



Identifikasi Sumber *Particulate Matter* (PM) 2.5 di Sorong Berdasarkan *READY Hysplit Backward Trajectory*

Identification of Particulate Matter (PM) 2.5 Sources in Sorong Based on READY Hysplit Backward Trajectory

Shelin Melinda, Nuryanto*

Stasiun Pemantau Atmosfer Global Puncak Vihara Klademak Sorong, Jl. Sungai Remu Km.8 Malanu, Malaingke, Sorong Utara, Kota Sorong, Papua – Barat 98412

*Email: nuryanto.ctgen@gmail.com

Naskah Masuk: 24 November 2022 | Naskah Diterima: 28 Mei 2023 | Naskah Terbit: 10 Juni 2023

Abstrak. Salah satu polusi udara yang menjadi perhatian dunia adalah partikulat yang berukuran $\geq 2,5 \mu\text{m}$ atau PM 2.5. Peningkatan konsentrasi PM 2.5 dapat berdampak pada sektor kesehatan dan lingkungan. Faktor meteorologi seperti angin, suhu, hujan, dan kelembaban mempengaruhi konsentrasi PM 2.5 di udara. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi sumber PM2.5 dan menentukan hubungan faktor meteorologi dengan distribusi temporal PM 2.5 di Sorong menggunakan data periode September 2021 – September 2022 yang masuk dalam kategori baik ($0.1 - 12 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Secara umum peningkatan konsentrasi PM2.5 di Kota Sorong terjadi 2 puncak dalam sehari yaitu pada pagi hari yakni 01 UTC atau 10:00 WIT dan malam hari yaitu 10 - 13 UTC atau pukul 19:00 – 21:00 WIT. Penurunan konsentrasi PM 2.5 terjadi pada bulan Agustus saat curah hujan 574.7 mm. Selain itu faktor meteorologi yang mempengaruhi penurunan konsentrasi PM 2.5 adalah kecepatan angin. Selain itu, suhu dan kelembapan udara juga berpengaruh pada konsentrasi PM 2.5. Sebagai contoh, pada saat kondisi suhu 23.0°C dan RH 82% konsentrasi PM 2.5 meningkat menjadi $4.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Namun saat suhu 29.0°C dan RH 70% terjadi penurunan konsentrasi PM 2.5 menjadi sebesar $3.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Untuk sebaran polutan PM 2.5 menggunakan model HYSPLIT memperlihatkan arah polutan berasal dari Laut Maluku menuju Sorong pada nilai maksimum $37 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Kata Kunci: PM 2.5, Meteorologi, HYSPLIT, Lingkungan

Abstract. One of the air pollutions that is of concern to the world is particulate matter measuring $\geq 2.5 \mu\text{m}$ or PM 2.5. An increase in PM 2.5 concentrations could have an impact on the health and environment sectors. Meteorological factors such as wind, temperature, rain and humidity affect the concentration of PM 2.5 in the air. This study aims to identify sources of PM2.5 and determine the relationship between meteorological factors and the temporal distribution of PM 2.5 in Sorong Regency using data for the period September 2021 - September 2022 which is included in the good category ($0.1 - 12 \mu\text{g}/\text{m}^3$). In general, there are 2 peaks of PM2.5 concentrations in Sorong City, namely in the morning, namely at 01 UTC or 10.00 WIB and at night, namely at 10 - 13 UTC or 19.00 - 21.00 WIB. The decrease in PM 2.5 concentration occurred in August when the rainfall was 574.7 mm. In addition, the meteorological factor that affects the decrease in PM 2.5 concentration is wind speed. In addition, air temperature and humidity also affect PM 2.5 concentrations. For example, at 23.0°C and 82% RH, the concentration of PM 2.5 increases to $4.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. However, at 29.0°C and 70% RH, the concentration of PM 2.5 decreased to $3.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. For the distribution of PM 2.5 pollutants using the HYSPLIT model, it shows the direction of pollutants originating from the Maluku Sea towards Sorong with a maximum value of $37 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Keywords: PM 2.5, Meteorology, HYSPLIT, Environment

Pendahuluan

Saat ini pembahasan lingkungan mengenai polusi udara menarik perhatian dunia. Salah satunya yaitu partikel atau polutan halus di atmosfer berukuran $\geq 2.5 \mu\text{m}$ yang sering disebut PM 2.5 (*particulate matter*)^[1]. Kontributor dominan konsentrasi PM 2.5 bersumber dari penggunaan energi dan pembakaran biomassa^[2]. Pada wilayah perkotaan PM 2.5 berasal dari emisi gas buang kendaraan bermotor, kegiatan pabrik^[3], dan adanya pertumbuhan urbanisasi yang menghasilkan peningkatan penggunaan energi^[4]. Berdasarkan laporan WHO (2003)^[5] peningkatan PM berdampak terhadap kondisi lingkungan, namun ada hal yang lebih penting yaitu mengenai kesehatan manusia. Dari beberapa penelitian mengenai dampak kesehatan terhadap PM yaitu penyakit pernapasan, asma, dan beberapa penyakit pada paru – paru^[6]. Menurut Yoga dan Didin (2021)^[7] sekitar 3,3 juta orang di seluruh dunia meninggal pada tahun 2010 dikarenakan menghirup debu-debu kecil atau partikulat, kondisi ini diprediksi akan berlipat ganda pada tahun 2050.

Penyumbang emisi atau polutan didominasi oleh antropogenik dan faktor meteorologi memberikan pengaruh yang kuat pada PM jangka panjang^[8]. Kondisi meteorologi memiliki pengaruh pada konsentrasi PM sebagian besar dapat menyebar, menumpuk, dan pengurangan polutan^[9]. Dalam penelitian yang dilakukan oleh Gui dkk (2019)^[10], unsur meteorologi menyumbang 48 % dari nilai PM di Cina Timur selama periode tahun 1998 – 2016. Penelitian yang dilakukan oleh Chen dkk (2019)^[11] menunjukkan bahwa variasi meteorologi berkontribusi sekitar 20% dari pengurangan PM_{2.5} di Beijing dari 2013 hingga 2017. Dari beberapa penelitian sebelumnya kondisi PM dapat dipengaruhi oleh beberapa unsur meteorologi seperti angin, suhu, hujan, dan kelembaban^[12]. Angin memiliki pengaruh terhadap arah dan nilai dari partikulat di suatu wilayah. Dimana kecepatan angin menentukan seberapa jauh partikulat tersebut, kemudian arah angin akan menentukan arah sumber dan daerah yang terpapar^{[7], [13]}.

Kondisi suhu berkorelasi dengan polutan karena inversi suhu menghambat transportasi udara dekat permukaan yang tercemar ke atmosfer sehingga menyebabkan nilai PM 2.5 tertinggi terjadi pada suhu rendah^[14]. Saat kondisi atmosfer lembab partikel atau polutan menyerap uap air yang nantinya dapat menggumpal, hal ini akan menyebabkan terjadinya proses sedimentasi yang cepat pada polutan tersebut^{[14], [15]}. Karena itu konsentrasi PM 2.5 berkurang ketika RH (*Relative Humidity*) tinggi, ini sesuai dengan penelitian para peneliti^{[16], [17]} dimana mereka mengemukakan bahwa RH yang melebihi 70 % akan mempengaruhi kondisi PM 2.5. Curah hujan memiliki dampak pada pengurangan partikel kasar sementara memiliki sedikit efek pada partikel halus^[18]. Dalam penentuan arah dari sumber polutan dan sejauh mana kondisi PM_{2.5} pada penelitian^[9] menggunakan model *Hybrid Single – Particle Lagrangian Integrated Trajectory* (HYSPLIT). Model HYSPLIT digunakan untuk memperkirakan *forward* trayektori maupun *backward* trajectory dari suatu model massa udara^[19].

Penelitian ini bertujuan untuk menggambarkan kondisi PM 2.5 selama periode September 2021 - September 2022 di Wilayah Sorong Papua Barat. Kemudian mengetahui seberapa besar dampak faktor meteorologi (angin, suhu, hujan, dan kelembaban) pada konsentrasi PM 2.5. Penggunaan model HYSPLIT untuk mengetahui sumber polutan di Sorong Papua Barat. Diharapkan hasil penelitian ini dapat memberi masukan kepada instansi terkait dalam pengambilan kebijakan terkait mitigasi dan peningkatan kualitas udara di Sorong Papua Barat.

Metodologi Penelitian

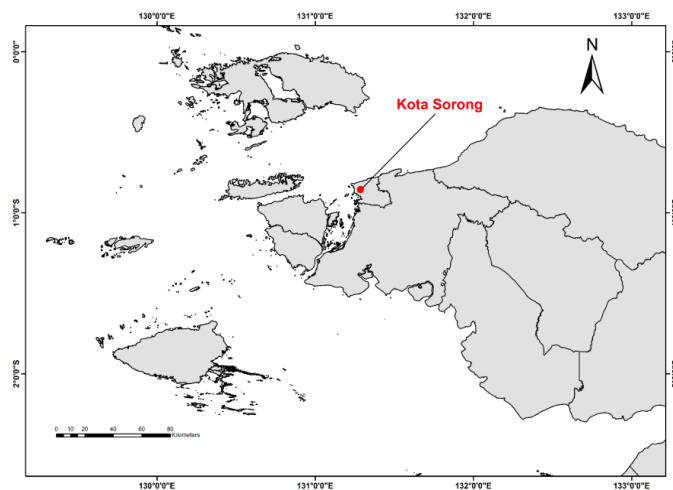
Penelitian dilakukan di Stasiun Pemantau Atmosfer Global Sorong, Kota Sorong dengan titik koordinat -0.88 LS dan 131.30 BT (Gambar 1). Data yang digunakan yaitu data *Particulate Matter* 2.5 dari peralatan *Beta Attenuation Monitor* (BAM)-1020, data meteorologi berupa suhu, kelembaban, arah dan kecepatan angin yang diperoleh dari AWS (*Automatic Weather Station*) pada bulan September 2021 – September 2022. Pada penelitian ini juga menggunakan data curah hujan observasi harian dari bulan



Januari – September 2022, sedangkan untuk bulan November dan Desember 2021 menggunakan data curah hujan AWS, dikarenakan ketersediaan data AWS yang minim untuk curah hujan bulan September dan Oktober tidak tersedia.

Pertama dilakukan pengolahan data konsentrasi PM_{2.5} menggunakan *Microsoft Excel* untuk mendapatkan pola konsentrasi harian dan bulanan, kemudian data konsentrasi tersebut disandingkan dengan data curah hujan untuk melihat pengaruh curah hujan terhadap variasi konsentrasi PM_{2.5}. Tahap kedua dilakukan pengolahan distribusi temporal konsentrasi PM_{2.5} dan data meteorologi (suhu, kelembaban, dan kecepatan angin) akan dianalisis dalam frekuensi per jam atau disebut juga *diurnal variation* dengan tujuan untuk melihat bagaimana fluktuasi konsentrasi PM_{2.5} yang terjadi di Kota Sorong serta kapan terjadinya waktu puncak konsentrasi dan bagaimana pengaruh kondisi meteorologi terhadap konsentrasi PM_{2.5}. Metode yang digunakan untuk menganalisis hubungan keeratan atau korelasi antara konsentrasi PM_{2.5} dengan kondisi meteorologi yaitu menggunakan analisis korelasi *spearman*, untuk mengetahui arah, hubungan, kuat hubungan, dan signifikansi hubungan antar dua variabel atau lebih ^{[20], [21]}. Pengolahan data korelasi dilakukan menggunakan *software SPSS*.

Selanjutnya melakukan pemodelan dengan Model *HYSPPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory)*, yang digunakan untuk melihat lintasan partikel udara yang menuju suatu wilayah. Data model *HYSPPLIT* diperoleh dari NOAA Air Resources Laboratory (ARL) <https://www.ready.noaa.gov>. Model ini akan mengidentifikasi wilayah yang berpotensi menjadi sumber pencemaran partikulat terhadap Kota Sorong dan sekitarnya. Model *HYSPPLIT transport* merupakan model sistem yang dapat digunakan untuk menghitung dan memperkirakan trayektori parsel udara seperti transportasi, transportasi kimia, dispersi dan simulasi deposisi ^[19]. Adapun waktu yang dipilih dalam model ini yaitu nilai konsentrasi PM_{2.5} paling maksimum selama periode September 2021 – September 2022 melalui data *time series*.



Gambar 1. Lokasi Penelitian (Sumber: shp BIG)

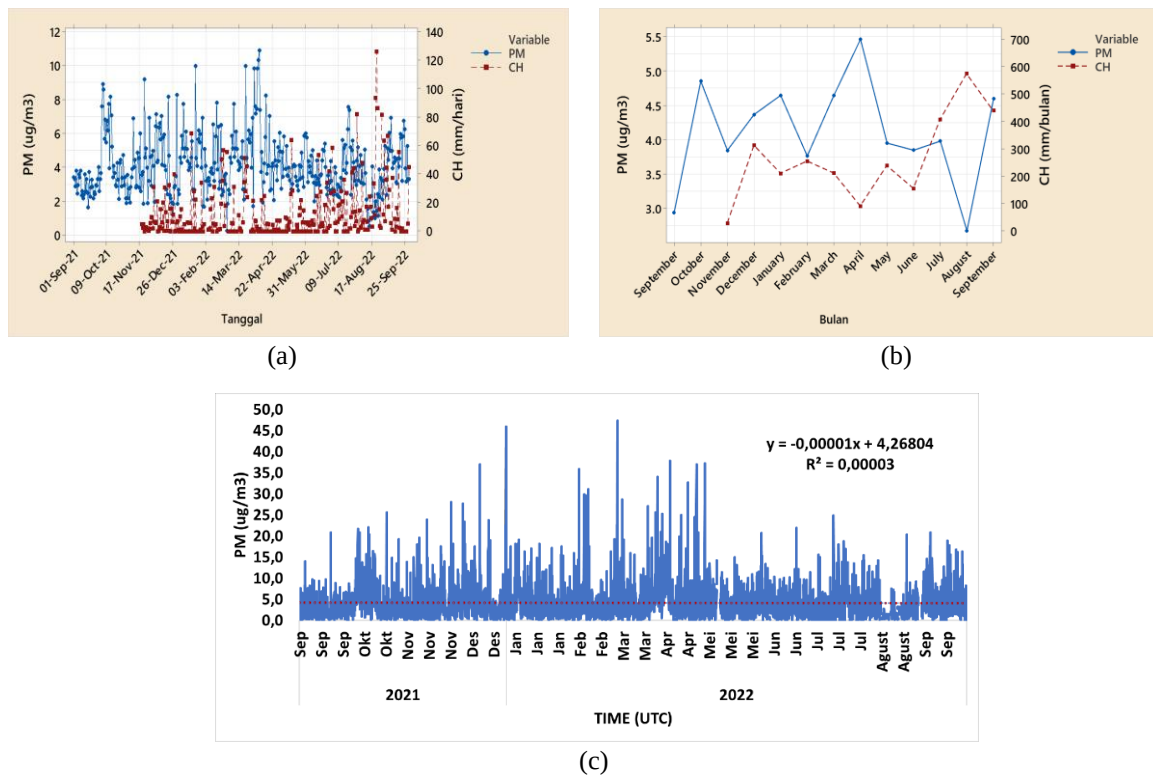
Hasil dan Pembahasan

Analisis Pola Konsentrasi PM 2.5 dan Curah Hujan

Berdasarkan hasil pengolahan data partikulat PM_{2.5} di Kota Sorong periode September 2021 – September 2022 yang dapat dilihat pada Gambar 1a dan 1b, secara umum rata – rata konsentrasi PM_{2.5} harian maupun bulanan masih dalam kategori baik. Hal ini dapat dilihat bahwa nilai partikulat masih berkisar 0.1 – 12 ug/m³ untuk rata – rata harian dan 0.1 – 6 ug/m³ untuk rata – rata bulanan. Menurut Peraturan Pemerintah (PP) No. 41 Tahun 1999 mengenai nilai baku mutu Pengendalian Pencemaran Udara, nilai baku mutu konsentrasi PM_{2.5} selama pengukuran 24 jam yaitu 65 µg/m³. Jika dilihat dari

polanya, nilai konsentrasi rata – rata harian maupun bulanan cenderung bervariasi atau berfluktuasi, dengan nilai konsentrasi maksimum rata – rata harian yaitu 10.88 ug/m³ pada tanggal 07 April 2022, sedangkan rata – rata bulanan maksimum terjadi pada bulan April yaitu 5.5ug/m³ dengan jumlah curah hujan 90.3mm dan minimum terjadi pada bulan Agustus yaitu 2.8ug/m³ dengan jumlah curah hujan 574.7mm.

Pola konsentrasi partikulat secara umum berbanding terbalik dengan nilai curah hujan, ketika terjadi peningkatan curah hujan nilai konsentrasi cenderung turun, dan sebaliknya pada saat curah hujan rendah nilai konsentrasi cenderung tinggi. Konsentrasi PM_{2.5} sepanjang hari masih dalam kondisi baik, dikarenakan hampir setiap hari Kota Sorong terdapat hujan, secara teori curah hujan memiliki dampak besar terhadap konsentrasi partikel. Penelitian ini sejalan dengan penelitian ^[18], dimana pada penelitiannya konsentrasi PM₁₀ dan PM_{2.5} turun signifikan saat curah hujan tinggi selama empat hari di Kota Shijiazhuang, Cina. Pada saat hujan, kondisi kelembaban cukup tinggi dan konsentrasi PM_{2.5} cenderung rendah, hal ini disebabkan karena tingginya curah hujan yang menyebabkan adanya proses *washing out* atau pencucian polutan ^[19].



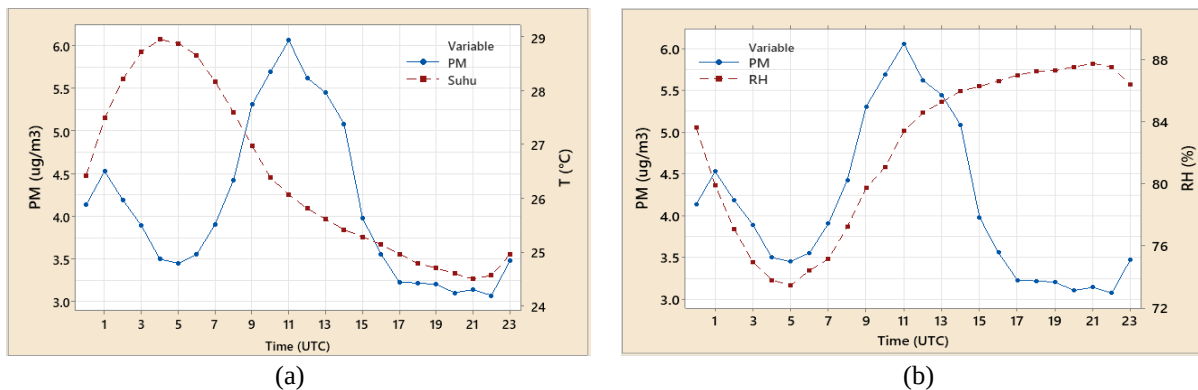
Gambar 2. (a). Rata – rata harian PM_{2.5} dan Curah Hujan harian, (b). Rata – rata bulanan PM_{2.5} dan Curah Hujan bulanan dan (c). *Time Series* dan *Trend* Konsentrasi PM_{2.5} periode September 2021 – September 2022

Berdasarkan Gambar 2(c) diketahui bahwa selama periode September 2021 – September 2022 konsentrasi PM_{2.5} di Kota Sorong cenderung mengalami penurunan *trend*, hal ini dapat dilihat dari nilai *trend* negatif sebesar -0.00001 dengan nilai R^2 sebesar 0.00003. Ini diartikan bahwa konsentrasi PM_{2.5} di Kota Sorong akan mengalami penurunan 0.00001 setiap harinya sehingga dalam satu (1) tahun lokasi tersebut akan mengalami penurunan konsentrasi sebesar 0.001 setiap tahunnya. Akan tetapi penurunan *trend* pada periode ini tidak bisa diartikan secara mutlak di masa depan konsentrasi partikulat akan turun terus menerus, hal ini dikarenakan semakin meningkatnya jumlah populasi dan tingginya mobilitas penduduk maka konsentrasi partikulat bisa terus meningkat. Secara umum peningkatan konsentrasi PM_{2.5} di Kota Sorong terjadi pada pagi hari yakni 01 UTC atau 10:00 WIT dan malam hari yaitu 10 –

13 UTC atau pukul 19:00 – 21:00 WIT, dengan puncak partikulat yaitu pada pukul 11 UTC atau 20:00 WIT.

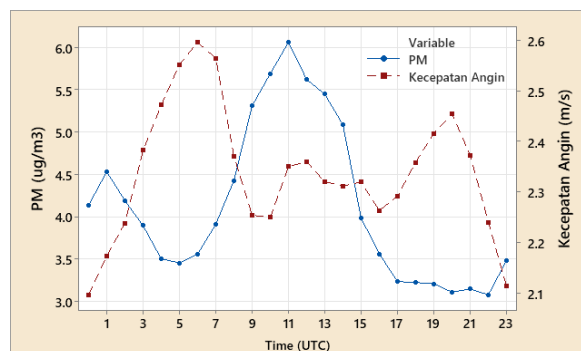
Analisis Pengaruh Kondisi Meteorologi terhadap Konsentrasi PM_{2.5}

Peningkatan jumlah partikulat juga tidak terlepas dari adanya pengaruh meteorologis. Pada penelitian ini data meteorologi yang digunakan yaitu temperatur, kelembaban, arah dan kecepatan angin rata – rata per jam selama periode September 2021 – September 2022. Pada umumnya di Kota Sorong terjadi peningkatan konsentrasi PM_{2.5} sebanyak dua kali puncak yaitu pada pagi dan malam hari. Pada pagi hari pukul 01 UTC (10:00 WIT) terjadi peningkatan nilai konsentrasi PM_{2.5} sebesar 4.5ug/m³ dengan temperatur sebesar 23.0°C dan RH 82%, kemudian terjadi penurunan konsentrasi PM_{2.5} sebesar 3.5ug/m³ dengan nilai temperatur yang cukup tinggi yaitu 29.0°C dan RH 70% pada pukul 05 UTC (14:00 WIT). Sedangkan pada malam hari peningkatan konsentrasi mulai terjadi pada pukul 07 UTC (16.00 WIT) dan pada pukul 11 UTC (20:00 WIT) terjadi peningkatan nilai konsentrasi PM_{2.5} sebesar 6.0ug/m³ dengan nilai temperatur yang cenderung turun yaitu berada pada suhu 25.0°C dan RH 82%. Menurut penelitian Yoga dan Didin (2021) ^[7] peningkatan konsentrasi pada sore hari tersebut disebabkan oleh kegiatan antropogenik yang meningkat, dimana biasanya masyarakat mulai melakukan mobilitas untuk menuju ke rumah setelah melakukan aktivitas di luar rumah.



Gambar 3. (a). Rata – rata Per Jam Konsentrasi PM_{2.5} dan Suhu dan (b). Rata – rata Per Jam Konsentrasi PM_{2.5} dan Kelembaban periode September 2021 – September 2022

Berdasarkan Gambar 3a dan 3b dapat diketahui bahwa hubungan antara temperatur dan kelembaban umumnya linier, artinya pada saat temperatur turun maka nilai konsentrasi PM_{2.5} cenderung naik, dan sebaliknya pada saat temperatur naik maka konsentrasi PM_{2.5} cenderung turun. Begitu juga terhadap kelembaban udara, pada saat kelembaban tinggi, konsentrasi PM_{2.5} cenderung turun dan sebaliknya pada saat kelembaban udara turun maka umumnya konsentrasi PM_{2.5} cenderung naik. Hal ini sejalan dengan penelitian dari ^[19], dimana pada penelitiannya dikatakan bahwa terdapat hubungan yang erat antara faktor meteorologi temperatur dan kelembaban udara terhadap naik maupun turunnya konsentrasi PM_{2.5}.



Gambar 4. Rata – rata Per Jam Konsentrasi PM_{2.5} dan Kecepatan Angin

Pada Gambar 4 menunjukkan bagaimana pengaruh kecepatan angin terhadap rata – rata per jam konsentrasi PM_{2.5} selama periode September 2021 – September 2022, secara umum kecepatan angin di Kota Sorong sepanjang hari cenderung tetap atau tidak terlalu bervariasi dengan kecepatan angin rata – rata sebesar 2m/s. Umumnya kecepatan angin akan meningkat pada Pagi dan Sore hari dengan kecepatan angin rata – rata 2.5m/s, sedangkan pada Malam hari kecepatan angin cenderung turun atau tetap. Berdasarkan pola yang dapat dilihat pada Gambar 4, kecepatan angin dapat mempengaruhi nilai konsentrasi PM_{2.5}, dimana pada saat kecepatan angin meningkat, konsentrasi PM_{2.5} cenderung turun yaitu pada pukul 01 UTC – 05 UTC (10:00 WIT – 14:00 WIT), dan pukul 17 UTC – 22 UTC (16:00 WIT – 02:00 WIT). Konsentrasi PM_{2.5} terus meningkat pada sore hari sampai pukul 20:00 WIT. Menurut penelitian Yoga dan Didin (2021)^[7], konsentrasi partikulat terus meningkat hingga malam hari dikarenakan pada saat matahari terbenam kondisi udara cenderung stabil sehingga tidak ada lagi proses difusi maupun dispersi pada saat itu, saat kondisi cuaca stabil massa udara yang lebih panas akan membentuk *nocturnal boundary layer* (NBL).

Tabel 1. Korelasi Konsentrasi PM_{2.5} dengan Kondisi Meteorologi

	Parameter	Suhu	Kelembaban	Kec. Angin	PM _{2.5}
Suhu	Correlation Coefficient	1.000	-.991**	0.253	.435*
	Sig. (2-tailed)		0.000	0.232	0.034
	N	24	24	24	24
Kelembaban	Correlation Coefficient	-.991**	1.000	-0.282	-.444*
	Sig. (2-tailed)	0.000		0.181	0.030
	N	24	24	24	24
Kec. Angin	Correlation Coefficient	0.253	-0.282	1.000	-0.285
	Sig. (2-tailed)	0.232	0.181		0.178
	N	24	24	24	24
PM _{2.5}	Correlation Coefficient	.435*	-.444*	-0.285	1.000
	Sig. (2-tailed)	0.034	0.030	0.178	
	N	24	24	24	24

** . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

* . Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

Koefisien korelasi antara konsentrasi polutan dan kondisi meteorologi dapat digunakan untuk menunjukkan bagaimana variasi antara polutan dan pengaruh kondisi meteorologi pada difusi mereka^{[22], [23]}. Berdasarkan hasil koefisien korelasi rata – rata per jam konsentrasi PM_{2.5} dan parameter cuaca yang dihitung menggunakan analisis SPSS pada Tabel 1, menunjukkan adanya korelasi yang baik antara konsentrasi PM_{2.5} terhadap kondisi meteorologi selama periode September 2021 – September 2022, walaupun nilai korelasi tidak signifikan atau kurang dari 1 akan tetapi parameter cuaca (Tabel 1) masih berkontribusi terhadap konsentrasi PM_{2.5} di Kota Sorong.

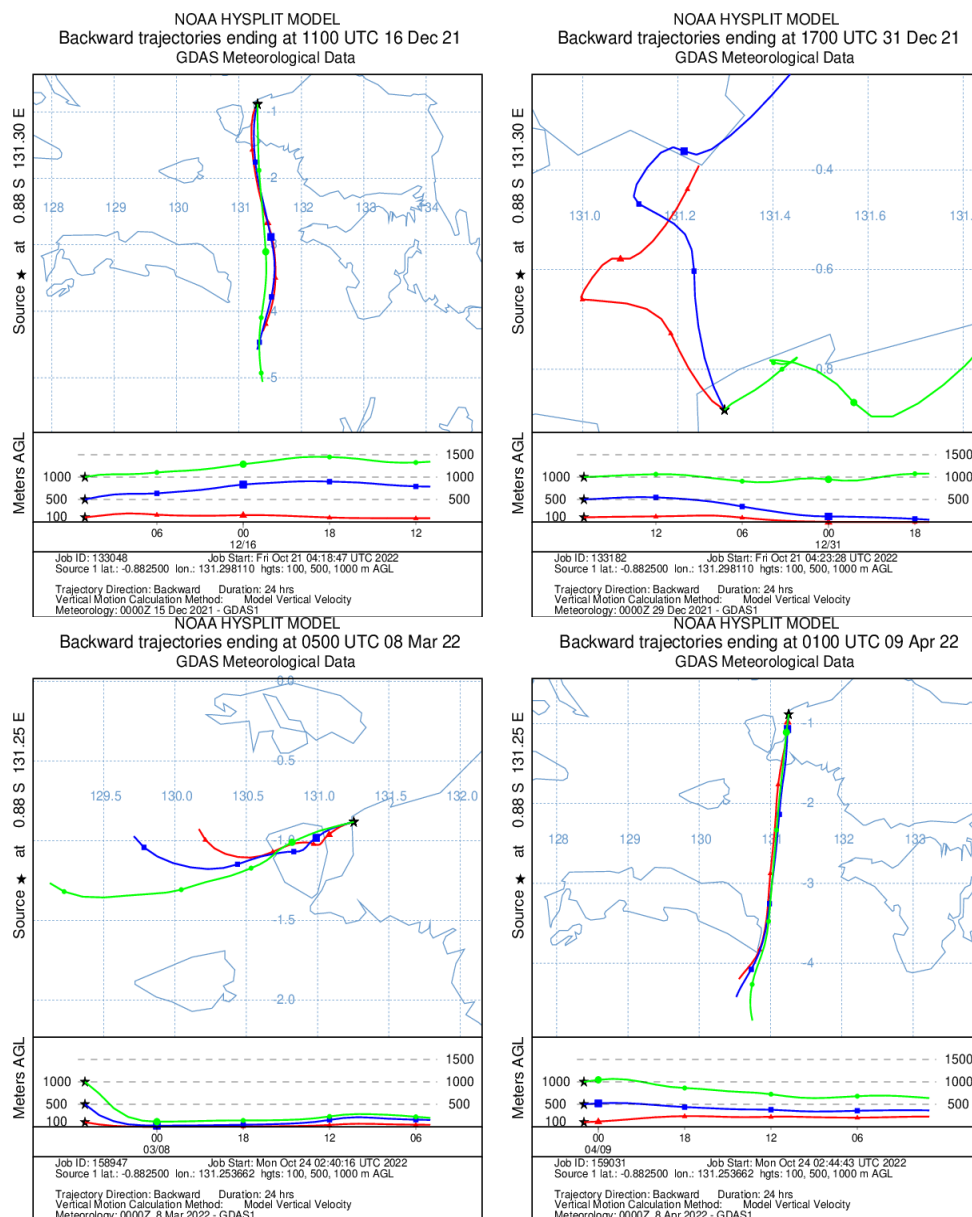
Analisis HYSPLIT Model

Pada Gambar 5 disajikan hasil dari keluaran model *HYSPLIT Backward trajectory* polutan di Kota Sorong. Data model *HYSPLIT* digunakan untuk mengetahui arah sebaran polutan maupun *trajectory* dari sumber polutan, penelitian ini polutan yang dimaksud yaitu konsentrasi PM_{2.5}. Dalam penelitian ini, data model yang dipilih merupakan nilai konsentrasi PM_{2.5} maksimum atau nilai konsentrasi tertinggi selama periode September 2021 – September 2022 (Gambar 2) dengan titik koordinat -0.88 LS, 131.30 BT sebagai pusat koordinat Kota Sorong untuk mensimulasikan lintasan mundur polutan. Ketinggian simulasi awal model adalah 100, 500 dan 1000 meter di atas permukaan laut dengan lintasan mundur selama 24 jam.

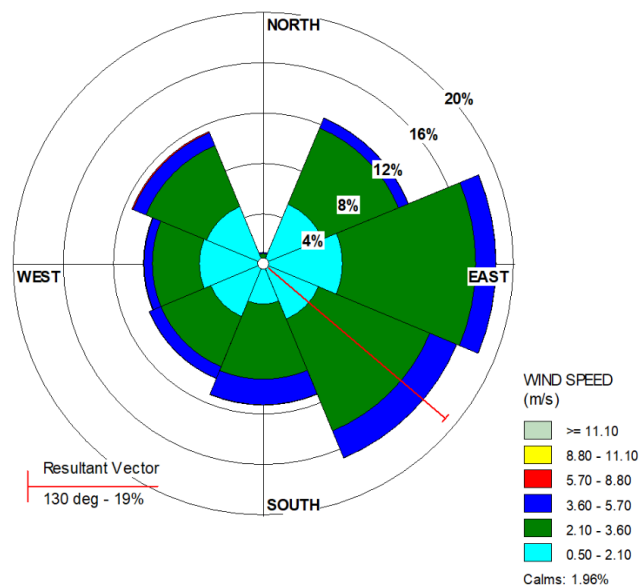
Pada tanggal 16 Desember 2021 pukul 11 UTC nilai konsentrasi PM_{2.5} sebesar 37.0 ug/m³ memperlihatkan arah polutan berasal dari Laut Maluku kemudian bergerak menuju pulau – pulau kecil



di Prov. Maluku, dan terus bergerak menuju Kota Sorong dan berdasarkan data kecepatan angin saat itu berkisar 4 m/s dengan arah angin dari Selatan. Pada tanggal 31 Desember 2021 pukul 17 UTC konsentrasi PM_{2.5} yaitu 45.9 ug/m³ memperlihatkan arah polutan berasal dari beberapa arah, pada lapisan 100 mdpl polutan berasal dari wilayah Wasai bagian Selatan (Urbinasopan), lalu pada lapisan 500 mdpl polutan berasal dari Samudera Pasifik, sedangkan pada lapisan 1000 mdpl polutan berasal dari Kabupaten Sorong dan terus bergerak menuju Kota Sorong dan berdasarkan data kecepatan angin saat itu yakni 2 m/s dengan arah angin dari Timur. Pada tanggal 08 Maret 2022 pukul 05 UTC dengan nilai polutan yaitu 47.4 ug/m³ memperlihatkan bahwa polutan berasal dari Kepulauan Raja Ampat dan polutan terus bergerak menuju Kota Sorong dan berdasarkan data kecepatan angin saat itu yakni 2 m/s dengan angin dari arah Barat Laut, sedangkan pada tanggal 09 April 2022 pukul 01 UTC dengan nilai konsentrasi yaitu 37.9 ug/m³ memperlihatkan bahwa pada lapisan 500mb sampai dengan 1000 mb polutan berasal dari Prov. Maluku bagian Timur, kemudian bergerak melewati perairan di Laut Seram dan menuju Kota Sorong dengan data kecepatan angin saat itu 3 m/s dengan angin dari arah Selatan.



Gambar 5. Hasil luaran Model Hysplit Backward Trayektori polutan di Kota Sorong pada saat nilai konsentrasi PM_{2.5} Maksimum Periode September 2021 – September 2022 pada ketinggian 100 mdpl, 500 mdpl dan 1000 mdpl.



Gambar 6. Arah dan Kecepatan Angin Periode September 2021 – September 2022

Berdasarkan Gambar 6, hasil pemodelan arah dan kecepatan angin (*wind rose*) selama periode September 2021 – September 2022 menunjukkan bahwa arah angin di Kota Sorong pada umumnya bergerak dari segala arah akan tetapi arah angin yang paling dominan atau sering terjadi di Kota Sorong yaitu dari Timur dan Tenggara dengan kecepatan angin rata – rata 0 – 5.70 m/s. Secara umum pergerakan polutan pada Gambar 6 menunjukkan bahwa trayektori partikulat di Kota Sorong tidak bergerak lurus sesuai dengan arah angin melainkan terlebih dahulu mengalami belokan dari arah tertentu melalui daratan sebelum akhirnya menuju Kota Sorong. Jika berdasarkan sumbernya, pencemaran udara berasal dari sumber – sumber alam maupun aktivitas manusia baik di daratan, udara maupun lautan. Menurut Simarmata dkk (2022) ^[24] dalam bukunya dijelaskan bahwa perubahan sifat alami udara dapat mengakibatkan timbulnya pencemaran udara yang bersifat langsung maupun tidak langsung baik secara lokal, regional, global, temporer atau dalam range waktu tertentu yang dapat menurunkan kualitas udara. Jika diperhatikan sebagian besar polutan (Gambar 5) bergerak dari wilayah perairan menuju wilayah daratan, hal ini dapat dimungkinkan bawah sumber polutan bisa berasal dari berbagai aktivitas di laut seperti mobilisasi transportasi laut mengingat Kota Sorong merupakan kota wisata bagi penikmat wisata air seperti di Kepulauan Raja Ampat dan sisa-sisa asap pembuangan dari pabrik industri di wilayah pesisir yang terbawa oleh angin.

Kesimpulan

Secara umum konsentrasi PM_{2.5} di Kota Sorong masih dalam kategori baik, hal ini terbukti dari hasil pantauan nilai konsentrasi harian selama 24 jam masih di bawah nilai baku mutu yaitu 65 µgram/m³. Distribusi temporal konsentrasi PM_{2.5} dengan variasi jam menunjukkan pola *bimodal* dimana terdapat dua kali puncak yaitu pada 10 Pagi dan 8 Malam. Jika dilihat dari faktor meteorologis yaitu suhu, kelembaban dan kecepatan angin tidak menunjukkan adanya korelasi yang kuat terhadap peningkatan konsentrasi PM_{2.5} selama periode 2021 sampai 2022, hal ini kemungkinan disebabkan hampir sepanjang hari terjadi hujan di wilayah Kota Sorong yang memicu terjadinya proses *washing out* atau pencucian polutan. Model *hysplit* lintasan mudur menunjukkan gambaran sumber polutan yang terbawa oleh angin menuju Kota Sorong, dan secara umum sumber polutan berasal dari wilayah perairan seperti Kepulauan Raja Ampat, Kepulauan Maluku dan Samudra Pasifik. Meningkatnya jumlah penduduk dan tingginya mobilisasi dapat meningkatkan polusi udara serta adanya kecepatan angin yang tinggi dapat membawa parsel udara dari suatu tempat ketempat yang lain, maka dari itu perlu diwaspadai untuk wilayah perkotaan yang memiliki jumlah penduduk dan aktivitas mobilitas yang tinggi.

Daftar Pustaka

- [1] G. Huang, X. Li, B. Zhang, and J. Ren, "PM_{2.5} concentration forecasting at surface monitoring sites using GRU neural network based on empirical mode decomposition," *Sci. Total Environ.*, vol. 768, p. 144516, 2021.
- [2] D. M. Westervelt, L. W. Horowitz, V. Naik, A. P. K. Tai, A. M. Fiore, and D. L. Mauzerall, "Quantifying PM_{2.5}-meteorology sensitivities in a global climate model," *Atmos. Environ.*, vol. 142, pp. 43–56, 2016.
- [3] A. I. Calvo, C. Alves, A. Castro, V. Pont, A. M. Vicente, and R. Fraile, "Research on aerosol sources and chemical composition: Past, current and emerging issues," *Atmos. Res.*, vol. 120, pp. 1–28, 2013.
- [4] S. Munir, T. M. Habeebullah, A. M. F. Mohammed, E. A. Morsy, M. Rehan, and K. Ali, "Analysing PM_{2.5} and its association with PM₁₀ and meteorology in the arid climate of Makkah, Saudi Arabia," *Aerosol Air Qual. Res.*, vol. 17, no. 2, pp. 453–464, 2017.
- [5] W. H. Organization, "Health aspects of air pollution with particulate matter, ozone and nitrogen dioxide: report on a WHO working group, Bonn, Germany 13-15 January 2003," Copenhagen: WHO Regional Office for Europe, 2003.
- [6] R. M. Harrison, *Pollution: causes, effects and control*. Royal society of chemistry, 2001.
- [7] Y. W. Utama, "Distribusi Temporal Konsentrasi PM₁₀ Menggunakan Alat Particle Plus EM-10000," *Ecolab*, vol. 15, no. 1, pp. 45–52, 2021.
- [8] Z. Chen *et al.*, "Influence of meteorological conditions on PM_{2.5} concentrations across China: A review of methodology and mechanism," *Environ. Int.*, vol. 139, p. 105558, 2020.
- [9] J. Wang and S. Ogawa, "Effects of meteorological conditions on PM_{2.5} concentrations in Nagasaki, Japan," *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 12, no. 8, pp. 9089–9101, 2015.
- [10] K. Gui *et al.*, "Satellite-derived PM_{2.5} concentration trends over Eastern China from 1998 to 2016: Relationships to emissions and meteorological parameters," *Environ. Pollut.*, vol. 247, pp. 1125–1133, 2019.
- [11] J. Chen *et al.*, "Aerosol hygroscopic growth, contributing factors, and impact on haze events in a severely polluted region in northern China," *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 19, no. 2, pp. 1327–1342, 2019.
- [12] Q. Yin, J. Wang, M. Hu, and H. Wong, "Estimation of daily PM_{2.5} concentration and its relationship with meteorological conditions in Beijing," *J. Environ. Sci.*, vol. 48, pp. 161–168, 2016.
- [13] F. Karaca, I. Anil, and O. Alagha, "Long-range potential source contributions of episodic aerosol events to PM₁₀ profile of a megacity," *Atmos. Environ.*, vol. 43, no. 36, pp. 5713–5722, 2009.
- [14] H. N. Q. Tran and N. Mölders, "Investigations on meteorological conditions for elevated PM_{2.5} in Fairbanks, Alaska," *Atmos. Res.*, vol. 99, no. 1, pp. 39–49, 2011.
- [15] A. Donato, D. Contini, and F. Belosi, "Real time measurements of PM_{2.5} concentrations and vertical turbulent fluxes using an optical detector," *Atmos. Environ.*, vol. 40, no. 7, pp. 1346–1360, 2006.
- [16] C.-F. Wu *et al.*, "Evaluation and quality control of personal nephelometers in indoor, outdoor and personal environments," *J. Expo. Sci. Environ. Epidemiol.*, vol. 15, no. 1, pp. 99–110, 2005.
- [17] S. Shen, P. A. Jaques, Y. Zhu, M. D. Geller, and C. Sioutas, "Evaluation of the SMPS-APS system as a continuous monitor for measuring PM_{2.5}, PM₁₀ and coarse (PM_{2.5}–10) concentrations," *Atmos. Environ.*, vol. 36, no. 24, pp. 3939–3950, 2002.
- [18] H. Li, B. Guo, M. Han, M. Tian, and J. Zhang, "Particulate matters pollution characteristic and the correlation between PM (PM_{2.5}, PM₁₀) and meteorological factors during the summer in Shijiazhuang," *J. Environ. Prot. (Irvine, Calif.)*, vol. 6, no. 05, p. 457, 2015.
- [19] D. Gusnita and N. Cholianawati, "Pola Konsentrasi dan Trayektori Polutan Pm_{2.5} Serta Faktor Meteo di Kota Jakarta," *J. Kim. dan Pendidik. Kim.*, vol. 4, no. 3, pp. 152–163, 2019.
- [20] E. Roflin and F. E. Zulvia, *Kupas tuntas analisis korelasi*. Penerbit NEM, 2021.
- [21] H. M. Gultom and S. Melinda, "Pengaruh Angin Permukaan dan Kelembapan Udara Terhadap Suspended Particulate Matter (SPM) di Sorong Periode Januari–Juli 2019," *Bul. GAW Bariri*,



- vol. 2, no. 2, pp. 71–78, 2021.
- [22] Z. Li, H. Zhang, H. Ye, G. H. Chang, M. Y. Sun, and B. L. Hu, “Characteristics of air pollution during typical haze periods and HYSPLIT model analysis of its source in Hangzhou,” *Acta Sci. Circumstantiae*, vol. 38, no. 05, pp. 1717–1726, 2018.
- [23] Y. Ma, M. Wang, S. Wang, Y. Wang, L. Feng, and K. Wu, “Air pollutant emission characteristics and HYSPLIT model analysis during heating period in Shenyang, China,” *Environ. Monit. Assess.*, vol. 193, pp. 1–14, 2021.
- [24] M. M. T. Simarmata *et al.*, *Pengantar Pencemaran Udara*. Yayasan Kita Menulis, 2022.

