

**ANALISIS PENGARUH MUSIM TERHADAP KONSENTRASI
SUSPENDED PARTICULATE MATTER (SPM) DAN KOMPONEN
UTAMA KIMIA AIR HUJAN (KAH)**

Abdul Latif¹, Sunarno², Dwi Atmoko³

Universitas Negeri Semarang^{1,2}

Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika³

abdlatif024@students.unnes.ac.id¹

ABSTRAK

Penelitian ini mengkaji tingkat Partikel Tersuspensi (SPM) di atmosfer dan komposisi kimia air hujan bervariasi akibat pengaruh musiman selama periode 2020–2024 di Stasiun Klimatologi Jawa Tengah melalui analisis gabungan statistik Analisis Komponen Utama (PCA) dengan pemetaan arah angin. Hasil penelitian menunjukkan bahwa konsentrasi SPM secara signifikan lebih tinggi selama musim kemarau, dengan rata-rata 151,12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, dibandingkan dengan musim hujan yang memiliki rata-rata 107,25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, akibat berkurangnya proses pembersihan oleh hujan dan frekuensi curah hujan yang lebih sedikit. Analisis kimia air hujan menunjukkan konsentrasi ion yang lebih tinggi selama musim kemarau, dengan NH_4^+ dan SO_4^{2-} mendominasi, sedangkan musim hujan ditandai oleh ion laut (Na^+ , Cl^-) bersama dengan SO_4^{2-} . Analisis PCA mengidentifikasi dua komponen utama untuk kedua musim tersebut, yang menjelaskan lebih dari 80% varians total. Selama musim hujan, sumber dominan adalah aerosol laut (PC1: 46,82%), sedangkan sumber antropogenik sekunder membentuk komponen kedua. Musim kemarau menunjukkan campuran kompleks dari sumber laut, darat, dan pembakaran biomassa (PC1: 57,81%), dengan aerosol antropogenik sekunder tetap menjadi kontributor yang konsisten. Analisis arah angin turut mengonfirmasi bahwa angin barat pada musim muson Asia membawa pengaruh laut saat musim hujan, dan angin timur pada musim muson Australia membawa polutan daratan saat musim kemarau. Secara keseluruhan, hal ini menegaskan bahwa sistem muson berperan sebagai faktor pengendali utama terhadap kualitas udara dan deposisi atmosfer di wilayah tersebut.

Kata Kunci : Air Hujan, Monsun, PCA, Polutan, SPM

ABSTRACT

This study aim to examine how level of Suspendet Particulate Matter (SPM) in the atmosphere and the chemical composition of rainwater vary due to seasonal influences during the 2020-2024 period at Semarang Central Java. Combined Principal Component Analisis (PCA) and wind direction mapping are used to track pollution patterns. This approach helps identify the primary sources of pollutants and understand their movement patterns during the rainy season compared to the dry season. The result show that SPM contrations are significantly higher during the dry season, with an average of 151.12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, compared to the rainy season, which has an average of 107.25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, due to reduced cleansing by rain and fewer rainfall events. Chemical analysis of rainwater revealed higher ion concentrations

during the dry season, with NH_4^+ and SO_4^{2-} dominating, whereas the rainy season was characterized by marine ions (Na^+ , Cl^-) along with SO_4^{2-} . PCA analysis identified two principal components for both seasons, explaining more than 80% of the total variance. During the rainy season, the dominant source is marine aerosols (PC1: 46.82%), while secondary anthropogenic sources form the second component. The dry season shows a complex mixture of marine, terrestrial, and biomass burning sources (PC1: 57.81%), with secondary anthropogenic aerosols remaining a consistent contributor. Windrose analysis confirms that westerly winds during the Asian monsoon season transport marine influences during the rainy season, while easterly winds during the Australian monsoon season transport terrestrial pollutants during the dry season. This demonstrates that the monsoon system acts as the primary controlling factor for air quality and atmospheric deposition in the study region.

Keywords: Monsoon, PCA, Pollutans Rainwater, SPM

PENDAHULUAN

Konsentrasi polutan atmosfer, termasuk Partikel Tersuspensi (SPM) dan komposisi kimiawi air hujan, secara intrinsik terkait dengan kondisi meteorologi yang dinamis, sumber emisi lokal, serta mekanisme transportasi regional. Di wilayah pesisir, atmosfer mencerminkan interaksi kompleks antara massa udara laut, emisi daratan, dan aktivitas antropogenik. Memahami interaksi ini sangat penting, karena partikel berasal dari berbagai sumber alami dan antropogenik, serta memainkan peran penting dalam kimia atmosfer dan pengendapan polutan melalui presipitasi (Zeng & Han, 2020).

Indonesia, khususnya wilayah pesisir Jawa Tengah, memiliki iklim muson tropis yang ditandai dengan musim hujan dan kemarau yang jelas. Variabilitas musiman ini dipengaruhi oleh sistem muson Asia-Australia dan pergerakan Zona Konvergensi Antar Tropis (ITCZ). Selama musim hujan (Desember, Januari, dan Februari - DJF), muson Asia mendominasi, membawa massa udara lembap dari laut dan meningkatkan frekuensi curah hujan. Hal ini menyebabkan

pembersihan atmosfer melalui proses “*wet scavenging*” (Hidayati et al., 2025). Sebaliknya, musim kemarau (Juni, Juli, dan Agustus – JJA) didominasi oleh musim hujan Australia, yang mengangkut massa udara kontinental yang lebih kering, sehingga mengurangi curah hujan dan menciptakan kondisi atmosfer yang stabil yang mendukung akumulasi polutan (Sejati & Neritarani, 2025).

Komposisi kimia air hujan berfungsi sebagai proksi yang efektif untuk mengidentifikasi sumber dan proses pembentukan polutan atmosfer (Wang et al., 2024). Ion-ion utama yang ditemukan dalam air hujan, seperti Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , NH_4^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , dan NO_3^- , memberikan wawasan yang signifikan mengenai kontribusi aerosol laut, debu kerak bumi, dan emisi antropogenik sekunder (Dyah Aries Tanti, 2025).

Penelitian ini bertujuan untuk menyelidiki variasi musiman SPM dan kimia air hujan menggunakan data yang dikumpulkan dari tahun 2020 hingga 2024 di Stasiun Klimatologi Jawa Tengah. Penelitian ini menawarkan pembaharuan dengan analisis statistik

multivariat, khususnya Analisis Komponen Utama (PCA), dan mengintegrasikannya dengan analisis mawar angin, penelitian ini berupaya mengidentifikasi secara objektif sumber-sumber polusi dominan serta jalur transportasinya di berbagai musim. Temuan ini diharapkan dapat memberikan landasan ilmiah yang kokoh bagi pengelolaan lingkungan dan strategi mitigasi polusi udara di wilayah pesisir tropis.

METODOLOGI PENELITIAN

Wilayah Studi dan Tahap Penelitian

Penelitian ini menggunakan desain kuantitatif deskriptif-analitis. Penelitian ini dilakukan di Stasiun Klimatologi Jawa Tengah, yang berlokasi di Semarang, Indonesia.

Langkah-langkah dalam penelitian ini adalah pengumpulan data kualitas udara (SPM dan kimia air hujan) serta data meteorologi (hari hujan, arah dan kecepatan angin); Pra-pemrosesan (identifikasi, pengendalian kualitas data, penyortiran data berdasarkan fase musim hujan); Analisis statistik dengan Analisis Komponen Utama (PCA); Analisis Windrose Terintegrasi sepanjang proses untuk menarik kesimpulan mengenai pengaruh musim terhadap konsentrasi SPM dan komponen kimia utama air hujan.

Kumpulan data ini mencakup periode pengamatan selama lima tahun, mulai Januari 2020 hingga Desember 2024, dengan memanfaatkan basis data kualitas udara dan meteorologi yang disediakan oleh Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG). Variabel utama yang dikumpulkan

meliputi konsentrasi Partikel Tersuspensi (SPM), parameter kimia air hujan, jumlah hari hujan, serta kecepatan dan arah angin. Data SPM diperoleh dari sampel yang dikumpulkan setiap 5 hari, yang mewakili peristiwa deposisi kering, yang kemudian dirata-ratakan menjadi data bulanan. Sampel air hujan untuk analisis kimia dikumpulkan setiap minggu. Analisis kimia, yang dilakukan di Laboratorium Kualitas Udara BMKG, menghasilkan kumpulan data ion utama, termasuk kation (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , NH_4^+) dan anion (Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^-).

Pre- Processing dan Uji Kelayakan Data

Proses pembersihan data difokuskan pada data utama Partikel Tersuspensi (SPM) dan komposisi kimia air hujan yang diperoleh dari Stasiun Klimatologi Jawa Tengah untuk periode Desember 2019 – Desember 2024. Langkah ini mencakup pemeriksaan nilai-nilai yang menyimpang (outlier) yang disebabkan oleh kesalahan peralatan teknis atau kesalahan pencatatan manual. Untuk data kimia air hujan, dilakukan pemeriksaan keseimbangan ion (*ion balance check*) sederhana guna memastikan validitas hasil analisis laboratorium terkait rasio kation terhadap anion. Analisis utama dalam penelitian ini berfokus pada periode 2020–2024, yang memiliki ukuran sampel yang lebih representatif dan kualitas keseimbangan ion yang baik berdasarkan hasil uji keseimbangan ion (WMO, 2021).

Tabel 1.
Kriteria batas perbedaan Ion yang di terima sesuai WMO

Jumlah Anion + Kation ($\mu\text{eq L}^{-1}$)	Batas Perbedaan Ion yang Diterima (%)
≤ 50	± 60
$> 50 - 100$	± 30
$> 100 - 500$	± 15
> 500	± 10

Tabel 1. Adalah kriteria untuk menerima atau menolak suatu sampel setelah menghitung kesalahan keseimbangan Ion ditetapkan sesuai dengan pedoman yang ditetapkan oleh the guidelines established by the Global Atmospheric Watch (GAW) Precipitation Chemistry Program of the World Meteorological Organization (WMO). Sampel yang melebihi batas kesalahan keseimbangan ion yang dapat diterima diklasifikasikan sebagai nilai penyimpangan dan dikecualikan dari analisis multivariat.

Principal Component Analysis (PCA)

Principal Component Analysis (PCA) adalah teknik statistik multivariat yang digunakan untuk mengurangi dimensi kumpulan data yang besar dan kompleks tanpa kehilangan informasi penting yang terkandung di dalamnya. PCA bekerja dengan mentransformasi sekumpulan variabel asli yang saling berkorelasi menjadi sekumpulan variabel baru yang tidak berkorelasi (ortogonal) yang disebut Komponen Utama (PC). Dalam sebuah penelitian (Galvez et al., 2022), teknik PCA ini digunakan untuk menghasilkan variabel-variabel baru yang tidak berkorelasi, yang secara bertahap mengurangi varians sistem, sehingga menghasilkan aturan yang jelas untuk memisahkan kelompok-kelompok data dalam kondisi tertentu.

Semua perhitungan statistik dan transformasi data dilakukan menggunakan bahasa pemrograman Python. Secara khusus, *the scikit-learn machine learning library* digunakan untuk pra-pemrosesan data dan pengurangan dimensi (Pandey et al., 2020). Analisis Komponen Utama (PCA) digunakan untuk mengurangi dimensi kumpulan data sambil mempertahankan varians sebesar mungkin. Prosedur analitis tersebut dilakukan dengan mengikuti langkah-langkah berurutan yakni pertama dilakukan standarisasi data. Tujuannya supaya semua variabel punya skala yang sama dan variabel besar tidak mendominasi PCA. Langkah berikutnya adalah matriks korelasi yaitu proses menghitung hubungan antar variabel. Hasil dari kegiatan ini untuk menunjukkan variabel yang berasal dari sumber sama dan menjadi dasar PCA.

Selanjutnya dilakukan Perhitungan PCA yang meliputi perhitungan *Eigenvalue*, *Eigenvector* serta variansi komponen utama. Dari perhitungan tersebut maka dapat diperoleh penentuan jumlah komponen, dipilih berdasarkan *Eigenvalue* dengan nilai > 1 ; Variansi kumulatif dengan nilai $\geq 70\%$ serta Scree Plot. Untuk melihat kelompok variabel supaya lebih jelas dan interpretasi sumber lebih mudah maka diperlukan rotasi faktor (Varimax). Sehingga saat interpretasi komponen utama bisa mengartikan

sumber polutan dari aerosol laut, debu tanah, emisi kendaraan, aerosol sekunder atau pembakaran biomassa.

Analisis Komponen Utama dan Integrasi Mawar Angin

Menganalisis “jejak” kimiawi yang dihasilkan oleh PCA dan menghubungkannya dengan pergerakan fisik massa udara. Integrasi kedua metode ini bertujuan untuk memvalidasi hipotesis mengenai sumber-sumber polutan serta menentukan asal geografisnya. Proses integrasi ini dilakukan melalui langkah-langkah sistematis berikut:

Penentuan Kejadian Dominan (*High Loading Event Selection*)

Pada tahap awal, grafik skor yang dihasilkan dari PCA ditinjau. Untuk setiap faktor sumber polutan yang teridentifikasi (misalnya, Aerosol Laut, Pembakaran Biomassa), periode pengamatan yang menunjukkan skor faktor tinggi atau dominan (misalnya, skor $> 1,0$) dipilih. Periode dengan skor tinggi ini dianggap sebagai representasi paling akurat dari keberadaan sumber polutan spesifik tersebut di Stasiun Klimatologi Jawa Tengah. Selain itu, untuk menganalisis pengaruh musiman, arah angin yang dominan diidentifikasi selama puncak musim hujan dan musim kemarau.

Analisis Mawar Angin

Analisis mawar angin dengan menggunakan data arah dan kecepatan angin pada puncak musim hujan dan musim kemarau. Diagram arah angin tersebut menggambarkan distribusi frekuensi arah angin beserta kelas-kelas kecepatan angin yang dominan. Analisis ini memudahkan identifikasi sektor-sektor arah yang paling sering

membawa massa udara ke lokasi pengamatan, sehingga menunjukkan arah-arrah potensial sumber polutan.

Integrasi PCA dan Mawar Angin

Integrasi dilakukan dengan menghubungkan periode dominasi komponen utama hasil PCA dengan pola arah angin dominan. Skor komponen utama dianalisis terhadap distribusi arah angin pada periode yang sama untuk mengetahui sector arah asal massa udara yang berkorelasi dengan peningkatan komponen kimia tertentu. Tahap – tahap integrasi meliputi; 1) Mengelompokkan periode dengan nilai skor komponen tinggi; 2) Identifikasi arah angin dominan pada periode puncak musim hujan yaitu Desember – Februari atau DJF dan puncak musim kemarau Juni – Agustus atau JJA; 3) Menentukan kemungkinan lokasi sumber polutan berdasarkan arah dominan dan karakteristik komponen kimia. Dengan demikian melalui pendekatan ini memungkinkan identifikasi sumber polutan secara lebih komprehensif karena mempertimbangkan karakter kimia dan dinamika atmosfer secara bersama.

Analisis dan Interpretasi Pengaruh Musim

Analisis pengaruh musim dalam penelitian ini bertujuan untuk menilai bagaimana dinamika monsun (musim hujan dan musim kemarau) mengendalikan konsentrasi SPM di udara ambien serta perubahan struktur dominan komposisi kimia air hujan yang direpresentasikan oleh skor komponen utama (PC Score). Secara konseptual, variasi musiman memengaruhi kualitas udara melalui perubahan curah hujan (pembersihan atmosfer/wet scavenging), arah –

kecepatan angin (transport), serta kondisi pencampuran lapisan batas atmosfer (akumulasi/disperse). Di Kawasan Asia Tenggara pola ini yang sering terjadi, di mana konsentrasi partikulat cenderung lebih rendah pada periode basah karena proses deposisi basah, dan lebih tinggi pada periode kering saat hujan berkurang dan peluang akumulasi meningkat (Itahashi et al., 2021).

Pada kegiatan perbandingan rata – rata SPM per musim, langkah awal yang dilakukan adalah melihat keseluruhan data dari tahun 2020 hingga 2024. Kemudian diidentifikasi nilai tertinggi dan terendah, serta menilai besarnya perubahan dari musim hujan ke musim kemarau dan sebaliknya.

Dalam interpretasi SPM, perhatian utama diberikan pada kecenderungan akumulasi polutan pada musim kemarau (JJA), yang secara teoritis dipengaruhi oleh berkurangnya kejadian hujan (turunnya pembersihan atmosfer) dan kondisi atmosfer yang dapat lebih stabil sehingga polutan lebih mudah bertahan di dekat permukaan. Temuan pola puncak partikulat pada musim kering juga dilaporkan pada studi PM_{2.5} yang dilakukan oleh (Indriyati et al., 2025).

Interpretasi dan analisis KAH yang merujuk pada skor komponen utama menjadi representasi “kekuatan kontribusi” komponen tersebut pada

saat pengamatan. Ringkasan hasil olahan akan menjawab komponen mana yang paling dominan pada tiap musim.

Hasil ini diinterpretasikan sebagai indikasi perubahan proses atmosfer atau tipe sumber dominan antar-musim. Pada konteks kimia air hujan, perubahan dominasi komponen sering terkait dengan pergeseran kontribusi maritim (misalnya : Na^+ dan Cl^- , debu (Ca^{2+} dan Mg^{2+}), maupun pengaruh emisi antropogenik/sekunder (SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+) yang intensitas “terlarutnya” dipengaruhi oleh pola hujan dan transport massa udara musiman.

HASIL PENELITIAN

Hasil penelitian tentang Pengaruh musim Terhadap Konsentrasi Suspended Particulate Matter (SPM) Dan Komponen Utama Kimia Air Hujan (KAH) di Stasiun Klimatologi Jawa Tengah Periode 2020 – 2024, musim terbukti berperan sebagai faktor pengendali utama (dominant controlling factor) dalam dinamika kualitas udara di wilayah pesisir Jawa Tengah. Pada musim hujan, sistem atmosfer didominasi oleh proses deposisi basah dan pengaruh aerosol laut, yang menghasilkan konsentrasi SPM rendah dan komposisi KAH yang relatif bersih. Sebaliknya, pada musim kemarau, sistem atmosfer didominasi oleh proses akumulasi polutan dan kontribusi sumber antropogenik dari transportasi, industri, dan pembakaran biomassa yang menyebabkan peningkatan konsentrasi SPM dan perubahan komposisi kimia air hujan.

Tabel 2.

Hasil Penelitian Pengaruh Musim terhadap konsentrasi SPM dan Komponen Utama Kimia Air Hujan

Parameter	Musim Hujan (DJF)	Musim Kemarau (JJA)
Arah angin dominan	Barat – Barat Laut	Timur – Tenggara
Sistem monsun	Monsun Asia	Monsun Australia
Karakter massa udara	Lembab	Kering
Hari hujan	Tinggi	Rendah

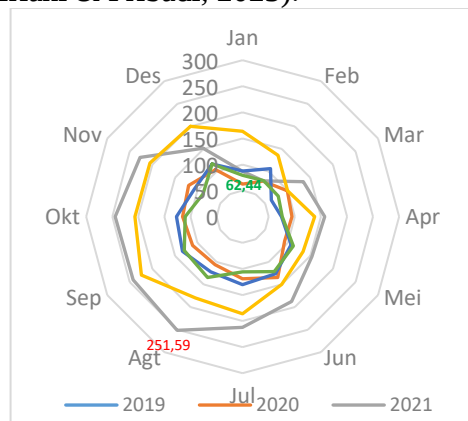
Proses dominan	Wet scavenging	Akumulasi polutan
Konsentrasi SPM	Cenderung rendah	Cenderung tinggi
Komposisi KAH	Dominan ion laut (Na^+ , Cl^-)	Dominan non-laut (Ca^{2+} , K^+)

PEMBAHASAN

Karakteristik *Suspended Particulate Matter* (SPM)

Variabilitas Temporal *Suspended Particulate Matter Concentrations* (SPM)

Berdasarkan tinjauan antartahunan, konsentrasi PM pada tahun 2022 relatif tinggi, dengan beberapa nilai puncak melebihi $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Variabilitas yang tinggi selama periode ini menunjukkan peran signifikan dari dinamika atmosfer dan meteorologi regional, terutama terkait dengan perpindahan massa udara dari wilayah lain. Perpindahan aerosol ini berpotensi membawa emisi antropogenik dan debu, yang pada akhirnya meningkatkan akumulasi partikel di lokasi pengamatan (Iriani & Pribadi, 2023).



Gambar 1.

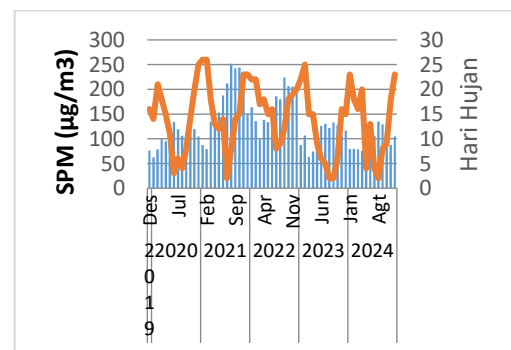
Variasi konsentrasi rata-rata bulanan SPM periode Desember 2019 – Desember 2024 di Stasiun Klimatologi Jawa Tengah.

Hubungan negatif antara tren curah hujan dan konsentrasi SPM memperlihatkan bahwa peningkatan jumlah hari hujan selalu diikuti oleh penurunan konsentrasi SPM, dan

sebaliknya. Pola ini menegaskan bahwa mekanisme deposisi basah memainkan peran penting dalam mengendalikan distribusi partikel (Irawadi & Razif, 2023).

Pemantauan kualitas udara di Stasiun Klimatologi Jawa Tengah dari Desember 2019 hingga Desember 2024 menunjukkan variasi temporal yang cukup dinamis pada konsentrasi PM, sebagaimana terlihat pada Gambar 1 diatas.

Secara keseluruhan, konsentrasi partikel berfluktuasi dalam rentang yang luas, mulai dari $62,44 \mu\text{g}/\text{m}^3$ hingga $251,59 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Fluktuasi ini sebagian besar dipengaruhi oleh faktor-faktor meteorologi lokal dan sumber-sumber emisi potensial di wilayah penelitian.



Gambar 2.

Variasi bulanan konsentrasi SPM dan jumlah hari hujan selama periode Desember 2019 hingga Desember 2024

Gambar 2 menunjukkan transisi menuju kondisi atmosfer yang lebih bersih dan lebih baik selama periode 2023–2024. Selama periode ini, konsentrasi SPM menunjukkan tren penurunan yang stabil dalam kisaran

70–140 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dengan fluktuasi yang lebih kecil. Penurunan yang signifikan ini berkaitan erat dengan peningkatan jumlah hari hujan, yang menciptakan kondisi optimal untuk penghilangan polutan dari atmosfer (McMullen et al., 2021).

Statistik Deskriptif Konsentrasi SPM

Analisis statistik deskriptif dilakukan untuk mengetahui karakteristik umum konsentrasi SPM selama musim hujan (DJF) dan musim kemarau (JJA).

Tabel 3.
Statistik Deskriptif Konsentrasi SPM ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Musim	Rata-rata	Nilai Min	Nilai Maks	Standard Deviasi
DJF	107,25	62,44	200,10	39,79
JJA	151,12	105,65	251,59	42,79

Hasil analisis menunjukkan perbedaan yang jelas dalam karakteristik antara kedua musim tersebut, sebagaimana digambarkan dalam Tabel 3 mengenai statistik deskriptif untuk SPM ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

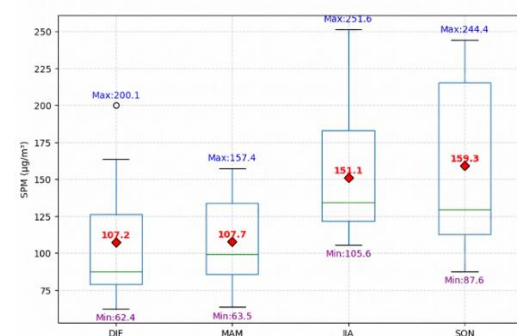
Selama musim hujan (DJF), konsentrasi SPM relatif lebih rendah dan lebih stabil, dengan rata-rata 107,25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Hal ini disebabkan oleh intensitas curah hujan yang tinggi, yang meningkatkan efisiensi deposisi basah, sehingga partikel aerosol lebih mudah dihilangkan dari atmosfer. Sebaliknya, selama musim kemarau (JJA), konsentrasi SPM meningkat secara signifikan, dengan rata-rata 151,12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Nilai maksimum selama musim ini mencapai 251,59 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, disertai dengan variabilitas data yang lebih besar. Kondisi ini mengindikasikan akumulasi partikel akibat rendahnya frekuensi curah hujan dan meningkatnya stabilitas atmosfer selama musim kemarau (Nurlaili et al., 2025).

Peningkatan konsentrasi SPM selama musim kemarau juga terkait dengan pengaruh Musim Hujan Australia, yang membawa massa udara kering ke arah Indonesia. Kondisi ini membuat deposisi basah menjadi

kurang efektif, sehingga partikel dapat bertahan lebih lama di atmosfer dan menumpuk.

Secara keseluruhan, konsentrasi SPM selama musim kemarau tercatat sekitar 40–45% lebih tinggi dibandingkan selama musim hujan. Hal ini menunjukkan bahwa faktor-faktor meteorologi, terutama curah hujan dan stabilitas atmosfer, memainkan peran dominan dalam mengendalikan distribusi partikel di atmosfer

Variasi Musiman SPM (DJF vs. JJA)



Gambar 3.

Grafik boxplot Distribusi Konsentrasi SPM Berdasarkan Musim

Analisis variasi musiman telah dilakukan untuk mengidentifikasi

perbedaan karakteristik konsentrasi SPM antara musim hujan (DJF) dan musim kemarau (JJA).

Hasil analisis boxplot menunjukkan bahwa distribusi konsentrasi SPM selama musim hujan (DJF) cenderung lebih homogen, dengan rentang interkuartil yang lebih sempit dibandingkan dengan musim kemarau (JJA). Sebaliknya, musim

kemarau menunjukkan distribusi yang lebih luas dengan nilai maksimum yang lebih tinggi. Kondisi ini mengindikasikan bahwa proses akumulasi aerosol lebih dominan selama musim kemarau akibat rendahnya deposisi basah dan meningkatnya stabilitas atmosfer (Istiqomah et al., 2025).

Tabel 4.
Komposisi Ion Kimia Air Hujan (KAH)

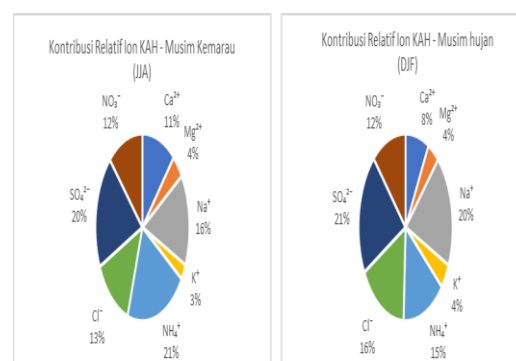
Ion	JJA ($\mu\text{eq/L}$)	DJF ($\mu\text{eq/L}$)
<u>Kation:</u>		
Ca^{2+}	0.0323	0.0149
Mg^{2+}	0.0116	0.0074
Na^+	0.0441	0.0358
K^+	0.0076	0.0080
NH_4^+	0.0579	0.0270
<u>Anion:</u>		
Cl^-	0.0361	0.0300
SO_4^{2-}	0.0548	0.0387
NO_3^-	0.0339	0.0218

Karakteristik Kimia Air Hujan Komposisi Ion Kimia Air Hujan

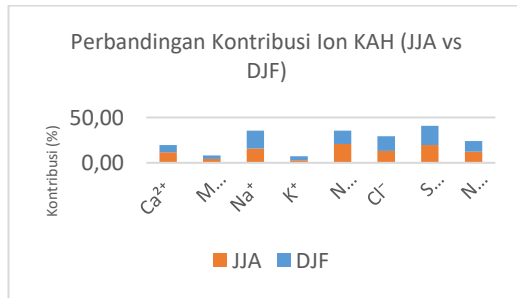
Karakteristik kimia air hujan mencerminkan komposisi kimia atmosfer, yang sangat dipengaruhi oleh berbagai sumber polutan serta proses fisik dan kimia yang terjadi di dalamnya. Hasil analisis komposisi kimia air hujan yang disajikan dalam Tabel 4, dengan data untuk musim kemarau ditampilkan pada kolom JJA dan data untuk musim hujan ditampilkan pada kolom DJF

Pengamatan menunjukkan bahwa konsentrasi hampir semua unsur kimia dalam air hujan meningkat selama musim kemarau (JJA) dibandingkan dengan musim hujan (DJF). Peningkatan konsentrasi yang paling

signifikan teramati pada NH_4^+ , SO_4^{2-} , NO_3^- , dan Ca^{2+}



Gambar 4.
Kontribusi relatif ion KAH musim kemarau (JJA) dan musim hujan (DJF) periode tahun 2020 – 2024

**Gambar 5.**

Perbandingan kontribusi ion kimia air hujan antara musim kemarau (JJA) dan musim hujan (DJF)

Berdasarkan hasil analisis kontribusi relatif ion-ion yang ditunjukkan pada Gambar 5 dan 6, dapat dilihat bahwa komposisi kimia air hujan di Stasiun Klimatologi Jawa Tengah didominasi oleh beberapa ion utama, dengan pola yang relatif konsisten antara musim kemarau (JJA) dan musim hujan (DJF), meskipun terdapat perbedaan dalam tingkat kontribusi masing-masing ion.

Komposisi ion pada air hujan menunjukkan perbedaan karakteristik yang signifikan antar musim. Pada musim kemarau (JJA), ion didominasi

oleh NH_4^+ dan SO_4^{2-} yang mengindikasikan tingginya pengaruh emisi antropogenik melalui pembentukan aerosol sekunder, disertai peningkatan ion kerak bumi (Ca^{2+} dan Mg^{2+}) akibat resuspensi debu di tengah minimnya curah hujan yang menyebabkan akumulasi polutan. Sebaliknya, pada musim hujan (DJF), deposisi basah secara efektif membersihkan polutan atmosfer sehingga menurunkan total konsentrasi ion. Kondisi ini menyebabkan pergeseran dominasi pada rasio ion, di mana proporsi aerosol laut (Na^+ dan Cl^-) beserta SO_4^{2-} menjadi lebih menonjol seiring tercucinya polutan antropogenik dan debu dari udara.

Hasil Analisis Komponen Utama (PCA) serta Interpretasi Sumber-Sumber Polutan

Analisis PCA mengidentifikasi dua komponen utama (PC) dengan nilai eigen lebih besar dari 1 yang secara signifikan menjelaskan variabilitas komposisi kimia air hujan sepanjang musim (Maheshwari et al., 2026).

Tabel 5.

Nilai eigenvalue dan variansi Musim Hujan (DJF)

	PC1	PC2
Eigenvalue	3.28	2.51
Variance (%)	46.82	35.84
Cumulative Variance (%)	46.82	82.66

Tabel 6.

Muatan Faktor Musim Hujan (DJF)

	PC1	PC2
Ca	0.600	0.643
Mg	0.893	0.259
Na	0.943	0.019
NH ₄	-0.076	0.941
Cl	0.788	0.246
SO ₄	0.616	0.625
NO ₃	0.475	0.832

Karakteristik Musim Hujan (DJF):

Tabel 5 dan Tabel 6 menunjukkan bahwa reduksi dimensi selama musim hujan menyumbang 82,66% dari total varians data. Komponen utama pertama (PC1) didominasi oleh beban yang kuat pada ion Na^+ , Mg^{2+} , dan Cl^- , yang mewakili aerosol laut dari proses

percikan air laut. Di sisi lain, komponen utama kedua (PC2) dicirikan oleh ion NH_4^+ , NO_3^- , dan SO_4^{2-} , yang mengindikasikan adanya aerosol anorganik sekunder dari sumber antropogenik seperti transportasi dan emisi industri.

Tabel 7.

Nilai eigenvalue dan variansi Musim Kemarau (JJA)		
	PC1	PC2
Eigenvalue	4.63	2.14
Variance (%)	57.81	26.70
Cumulative Variance (%)	57.81	84.51

Tabel 8.

Muatan Faktor Musim Hujan (DJF)

	PC1	PC2
Ca	0.553	0.484
Mg	0.913	0.276
Na	0.949	-0.006
K	0.934	0.100
NH_4	-0.069	0.975
Cl	0.935	0.207
SO_4	0.800	0.399
NO_3	0.442	0.814

Karakteristik Musim Kemarau (JJA):

Tabel 7 dan 8 menunjukkan bahwa selama musim kemarau, kedua komponen utama tersebut menyumbang 84,51% dari varians data. Struktur sumber selama periode ini menunjukkan kompleksitas yang lebih tinggi. PC1 tidak hanya dipengaruhi oleh ion laut, tetapi juga menerima kontribusi signifikan dari K^+ , yang merupakan indikator aktivitas pembakaran biomassa, serta Ca^{2+} , yang menandakan adanya partikel mineral dari resuspensi debu tanah (sumber kerak bumi). PC2 tetap didominasi secara konsisten oleh prekursor sekunder antropogenik NH_4^+ dan NO_3^- . Kehadiran komponen antropogenik pada kedua musim tersebut menegaskan

bahwa sumber emisi sekunder ini stabil sepanjang tahun.

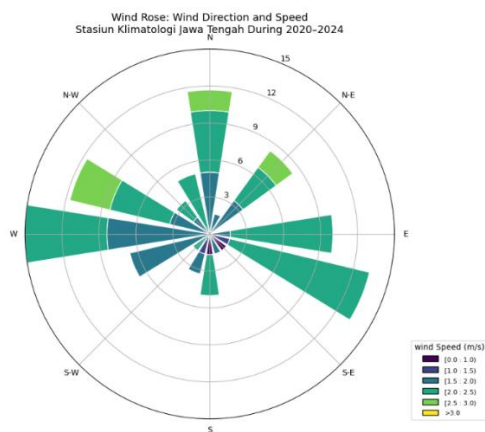
Analisis Pola Angin

Pola angin akan membantu kita melacak jejak datangnya polutan. Arah angin ibarat peta jalur masuknya udara, sementara kecepatannya menunjukkan seberapa kuat polutan itu terbawa (Adriani & Ahmad Razak, 2020). Dengan kata lain, data angin ini berfungsi merajut dan melengkapi temuan sumber polutan sebelumnya agar kesimpulan yang kita dapatkan menjadi lebih utuh.

Pengaruh Sistem Muson terhadap Dinamika Pola Angin

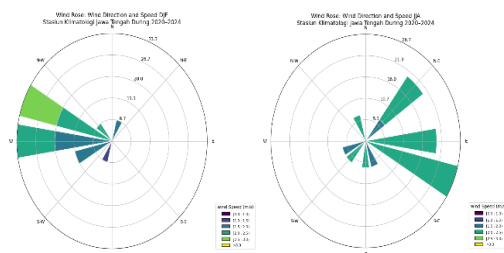
Gambar 6 berikut ini menunjukkan pola angin yang cukup

dinamis. Angin di wilayah ini tidak bertiup dari satu arah saja, melainkan merupakan kombinasi dari angin dominan dari barat, timur, dan utara. Sektor barat merupakan arah yang paling sering terjadi, membawa angin yang umumnya tenang dengan kecepatan berkisar antara 1,5–2,5 m/s. Selanjutnya, sektor timur juga menunjukkan kehadiran yang konsisten dengan karakteristik kecepatan yang serupa. Sementara itu, angin dari utara dan barat laut masih tercatat, meskipun tidak sesering ketiga arah utama tersebut.



Gambar 6.

Windrose arah dan kecepatan angin Stasiun Klimatologi Jawa Tengah periode 2020 - 2024



Gambar 7.

Windrose Arah dan Kecepatan Angin Musim DJF (Musim Hujan) dan JJA (Musim Kemarau) Stasiun Klimatologi Periode 2020 - 2024

Gambar 7 menunjukkan bahwa selama musim hujan (DJF), sirkulasi atmosfer sangat didominasi oleh angin

dari barat hingga barat laut, dengan frekuensi kemunculan sebesar 73,3%. Pola ini merupakan cerminan langsung dari pergerakan musim hujan Asia, yang membawa massa udara lembap dari Samudra Hindia menuju Pulau Jawa (Tri Pujiastuti, 2019). Sebaliknya, saat memasuki musim kemarau (JJA), arah angin mengalami pergeseran ekstrem yang didominasi oleh angin dari timur hingga tenggara dengan frekuensi 46,7%. Transisi arah angin yang homogen ini menandai aktivasi Muson Australia, yang secara pasif menyalurkan udara kering dari benua Australia Integrasi Sumber Polutan Berdasarkan Analisis PCA dan Pola Angin

Mekanisme Transportasi dan Deposisi Basah Selama Musim Hujan (DJF)

Variasi arah angin muson ini secara langsung memengaruhi fluktuasi Partikel Tersuspensi (SPM) dan mengubah komposisi dominan kimia air hujan. Angin barat, yang sarat uap air selama musim hujan, tidak hanya memicu curah hujan lebat tetapi juga meningkatkan efektivitas proses pembersihan basah. Intensitas curah hujan yang tinggi menyebabkan partikel aerosol tersapu dan berkurang secara signifikan, sehingga menghasilkan konsentrasi SPM yang rendah di udara (Kadir et al., 2020).

Kondisi atmosfer ini didukung kuat oleh temuan Analisis Komponen Utama (PCA). Analisis PCA menunjukkan bahwa Komponen Utama 1 (PC1) selama musim hujan sepenuhnya didominasi oleh ion aerosol laut, yaitu Na^+ dan Cl^- . Massa udara yang bergerak dari laut ke daratan secara efektif mengangkut aerosol laut ini, menjadikannya kontributor utama

terhadap curah hujan di KAH, sementara kontribusi polutan antropogenik berkurang dan hanya menjadi faktor sekunder (PC2) akibat intensitas deposisi basah.

Akumulasi Polutan Terrestrial dan Antropogenik Selama Musim Kemarau (JJA)

Selama musim kemarau, angin timur yang membawa udara kering secara drastis mengurangi frekuensi hari hujan, sehingga mekanisme pembersihan basah menjadi tidak efektif. Akibatnya, partikel-partikel di udara tidak tersapu dan cenderung menumpuk dalam jangka waktu yang lebih lama di lapisan atmosfer yang stabil, yang memicu lonjakan konsentrasi SPM.

Pergeseran dalam sistem angin darat ini membuka jalan bagi masuknya berbagai emisi polutan. Hasil PCA selama musim kemarau menegaskan bahwa dominasi PC1 bergeser ke arah polutan yang bersumber dari darat, yang mencakup kontributor antropogenik (seperti transportasi dan aktivitas industri yang ditandai dengan SO_4^{2-} , NO_3^- , dan NH_4^+) serta sumber kerak bumi alami (dalam bentuk resuspensi debu yang ditandai dengan Ca^{2+} dan K^+). Pola angin yang konsisten dari daratan memfasilitasi pembentukan kumulatif aerosol sekunder, sementara kontribusi aerosol laut justru menurun menjadi komponen sekunder.

KESIMPULAN

Variasi musiman memiliki pengaruh yang signifikan terhadap karakteristik partikel tersuspensi (SPM) dan komposisi kimia air hujan di Stasiun Klimatologi Jawa Tengah. Konsentrasi SPM cenderung lebih tinggi selama musim kemarau akibat

rendahnya frekuensi curah hujan dan meningkatnya stabilitas atmosfer, yang menyebabkan akumulasi aerosol. Komposisi kimia air hujan menunjukkan dominasi ion antropogenik seperti NH_4^+ dan SO_4^{2-} selama musim kemarau, sedangkan musim hujan lebih dipengaruhi oleh aerosol laut, sebagaimana ditunjukkan oleh dominasi ion Na^+ dan Cl^- . Hasil PCA dan analisis rose angin menunjukkan bahwa perubahan pola musim menyebabkan perubahan arah transportasi massa udara dan sifat sumber polutan. Musim hujan didominasi oleh aerosol laut, sedangkan musim kemarau lebih dipengaruhi oleh sumber antropogenik dan partikel daratan.

DAFTAR PUSTAKA

- Adriani, & Ahmad Razak, A. K. (2020). Analisis Pola Dispersi Polutan pada Kawasan Pabrik di Kecamatan Somba Opu. in *Dewantara. J. Tech*, 1(1). <https://doi.org/https://doi.org/10.59563/djtech.v1i1.24>
- Dyah Aries Tanti, A. R. O. T. A. I. W. S. L. R. T. W. J. S. (2025). Pengaruh Polusi Udara terhadap Deposisi Asam di Daerah Sekitar Pantai. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 26(1). <https://doi.org/https://doi.org/10.55981/jtl.2025.4902>
- Galvez, M. C. D., Vallar, E., Castilla, R. M., Mandia, P., Branzuela, R., Rempillo, O., Orbecido, A. H., Beltran, A., Ledesma, N., Deocarís, C., Morris, V., & Belo, L. P. (2022). *Principal Component Analysis of Heavy Metals in Atmospheric Aerosols from Meycauayan, Bulacan, Philippines*.

- <https://doi.org/10.20944/preprints202202.0120.v1>
- Romli, R. H. A., Adhi, M. A., & Mulsandi, A. (2025). Spatiotemporal Modeling of Acid Rain Chemistry in Tropical Java Using Mixed-Effects Models: Deposition Patterns and Threshold Exceedance. *Jurnal Meteorologi dan Geofisika*, 26(1), 55-72. <https://jmg.bmkg.go.id/jmg/index.php/jmg/article/view/1170>.
- Indriyati, D., Adhi, M. A., & Mulsandi, A. (2025). Spatio-Temporal Dynamics of Extreme PM_{2.5} in Indonesia: A Weather-Based Hybrid Modeling Approach. *Jurnal Meteorologi dan Geofisika*, 26(1), 37-54. <https://doi.org/10.31172/jmg.v26i1.1163>
- Iriani, L., & Pribadi, D. A. (2023). Analisis Sebaran Konsentrasi PM_{2,5} Menggunakan Model AERMOD di Jalur Protokol Kota Bogor. *Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan*, 8(3), 213-222. <https://doi.org/10.29244/jsil.8.3.213-222>
- Itahashi, S., Ge, B., Sato, K., Wang, Z., Kurokawa, J., Tan, J., Huang, K., Fu, J. S., Wang, X., Yamaji, K., Nagashima, T., Li, J., Kajino, M., Carmichael, G. R., & Wang, Z. (2021). Insights Into Seasonal Variation of Wet Deposition Over Southeast Asia Via Precipitation Adjustment from The Findings of MICS-Asia III. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21(11), 8709–8734. <https://doi.org/10.5194/acp-21-8709-2021>
- Kadir, A. I. N. K., Driejana, D., & Santoso, M. (2020). Komposisi Kimia Pencemar Partikulat Kasar dan Halus di DKI Jakarta pada Musim Hujan dan Musim Kemarau. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 18(3), 522–530. <https://doi.org/10.14710/jil.18.3.522-530>
- Maheshwari, A., Das, J. K., Guaragni, B., Nimbalkar, S., Alghnime, N., Alallah, J., Quiles-Corona, M., & Basavapatna, Y. N. (2026). Principal Component Analysis: Progress and Applications. *Newborn*, 5(1), 20–25. <https://doi.org/10.5005/jp-journals-11002-0150>
- McMullen, N., Annesi-Maesano, I., & Renard, J. B. (2021). Impact of Rain Precipitation on Urban Atmospheric Particle Matter Measured At Three Locations in France Between 2013 and 2019. *Atmosphere*, 12(6). <https://doi.org/10.3390/atmos12060769>
- Nurlaili, D. K., & Hendrasarie, N. (2025). Analisis Perbandingan Kualitas Udara Ambien (SO₂ dan NO₂) pada Musim Kemarau dan Musim Hujan. *Jurnal EnviScience (Environment Science)*, 9(1), 17-28. <https://jurnalkesehatan.unisla.ac.id/index.php/jev/article/view/644>
- Pandey, N., Patnaik, P. K., & Gupta, S. (2020). Data Pre Processing for Machine Learning Models using Python Libraries. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 9(4), 1995–1999. <https://doi.org/10.35940/ijeat.D9057.049420>
- Sejati, S. P., & Neritarani, R. (2025). Study of the Impact of Rainfall Pattern Dynamics on Carbon Monoxide and Nitrogen Dioxide

- Using Cloud Computing (Case Study in the Special Region of Yogyakarta, Indonesia). *Indonesian Journal of Geography*, 57(2), 236–252. <https://doi.org/10.22146/ijg.99395>
- Wang, H., Li, X., Xu, B., Huo, T., Yang, H., & Tao, H. (2024). Rainfall Chemistry and Total Wet and Dry Deposition of Acidity and Nitrogen in Mianyang, Southwest China. *Polish Journal of Environmental Studies*, 33(6), 6397–6407. <https://doi.org/10.15244/pjoes/185348>
- WMO. (2021). *WMO collection of the Climatological Standard Normals for 1991–2020*. https://extranet.wmo.int/edistrib_expanded/grp_prs/_en/2011_2022_Archives/Archives%202021/16953-2021-S-CS-CMP-CLINO9120-en.pdf?utm_source=chatgpt.com
- Zeng, J., & Han, G. (2020). Rainwater Chemistry Reveals Air Pollution in A Karst Forest: Temporal Variations, Source Apportionment, and Implications for The Forest. *Atmosphere*, 11(12), 1–18. <https://doi.org/10.3390/atmos11121315>