosfer dalam suatu wilayah. Berdasarkan Gambar 3.2 diketahui bahwa dominan warna di *windrose stability* yaitu biru tua (SC7), biru muda (SC6), hijau tua (SC5) dan hijau muda (SC4) yang berarti lapisan atmosfer dekat permukaan umumnya lebih dingin daripada lapisan di atasnya, sehingga cenderung menghambat pergerakan vertikal udara. Hal ini bisa mengakibatkan angin yang lebih tenang dan tidak terlalu bertiup di suatu wilayah, terutama pada malam hari ketika radiasi surya yang terbatas dapat menyebabkan pendinginan permukaan. Akan tetapi, karena warnanya gradasi yaitu dari biru tua ke biru muda dan hijau tua ke hijau muda dapat menggambarkan tingkat stabilitas atmosfer di antara kondisi stabil dan tidak stabil. Stabilitas atmosfer dalam konteks *wind rose stability* adalah salah satu faktor yang memengaruhi pola dan sifat angin di suatu wilayah (Sibarani et al., 2021).

### 3.2 Hasil Pengolahan Data Emisi Cerobong *Spray dryer*

Berikut merupakan data yang didapatkan dari hasil pengujian laboratorium dalam rentang waktu 6 bulan sekali, pada data di bawah merupakan hasil pengujian pada bulan Juli 2023, yaitu

Tabel 4. Data Pemantauan Cerobong *Spray dryer* Bulan Juli Tahun 2023

Keterangan	Nilai Pengukuran	Satuan
Konsentrasi <i>PM2.5</i>	8,1	(mg/Nm <sup>3</sup> )
Suhu Gas Buang	30,4	(°C)
Kecepatan Gas Buang	38,17	(m/s)
Tinggi cerobong	15	(m)
Diameter cerobong	2	(m)
Luas Penampang	0,785 m <sup>2</sup>	(m <sup>2</sup> )

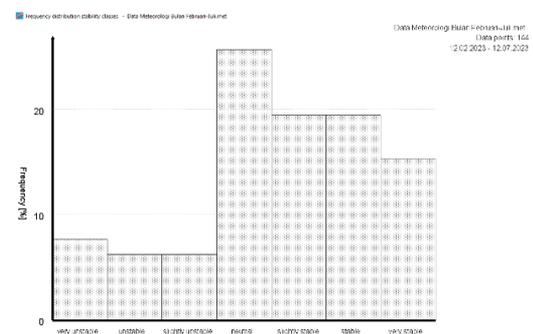
Berdasarkan Peraturan Menteri Negara LH No. 17 Tahun 2008 tentang Baku Mutu Emisi Sumber Tidak Bergerak Bagi Usaha dan/atau Kegiatan Industri Keramik hasil konsentrasi emisi *PM2.5* pada Cerobong *Spray dryer* sebesar 8,1 mg/Nm<sup>3</sup> berarti di bawah baku mutu yang ditetapkan yaitu 150 mg/Nm<sup>3</sup>. Nilai konsentrasi yang berada jauh dibawah baku mutu di pengaruhi oleh penggunaan bahan bakar yang menggunakan natural gas, dimana natural gas dalam proses pembakarannya tidak banyak melepaskan emisi gas *PM2.5*.

Tabel 5. Laju Emisi Cerobong *Spray dryer* Bulan Juli Tahun 2023

Keterangan	Nilai Pengukuran	Satuan
(C) Konsentrasi <i>PM2.5</i>	8,1	(mg/Nm <sup>3</sup> )
(Q) Laju Alir Emisi	29,96	(m <sup>3</sup> /s)
Op Hours	4398	(jam)
(E) Laju Emisi <i>PM2.5</i>	3.842,240	(kg/tahun)
Laju Emisi <i>PM2.5</i>	0,439	(kg/jam)

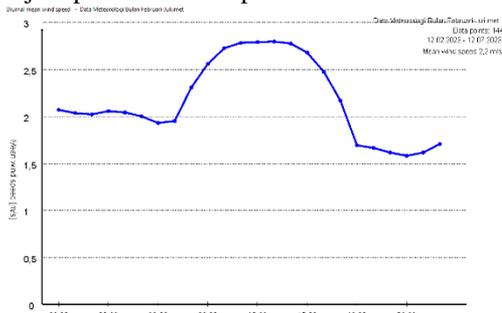
Nilai pemantauan emisi Cerobong *Spray dryer* dihitung menggunakan rumus Tata Cara Perhitungan Beban Emisi Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan RI Nomor 11 Tahun 2011 didapatkan nilai 0,439 kg/jam. Konversi laju emisi menjadi satuan kg/jam dilakukan untuk kemudian dimasukkan ke dalam *Software GRAL*.

### 3.3 Data Frekuensi Angin dan Grafik Kecepatan Angin



Gambar 3. Frekuensi Sebaran Angin

Berdasarkan data kecepatan angin dari frekuensi 0% - 20% paling banyak terjadi kecepatan angin yang neutral atau tidak banyak terjadi perubahan kecepatan.



Gambar 4. Grafik Kecepatan Angin

Berdasarkan grafik kecepatan angin didapatkan paling stabil pada pukul 00.00 - 06.00, kemudian mengalami kenaikan pukul 06.00 - 18.00 dan mengalami penurunan pada pukul 18.00 - 21.00. Kecepatan angin maksimum yang terdeteksi pada 2.8 m/s.

**3.4 Hasil Sebaran PM2.5 dari Pemodelan GRAL di Kawasan Domain**

Pada pengolahan *software* GRAL ini menggunakan data meteorologi yang berisi tanggal-bulan-tahun, pukul, kecepatan angin, arah angin, dan stabilitas angin. Kemudian data tersebut akan diubah formatnya menjadi *met files* agar dapat terbaca dalam GRAL. *Met file* merupakan suatu file yang dipisahkan oleh koma (,) setiap parameter datanya, seperti gambar dibawah ini untuk penulisan *met file*-nya.

Code	Blame	144 Lines (144 loc) · 5.04 KB
1	21.11.2022,08.00.00,1.02,270.44,08.1	
2	21.11.2022,09.00.00,1.51,298.82,08.12	
3	21.11.2022,10.00.00,1.08,310.05,08.1	
4	21.11.2022,11.00.00,2.51,317.27,08.05	
5	21.11.2022,12.00.00,2.07,339.53,08.0	
6	21.11.2022,13.00.00,3.07,323.09,7.93	
7	21.11.2022,14.00.00,3.18,324.50,7.88	
8	21.11.2022,15.00.00,3.1,331.44,57.83	
9	21.11.2022,16.00.00,2.97,340.00,57.84	
10	21.11.2022,17.00.00,2.45,346.94,57.80	
11	21.11.2022,18.00.00,1.97,351.01,57.95	
12	21.11.2022,19.00.00,1.76,356.95,08.03	
13	21.11.2022,20.00.00,1.66,356.76,08.11	
14	21.11.2022,21.00.00,1.55,352.77,08.18	
15	21.11.2022,22.00.00,1.53,345.10,08.2	
16	21.11.2022,23.00.00,1.58,340.31,08.19	
17	21.12.2022,08.00.00,2.01,300.46,08.01	
18	21.12.2022,09.00.00,2.61,308.54,08.03	
19	21.12.2022,10.00.00,2.40,211.8,08.0	
20	21.12.2022,11.00.00,2.62,222.46,07.96	
21	21.12.2022,12.00.00,2.91,226.96,07.89	
22	21.12.2022,13.00.00,3.25,228.24,07.8	
23	21.12.2022,14.00.00,3.61,227.37,07.72	
24	21.12.2022,15.00.00,3.85,226.04,07.66	
25	21.12.2022,16.00.00,3.42,223.43,07.66	
26	21.12.2022,17.00.00,3.12,218.91,07.71	
27	21.12.2022,18.00.00,2.42,213.69,07.79	
28	21.12.2022,19.00.00,2.07,209.56,07.87	

Gambar 3. Penulisan Data Meteorologi dalam Bentuk *Met File*

Kemudian dimasukkan gambar peta yang akan digunakan sebagai wilayah persebaran konsentrasi *PM2.5* dengan menentukan titik emisi, kawasan domain 1, dan kawasan domain 2. Peletakan titik emisi pada penelitian ini di PT X, kawasan domain 1 di SMAN 1 Ngoro dan kawasan domain 2 di wilayah wisata Sumber Dhuwur Sidorejo. Berikut merupakan area persebaran konsentrasi *PM2.5*, yaitu



Gambar 4. Area Persebaran Konsentrasi *PM2.5*

Kemudian perlu ditambahkan laju emisi pencemar (E) dan laju alir emisi (Q) dengan perhitungan sesuai Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor 11 Tahun 2021 tentang Baku Mutu Emisi Mesin dengan Pembakaran Dalam, yaitu

$$E = C \times Q \times 0,0036 \times (Op\ Hours) \dots\dots\dots (1)$$

$$Q = V \times A \dots\dots\dots(2)$$

Di mana :

- E = Laju Emisi Pencemar (kg/tahun)
- C = Konsentrasi terkoreksi (mg/Nm<sup>3</sup>)
- Q = Laju alir emisi (gas buang) volumetric (m<sup>3</sup>/s)
- 0,0036 = faktor konversi dari mg/s ke kg/jam
- Op Hours = Jam operasi selama 6 bulan
- V = Kecepatan alir (m/s)
- A = Luas penampang cerobong (m<sup>2</sup>)

Kemudian dihitung dengan data-data yang telah didapatkan dari pengujian laboratorium, yaitu

$$Q = V \times A$$

$$= 38,17\text{ m/s} \times 0,785\text{ m}^2$$

$$= 30\text{ m}^3/\text{s}$$

$$E = C \times Q \times 0,0036 \times (Op\ Hours)$$

$$= 0,1\text{ mg/Nm}^3 \times 30\text{ m}^3/\text{s} \times 0,0036 \times 4398\text{ jam}$$

$$= 58.3872\text{ kg/tahun}$$

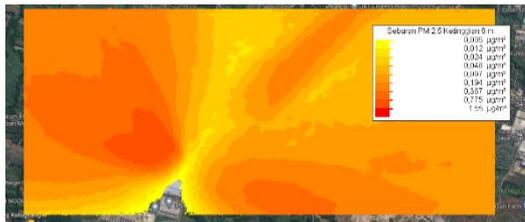
$$= 0,00665\text{ kg/jam}$$

Kemudian data laju emisi pencemar dimasukkan dalam *software* GRAL dengan 3 tingkatan tinggi konsentrasi, yaitu 3 m di atas tinggi titik emisi, 6 m di atas tinggi titik emisi, dan 10 m diatas tinggi titik emisi yang didapatkan



Gambar 5. Persebaran Konsentrasi *PM2.5* pada Ketinggian 3 m di Atas Permukaan Tanah

Hasil persebaran konsentrasi  $PM_{2.5}$  pada area sekitar wilayah pabrik keramik dengan ketinggian 3 m di atas permukaan tanah didapatkan konsentrasi sebaran  $PM_{2.5}$  tertinggi sebesar  $1,541 \mu\text{g}/\text{m}^3$  dan terendah  $0,006 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Konsentrasi sebaran terendah berada tepat di titik emisi (pabrik keramik) karena emisi  $PM_{2.5}$  tersebut terbawa angin dengan kecepatan tertentu sehingga nilai konsentrasi di titik emisinya terkecil.



**Gambar 6.** Persebaran Konsentrasi  $PM_{2.5}$  pada Ketinggian 6m di Atas Permukaan Tanah

Hasil persebaran konsentrasi  $PM_{2.5}$  pada area sekitar wilayah pabrik keramik dengan ketinggian 6 m di atas permukaan tanah didapatkan konsentrasi sebaran  $PM_{2.5}$  tertinggi sebesar  $1,55 \mu\text{g}/\text{m}^3$  dan terendah  $0,006 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Konsentrasi sebaran terendah berada tepat di titik emisi (pabrik keramik) karena emisi  $PM_{2.5}$  tersebut terbawa angin dengan kecepatan tertentu sehingga nilai konsentrasi di titik emisinya terkecil.



**Gambar 7.** Persebaran Konsentrasi  $PM_{2.5}$  pada Ketinggian 10m di Atas Permukaan Tanah

Hasil persebaran konsentrasi  $PM_{2.5}$  pada area sekitar wilayah pabrik keramik dengan ketinggian 10 m di atas permukaan tanah didapatkan konsentrasi sebaran  $PM_{2.5}$  tertinggi sebesar  $1,641 \mu\text{g}/\text{m}^3$  dan terendah  $0,006 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Konsentrasi sebaran terendah berada tepat di titik emisi (pabrik keramik) karena emisi  $PM_{2.5}$  tersebut terbawa angin dengan kecepatan tertentu sehingga nilai konsentrasi di titik emisinya terkecil.

Berdasarkan Gambar 5, Gambar 6 dan Gambar 7 didapatkan persebaran konsentrasi  $PM_{2.5}$  dengan penyebaran yang merata di seluruh area domain. Ketiga gambar tersebut dengan ketinggian yang berbeda-beda memiliki konsentrasi persebaran  $PM_{2.5}$  antara  $0 - 0,02 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Pada gambar 5 di atas, evaluasi distribusi  $PM_{2.5}$  dilakukan dengan memeriksa variasi warna yang mencerminkan variasi konsentrasi. Dalam penelitian ini, ada enam interval warna yang digunakan, mulai dari kuning hingga jingga, untuk menggambarkan konsentrasi  $PM_{2.5}$ . Nilai konsentrasi bervariasi dari ketinggian 3 m yang paling kekuningan hingga jingga bernilai  $0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $0,01 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , dan  $0,02 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Sedangkan, nilai konsentrasi pada ketinggian 6 m dan 10 m dari yang paling kekuningan hingga jingga bernilai

$0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $0,01 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $0,01 \mu\text{g}/\text{m}^3$  dan  $0,02 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Penyebaran  $PM_{2.5}$  yang tidak merata ini dikarenakan beberapa faktor, seperti arah angin, kecepatan udara, kelembapan udara, dan topografi wilayah. Arah angin akan menentukan arah di mana partikel  $PM_{2.5}$  akan diangkut oleh udara. Jika sumber pencemaran berada di satu arah tertentu dari lokasi pemantauan, arah angin akan menunjukkan sejauh mana area pemantauan akan terpapar oleh partikel  $PM_{2.5}$ . Arah angin dapat memengaruhi daerah mana yang akan terpapar secara langsung oleh partikel  $PM_{2.5}$ . Ini penting dalam penilaian risiko kesehatan manusia karena orang yang tinggal atau bekerja di arah angin yang berasal dari sumber emisi tertentu memiliki potensi lebih tinggi untuk terpapar.

Arah angin dapat berubah-ubah seiring perubahan cuaca dan pola angin. Pada saat tertentu, arah angin dapat memindahkan partikel  $PM_{2.5}$  dari satu daerah ke daerah lain, mengubah pola distribusi pencemaran udara. Partikel  $PM_{2.5}$  cenderung berada di lapisan atmosfer bawah yang lebih dekat dengan permukaan tanah. Arah angin dalam lapisan ini akan sangat memengaruhi pergerakan dan penyebaran partikel ini di daerah perkotaan dan permukiman manusia. Topografi dan geografi wilayah juga berpengaruh pada arah angin dan penyebaran  $PM_{2.5}$ . Bukit, lembah, dan penghalang alam dapat memengaruhi aliran angin dan mengarahkan partikel ke arah tertentu.

Berdasarkan simulasi yang telah dilakukan pada bulan November 2022 hingga Februari 2023 diketahui bahwa kawasan Ngoro Industri Persada terpapar  $PM_{2.5}$ . Menurut Ling *et al.*, (2020), bahwa dispersi PM cenderung dipengaruhi jarak bangunan pabrik terhadap tepi jalan. Dispersi PM di kawasan industri banyak dipengaruhi oleh kepadatan pabrik, ketinggian bangunan, dan lebar jalan antar pabrik. Konsentrasi dan persebaran dipengaruhi oleh kecepatan angin yang membawa partikulat dari sumber menuju tempat yang berbeda. Penelitian ini dapat memiliki keterbatasan dalam memperkirakan konsentrasi  $PM_{2.5}$  menggunakan parameter meteorologi, yaitu parameter meteorologi yang digunakan terlalu sedikit serta terdapat variabel lain yang dapat berpengaruh besar terhadap variasi konsentrasi  $PM_{2.5}$  di wilayah tersebut seperti kondisi iklim mikro dan pengaruh lalu lintas. Akan tetapi, pada penelitian ini telah diketahui bahwa model GRAL dapat digunakan untuk memodelkan  $PM_{2.5}$  di Kawasan Ngoro Industri Persada (NIP).

#### 4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan dalam Pemodelan  $PM_{2.5}$  menggunakan *Software Graz Lagrangian (GRAL) Model* pada industri keramik di Mojokerto dapat ditarik kesimpulan, yaitu :

1. Dari bulan November 2022 hingga Juli 2023 sebagai sampling didapatkan kecepatan angin paling besar bernilai 4.45 m/s pada pukul 09.00 tanggal 12 Juli 2023 sehingga berpotensi terjadi disperse. Sedangkan, kecepatan angin paling rendah bernilai 0.34 m/s pada pukul 23.00 tanggal 21 Maret 2023 sehingga berpotensi terjadi deposisi.
2. Arah angin dominan terjadi dari arah tenggara dan arah barat daya ke barat, kemudian sedikit terjadi di

arah utara dan selatan. Arah angin dari tenggara sering terjadi umumnya dengan kecepatan 2-3 m/s.

3. Pada pemodelan ini salah satu pabrik keramik di kawasan Ngoro Industri Persada (NIP) merupakan titik emisi dengan kawasan domain terdapat 2 titik yaitu di SMAN 1 Ngoro dan Wisata Sumber Dhuwur Sidorejo. Jarak antar kawasan domain sebesar 4926 m, dengan hasil penyebaran PM<sup>2.5</sup> merata dengan konsentrasi 0 µg/m<sup>3</sup> hingga 0,02 µg/m<sup>3</sup>
4. Penyebaran PM<sup>2.5</sup> yang tidak merata ini dikarenakan beberapa faktor, seperti arah angin, kecepatan udara, kelembapan udara, dan topografi wilayah.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Alviani, M., Studi, P., Lingkungan, T., Sipil, J. T., & Lingkungan, K. D. A. N. (2022). *Pemodelan pm 2,5 pada musim kemarau menggunakan software graz lagrangian model di kecamatan kota baru kota jambi*. 02, 5–9.
- Aminuddin, J., Kecepatan Angin Terhadap Evapotranspirasi Berdasarkan Metode Penman Di Kebun Stroberi Purbalingga, P., Fakultas Sains dan Teknologi, N., Ar-Raniry Banda Aceh, U., Aminuddin Prodi Fisika, J., & Purwokerto, U. (2016). Pengaruh Kecepatan Angin Terhadap Evapotranspirasi Berdasarkan Metode Penman Di Kebun Stroberi Purbalingga. *Elkawanie: Journal of Islamic Science and Technology*, 2(1), 21–28. [www.jurnal.ar-raniry.com/index.php/elkawanie](http://www.jurnal.ar-raniry.com/index.php/elkawanie)
- Arba, S. (2019). Kosentrasi Respirable Debu Particulate Matter ( Pm 2 , 5 ) Dan Gangguan Kesehatan Pada Masyarakat Di Pemukiman Sekitar PLTU Dust Respirable Concentration “ Particulate Matter ” ( Pm 2 . 5 ) And Health Disorders Communities In Settlement Around Electric Ste. *Kesehatan Lingkungan*, 9, 178–184.
- Darmawan, M. ., Suhendi, A., & Kirom, M. . (2023). Karakterisasi Alat Spray Drying Menggunakan Empat Tahap Pemanasan Yang Diimplementasikan Pada Larutan Pvp. *E-Proceeding of Engineering*, 10(1), 58–63.
- Fadholi, A., Pangkalpinang, S. M., Bandara, J., Amir, D., & Pinang, P. (2013). Analisis Data Arah Dan Kecepatan Angin Landas Pacu (Runway) Menggunakan Aplikasi Windrose Plot (Wrplot). *Jurnal Ilmu Komputer*, 9(2), 84–91. <http://www.wcc.nrcs.usda.gov>
- Hendrasarie, N. (2011). Dengan Metoda Biopile Bioremediation of Kerosene Contaminated Land Using Biopile Method. *Purifikasi*, 12, 29–38.
- Hendrasarie, N., & Maria, S. H. (2021). Combining grease trap and Moringa Oleifera as adsorbent to treat wastewater restaurant. *South African Journal of Chemical Engineering*, 37, 196–205. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2021.05.004>
- Hendrasarie, N., & Swandika, I. D. A. (2020). Resistance of Loading Loads in Surabaya River and Its Branch with Qual2KW Model. *Journal of Physics: Conference Series*, 1569(4), 8–14. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1569/4/042096>
- Hendrasarie, N., & Trilita, M. N. (2019). Removal of nitrogen phosphorus in food wastewater treatment by the Anaerobic Baffled Reactor (ABR) and Rotating Biological Contactor (RBC). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 245(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/245/1/012017>
- Huda, S. (2020). Efek Evaporasi Dan Suhu Pengerinan Spraydrying Terhadap Karakteristik Fisik Dan Kimia Whey Bubuk. *Jurnal Teknologi Hasil Pertanian*, 13(2), 84. <https://doi.org/10.20961/jthp.v13i2.42716>
- Mardiawan, A. R. (2020). *Pengaruh Temperatur Inlet Udara Dan TEKANAN UDARA NOZZLE TERHADAP DISTRIBUSI TEMPERATUR DAN EFISIENSI TERMAL SPRAY DRYER*.
- Novirsa, R., & Achmadi, U. F. (2012). Analisis Risiko Pajanan PM<sub>2,5</sub> di Udara Ambien Siang Hari terhadap Masyarakat di Kawasan Industri Semen. *Kesmas: National Public Health Journal*, 7(4), 173. <https://doi.org/10.21109/kesmas.v7i4.52>
- Pongratz, T., Öttl, D., & Uhrner, U. (2012). *Documentation of the Lagrangian Particle Model GRAL (Graz Lagrangian Model)*. April, 111.
- Putri, A. O., Mentari, I. A., Try Julyantiya, R., Yuliati, S., & Dewi, E. (2021). Rancang Bangun Alat Tipe Spray Dryer Untuk Proses Pengerinan Susu Bubuk Berbasis Jagung Manis (Zea Mays Saccharata). *Jurnal Kinetika*, 12(03), 31–37. <https://jurnal.polsri.ac.id/index.php/kimia/index>
- Qothrunada, D. T., Satria, H., & Putra, Y. R. W. (2022). Analisis Diagram Windrose di Konawe Selatan. *Jurnal Sains Riset (JSR)*, 12(1), 22–26. <https://journal.unigha.ac.id/index.php/JSR/article/download/541/553>
- Regia, R. A., Bachtiar, V. S., & Solihin, R. (2021). Analisis Risiko Kesehatan Akibat Paparan Particulate Matter 2,5 (PM<sub>2,5</sub>) Dalam Rumah Tinggal di Perumahan X Kawasan Industri Semen. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 19(3), 531–540. <https://doi.org/10.14710/jil.19.3.531-540>
- Sibarani, R. M., Belgaman, H. A., Athoillah, I., & Wirahma, S. (2021). Analisis Hubungan Parameter Cuaca Terhadap Konsentrasi Polutan (Pm<sub>2.5</sub> Dan Co) Di Wilayah Jakarta Selama Periode Work From Home (Wfh) Maret 2020. *Jurnal Sains & Teknologi Modifikasi Cuaca*, 22(2), 85–94. <https://doi.org/10.29122/jstmc.v22i2.4637>
- Trilita, M. N., Hendrasarie, N., & Wahjudijanto, I. (2016). Removal of organic load in communal wastewater by using the six stage Anaerobic Baffle Reactor (ABR). *MATEC Web of Conferences*, 58. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20165801023>
- Trilita, M. N., Safeyah, M., & Hendrasarie, N. (2018). CFD Modelling of a Highly Viscous Liquid Film on Rotating Vertically Disk. *Journal of Physics: Conference Series*, 953(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/953/1/012219>
- Umardani, Y., & Bukhori, M. (2007). Karakterisasi Material Ball Mill Pada Proses Pembuatan Semen Dengan. *Rotasi*, 9(4), 1–4.