

Evaluasi Polutan Udara Ambien dan Dampaknya terhadap Siklus Karbon di Lingkungan Kampus UIN Raden Fatah Palembang

Evaluation of Ambient Air Pollutants and their Impact on the Carbon Cycle in UIN Raden Fatah Palembang Campus Environment

Apreza Reynaldi Prayoga¹⁾, Nopriandi¹⁾, Ledis Heru Saryono Putro¹⁾

¹⁾ Program Studi Biologi, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Raden Fatah Palembang
Jl. Pangeran Ratu, 5 Ulu, Kecamatan Seberang Ulu I, Kota Palembang, Sumatera Selatan 30252

Email: 2230801068@radenfatah.ac.id

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji karakteristik polutan udara ambien dan dampaknya terhadap dinamika siklus karbon di lingkungan Kampus UIN Raden Fatah Palembang. Parameter yang diukur meliputi partikulat udara (PM_{1.0}, PM_{2.5}, PM₁₀), formaldehida (HCHO), dan total senyawa organik volatil (TVOC). Pengambilan data dilakukan di empat titik strategis kampus selama lima hari berturut-turut dengan lima kali pengulangan setiap harinya. Hasil menunjukkan bahwa konsentrasi PM_{2.5} dan PM_{1.0} mendekati ambang batas rekomendasi WHO, dengan nilai tertinggi ditemukan di titik Jembatan Kanal. Sementara itu, konsentrasi HCHO dan TVOC tertinggi terdeteksi di area Gedung Olahraga. Analisis korelasi menunjukkan adanya hubungan signifikan antara kelembaban udara dengan peningkatan partikulat halus, terutama pada lokasi yang memiliki aktivitas manusia padat. Temuan ini mengindikasikan bahwa kualitas udara ambien berperan dalam menurunkan efisiensi fotosintesis, mengganggu respirasi mikroorganisme tanah, dan pada akhirnya mempengaruhi keseimbangan siklus karbon biosfer. Oleh karena itu, pemantauan polusi udara secara berkala menjadi penting dalam mendukung konservasi lingkungan dan mitigasi perubahan iklim di kawasan urban kampus.

Keywords: Partikulat udara, HCHO, TVOC, kelembaban, siklus karbon, kualitas udara ambien

PENDAHULUAN

Kualitas udara ambien merupakan indikator penting dalam menilai kesehatan lingkungan, baik pada skala lokal maupun global. Komposisi atmosfer yang terkontaminasi oleh senyawa partikulat dan gas berbahaya tidak hanya berdampak langsung pada kesehatan manusia, tetapi juga berpotensi memengaruhi berbagai siklus biogeokimia di biosfer, termasuk siklus karbon. Dalam konteks perubahan iklim global dan degradasi lingkungan, pemantauan kualitas udara menjadi semakin penting, terutama dalam kaitannya dengan keseimbangan karbon di atmosfer, tanah, dan biosfer secara keseluruhan.

Polutan udara seperti *particulate matter* (PM), formaldehida (HCHO), dan *total volatile organic compounds* (TVOC) merupakan komponen utama dalam pencemaran

udara modern. PM terdiri dari fraksi ukuran berbeda PM 10, PM 2.5, dan PM 1.0 yang masing-masing memiliki implikasi berbeda terhadap kesehatan manusia dan ekosistem. PM 2.5, misalnya, mampu menembus jauh ke dalam paru-paru dan bahkan memasuki aliran darah, sementara PM 10 lebih berasosiasi dengan iritasi saluran pernapasan atas (WHO, 2021). TVOC dan HCHO, sebagai senyawa organik volatil, dapat bersumber dari aktivitas industri, kendaraan bermotor, serta proses alami seperti respirasi tumbuhan dan pelapukan bahan organik (Guo *et al.*, 2020).

Selain itu, endapan PM yang mengandung karbon atau senyawa organik lain juga dapat mengubah sifat fisikokimia tanah, mengganggu mikroorganisme tanah, dan mempengaruhi dekomposisi bahan organik (Zhou *et al.*, 2021). Mengacu pada realitas tersebut, penting untuk mengkaji hubungan antara parameter-parameter kualitas udara ambient termasuk PM 2.5, PM 1.0, PM 10, TVOC, dan HCHO dengan dinamika karbon dalam biosfer.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilaksanakan di lingkungan Kampus B Universitas Islam Negeri (UIN) Raden Fatah Palembang yang beralamat di Jalan Pangeran Ratu, Kelurahan 5 Ulu, Kecamatan Seberang Ulu I, Kota Palembang, Sumatera Selatan. Waktu pelaksanaan pengambilan data dilakukan selama lima hari berturut-turut, yakni dari tanggal 21 hingga 25 Maret 2025. Kemudian, penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif-deskriptif untuk mengidentifikasi karakteristik polutan udara ambient berdasarkan parameter *Total Volatile Organic Compounds* (TVOC), formaldehida (HCHO), dan partikulat udara berukuran PM1.0, PM2.5, dan PM10. Desain penelitian dilakukan dengan observasi langsung dan pengukuran lapangan secara sistematis di empat titik lokasi strategis, yaitu:

1. BAK (Lokasi 1).
2. Kanal Psikologi (Lokasi 2).
3. Gedung Olahraga (Lokasi 3),
4. Jembatan Kanal (Lokasi 4).

Setiap titik lokasi dipilih berdasarkan variasi aktivitas manusia, jenis vegetasi sekitar, dan kedekatan terhadap sumber polusi potensial seperti jalan atau bangunan tertutup.

Pengumpulan data dilakukan dengan alat pemantau kualitas udara (*Air Quality Monitor/AQM*) yang mengukur lima parameter utama kualitas udara: PM1.0, PM2.5, PM10, HCHO, dan TVOC. Pengukuran dilakukan sebanyak lima kali dalam sehari (pukul 08.00, 10.00, 12.00, 14.00, dan 16.00 WIB) pada masing-masing lokasi. Setiap sesi pengukuran diulang sebanyak lima kali, sehingga total 100 pengukuran dilakukan per hari (4 lokasi \times 5 waktu \times 5 pengulangan).

Data yang dikumpulkan dianalisis secara kuantitatif deskriptif, dengan menghitung nilai rata-rata, simpangan baku, dan distribusi nilai dari setiap parameter. Untuk mengevaluasi keterkaitan antar variabel lingkungan (misalnya kelembaban udara dan konsentrasi PM), digunakan analisis korelasi sederhana. Data juga dianalisis secara spasial untuk membandingkan konsentrasi antar titik lokasi. Analisis ini bertujuan untuk mengidentifikasi potensi kontribusi polutan terhadap gangguan keseimbangan siklus karbon di biosfer, sebagaimana dijelaskan dalam referensi seperti Hallquist *et al.* (2009) dan Grantz *et al.* (2003).

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini mengevaluasi kualitas udara ambien berdasarkan parameter PM2.5, PM1.0, PM10, formaldehida (HCHO), dan senyawa organik volatil total (TVOC) di empat titik lokasi di lingkungan kampus UIN Raden Fatah Palembang selama lima hari.

Hasil pengukuran pada tabel 1 di titik BAK menunjukkan bahwa konsentrasi PM2.5 rata-rata berada di angka 21,35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, dengan PM10 mencapai 26,03 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dan nilai TVOC sebesar 0,075 mg/m^3 . Meski berada dalam rentang moderat, nilai ini menunjukkan adanya potensi gangguan terhadap kualitas udara yang bisa memengaruhi proses respirasi manusia dan vegetasi, terutama jika terakumulasi dalam waktu lama. Paparan partikulat halus dalam jangka panjang terbukti mampu menurunkan efisiensi fotosintesis dan mempercepat pelepasan karbon tanah, sehingga turut berdampak pada keseimbangan karbon di biosfer (Zhou *et al.*, 2021; WHO, 2021).

Tabel 1. Rata-rata harian parameter kualitas udara lokasi 1

Tanggal	Rata-Rata Per Hari						
	PM 2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM 1.0 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM 10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	HCHO (mg/m^3)	TVOC (mg/m^3)	Temp ($^{\circ}\text{C}$)	Hum (%)
21 Maret 2025	23,08	13,72	29,4	0,008272	0,07592	25,56	69,64
22 Maret 2025	20,12	13,92	21,8	0,00748	0,07388	28,4	63,56
23 Maret 2025	16,12	9,2	20,32	0,0094	0,06416	29,48	63,08
24 Maret 2025	21,08	12,24	26,6	0,01032	0,0676	28,52	65,96
25 Maret 2025	26,36	15,12	32,04	0,01304	0,09388	27,72	71,08
Rata- Rata	21,352	12,84	26,032	0,0097024	0,075088	27,936	66,664

Keterangan:

PM 2.5 : *Particulate Matter* $\leq 2.5 \mu\text{m}$

PM 1.0 : *Particulate Matter* $\leq 1.0 \mu\text{m}$

HCHO : Formaldehida

TVOC : *Total Volatile Organic Compounds*

Temp : Temperatur Udara

Hum : Kelembaban Udara

Pada tabel 2 di titik Kanal Psikologi, rerata harian menunjukkan nilai PM2.5 sebesar 21,52 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, dengan HCHO mencapai 0,0126 mg/m^3 dan TVOC di angka 0,0711 mg/m^3 . Angka ini memperlihatkan bahwa wilayah ini mengalami tingkat polusi yang cukup tinggi dibanding titik lainnya, kemungkinan dipengaruhi oleh kedekatan lokasi dengan aktivitas mahasiswa dan lalu lintas pejalan kaki. Senyawa formaldehida yang cukup tinggi di sini perlu diwaspadai karena diketahui bersifat karsinogenik dan mampu menyebabkan stres oksidatif pada tumbuhan (EPA, 2023; Salthammer *et al.*, 2010).

Tabel 2. Rata-rata harian parameter kualitas udara lokasi 2

Tanggal	Rata-Rata Per Hari						
	PM 2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM 1.0 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM 10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	HCHO (mg/m^3)	TVOC (mg/m^3)	Temp ($^{\circ}\text{C}$)	Hum (%)
21 Maret 2025	22,64	13,24	29	0,02136	0,09828	26,96	65,56
22 Maret 2025	17,84	10,32	22,44	0,00732	0,03792	26,88	68
23 Maret 2025	19,44	11,44	32,8	0,0136	0,09228	28,92	64,44
24 Maret 2025	20,2	11,68	25,44	0,00748	0,04852	29,12	62,56
25 Maret 2025	27,48	19,48	33,52	0,0136	0,07852	26,88	71,44
Rata- Rata	21,52	13,232	28,64	0,012672	0,071104	27,752	66,4

Keterangan:

PM 2.5 : *Particulate Matter* $\leq 2.5 \mu\text{m}$

PM 1.0 : *Particulate Matter* $\leq 1.0 \mu\text{m}$

HCHO : Formaldehida

TVOC : *Total Volatile Organic Compounds*

Temp : Temperatur Udara

Hum : Kelembaban Udara

Kemudian pada tabel 3 pengukuran di sekitar Gedung Olahraga menghasilkan rata-rata PM_{2.5} sebesar 21,1 µg/m³ dan TVOC tertinggi dari seluruh titik sebesar 0,0961 mg/m³. Hal ini mengindikasikan bahwa lokasi ini mungkin menerima akumulasi polutan dari berbagai arah akibat pergerakan udara yang terbatas. Konsentrasi formaldehida juga relatif tinggi (0,0161 mg/m³), menunjukkan potensi tekanan oksidatif terhadap organisme tanaman serta bahaya iritasi saluran pernapasan pada manusia (Friedlingstein *et al.*, 2022; Salthammer, 2019).

Tabel 3. Rata-rata harian parameter kualitas udara lokasi 3

Tanggal	Rata-Rata Per Hari						
	PM 2.5 (µg/m ³)	PM 1.0 (µg/m ³)	PM 10 (µg/m ³)	HCHO (mg/m ³)	TVOC (mg/m ³)	Temp (°C)	Hum (%)
21 Maret 2025	23,28	13,76	29,6	0,01344	0,08632	25,6	68,24
22 Maret 2025	19,32	11,28	24	0,014	0,08552	26,4	68,64
23 Maret 2025	16,32	11,92	15,84164	0,0172	0,07548	27,4	67,24
24 Maret 2025	20,08	11,52	25,36	0,0176	0,11496	27,84	66
25 Maret 2025	26,52	14,52	32,32	0,0184	0,1184	28,12	67,48
Rata- Rata	21,104	12,6	25,424328	0,016128	0,096136	27,072	67,52

Keterangan:

PM 2.5 : *Particulate Matter* ≤ 2.5 µm

PM 1.0 : *Particulate Matter* ≤ 1.0 µm

HCHO : Formaldehida

TVOC : *Total Volatile Organic Compounds*

Temp : Temperatur Udara

Hum : Kelembaban Udara

Selanjutnya pada tabel 4 Titik Jembatan Kanal menunjukkan PM_{2.5} tertinggi dengan rerata 22,6 µg/m³, serta kelembaban udara yang juga tertinggi (69,5%), yang menunjukkan bahwa di lokasi ini, akumulasi polutan diperkuat oleh kondisi atmosfer yang lembap. Kelembaban yang tinggi dapat mempercepat reaksi fotokimia di udara, meningkatkan pembentukan partikulat sekunder, serta memengaruhi volatilitas senyawa organik (Zhang *et al.*, 2018; Kanakidou *et al.*, 2005).

Tabel 4. Rata-rata harian parameter kualitas udara lokasi 4

Rata-Rata Per Hari							
Tanggal	PM 2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM 1.0 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM 10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	HCHO (mg/m^3)	TVOC (mg/m^3)	Temp ($^{\circ}\text{C}$)	Hum (%)
21 Maret 2025	24,56	14,24	31,24	0,00936	0,0598	23,4	73,6
22 Maret 2025	24,6	9,48	21,16	0,0108	0,06852	25,96	66,16
23 Maret 2025	17	9,92	20,6	0,01608	0,10544	26,56	67,84
24 Maret 2025	21,12	12,56	26,92	0,01928	0,12532	26,6	70,52
25 Maret 2025	25,76	14,92	30,96	0,01468	0,09756	28,08	69,4
Rata- Rata	22,608	12,224	26,176	0,01404	0,091328	26,12	69,504

Keterangan:

PM 2.5 : *Particulate Matter* $\leq 2.5 \mu\text{m}$

PM 1.0 : *Particulate Matter* $\leq 1.0 \mu\text{m}$

HCHO : Formaldehida

TVOC : *Total Volatile Organic Compounds*

Temp : Temperatur Udara

Hum : Kelembaban Udara

Pada tabel 5 rangkuman dari seluruh titik pengamatan menunjukkan bahwa parameter PM2.5 dan PM1.0 konsisten mendekati ambang batas WHO untuk kualitas udara sehat, sementara TVOC dan HCHO memiliki fluktuasi yang cukup signifikan antar lokasi. Data ini menegaskan bahwa aktivitas manusia lokal, jenis vegetasi, dan struktur bangunan sekitar turut memengaruhi distribusi spasial polutan, yang dapat berdampak pada siklus karbon melalui gangguan terhadap fotosintesis dan respirasi mikroorganisme tanah (Falkowski *et al.*, 2000; Grantz *et al.*, 2003).

Tabel 5. Rata-rata gabungan dari semua titik lokasi

		Data Ambient						
Tanggal	Titik	PM 2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM 1.0 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM 10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	HCHO (mg/m^3)	TVOC (mg/m^3)	Temp ($^{\circ}\text{C}$)	Hum (%)
21 Maret 2025	Lokasi 1	23,08	13,72	29,4	0,008272	0,07592	25,56	69,64
	Lokasi 2	22,64	13,24	29	0,02136	0,09828	26,96	65,56
	Lokasi 3	23,28	13,76	29,6	0,01344	0,08632	25,6	68,24
	Lokasi 4	24,56	14,24	31,24	0,00936	0,0598	23,4	73,6
22 Maret 2025	Lokasi 1	20,12	13,92	21,8	0,00748	0,07388	28,4	63,56
	Lokasi 2	17,84	10,32	22,44	0,00732	0,03792	26,88	68
	Lokasi 3	19,32	11,28	24	0,014	0,08552	26,4	68,64
	Lokasi 4	24,6	9,48	21,16	0,0108	0,06852	25,96	66,16
23 Maret 2025	Lokasi 1	16,12	9,2	20,32	0,0094	0,06416	29,48	63,08
	Lokasi 2	19,44	11,44	32,8	0,0136	0,09228	28,92	64,44
	Lokasi 3	16,32	11,92	15,84164	0,0172	0,07548	27,4	67,24
	Lokasi 4	17	9,92	20,6	0,01608	0,10544	26,56	67,84
24 Maret 2025	Lokasi 1	21,08	12,24	26,6	0,01032	0,0676	28,52	65,96
	Lokasi 2	20,2	11,68	25,44	0,00748	0,04852	29,12	62,56
	Lokasi 3	20,08	11,52	25,36	0,0176	0,11496	27,84	66
	Lokasi 4	21,12	12,56	26,92	0,01928	0,12532	26,6	70,52
25 Maret 2025	Lokasi 1	26,36	15,12	32,04	0,01304	0,09388	27,72	71,08
	Lokasi 2	27,48	19,48	33,52	0,0136	0,07852	26,88	71,44
	Lokasi 3	26,52	14,52	32,32	0,0184	0,1184	28,12	67,48
	Lokasi 4	25,76	14,92	30,96	0,01468	0,09756	28,08	69,4

Keterangan:

PM 2.5 : *Particulate Matter* $\leq 2.5 \mu\text{m}$

PM 1.0 : *Particulate Matter* $\leq 1.0 \mu\text{m}$

HCHO : Formaldehida

TVOC : *Total Volatile Organic Compounds*

Temp : Temperatur Udara

Hum : Kelembaban Udara

Kemudian pada tabel 6 distribusi data dari tanggal 21–25 Maret 2025 menunjukkan bahwa hari terakhir, yakni 25 Maret, mencatatkan angka tertinggi untuk hampir seluruh parameter polusi. Lonjakan ini dapat dikaitkan dengan peningkatan suhu dan kelembaban, yang memengaruhi volatilitas dan akumulasi polutan di udara. Polutan udara seperti TVOC dan HCHO sangat sensitif terhadap suhu dan radiasi matahari, di mana konsentrasi mereka cenderung meningkat pada kondisi panas dan stabil (Seco *et al.*, 2013; Guo *et al.*, 2020).

Tabel 6. Rincian keseluruhan parameter dari semua titik lokasi

Lokasi	PM1	PM2,5	PM10	HCHO	TVOC	Temp	Hum
Lokasi 1	21,3520	12,8400	26,0300	0,0100	0,0750	27,9360	66,6640
Lokasi 2	21,5200	13,2300	28,6400	0,0127	0,0710	27,7520	66,4000
Lokasi 3	21,1040	12,6000	25,4200	0,0160	0,0960	27,0720	67,5200
Lokasi 4	22,6080	12,2200	26,1800	0,0140	0,0910	26,1200	69,5040

Keterangan:

PM 2.5 : *Particulate Matter* $\leq 2.5 \mu\text{m}$

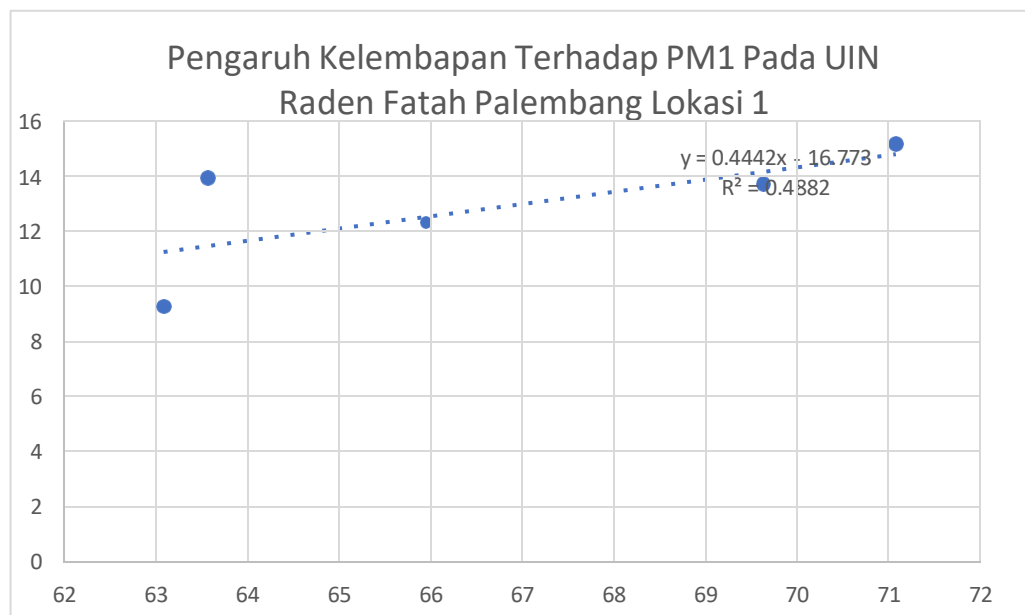
PM 1.0 : *Particulate Matter* $\leq 1.0 \mu\text{m}$

HCHO : Formaldehida

TVOC : *Total Volatile Organic Compounds*

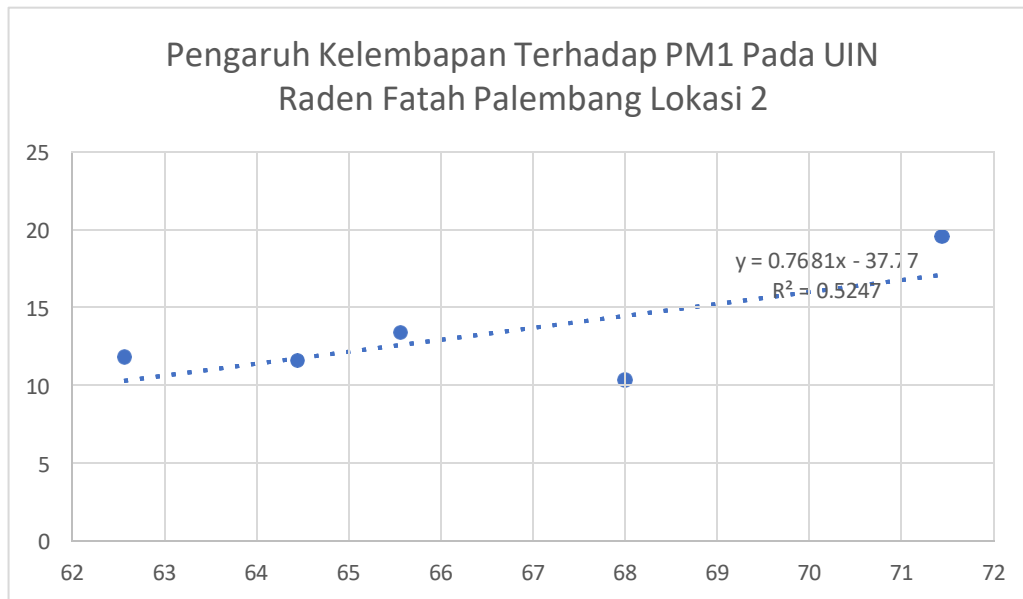
Temp : Temperatur Udara

Hum : Kelembaban Udara



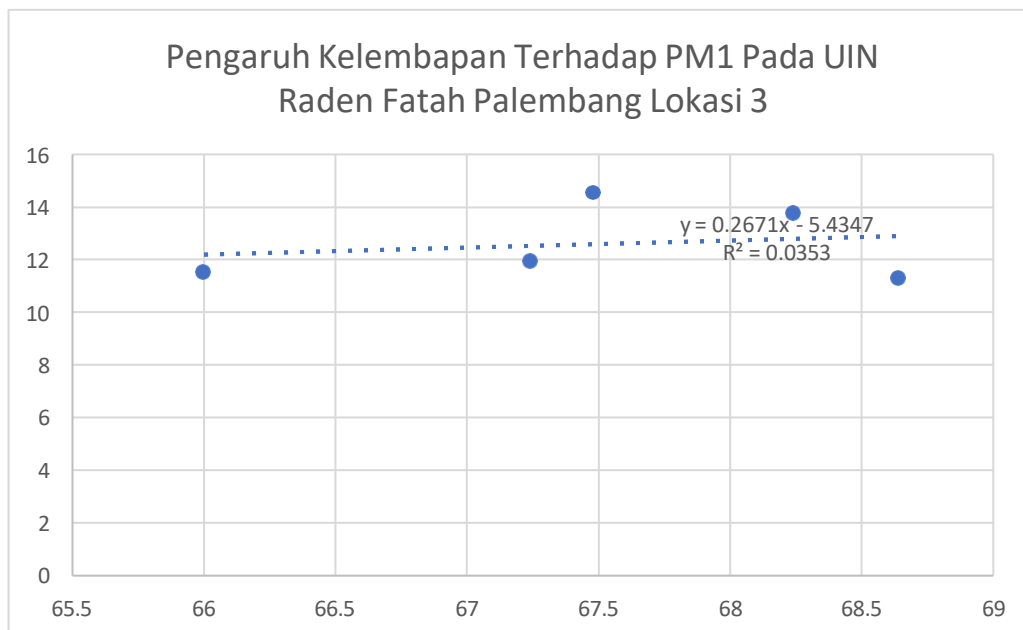
Gambar 1. Hubungan antara kelembapan terhadap PM1.0 lokasi 1

Pada gambar 1 grafik menunjukkan korelasi sedang antara kelembapan dan PM1.0 dengan $R^2 = 0,4882$. Ini mengindikasikan bahwa di titik BAK, peningkatan kelembapan berkontribusi terhadap kenaikan partikel halus di udara. Kelembaban dapat meningkatkan aglomerasi partikel kecil dan memperlambat sedimentasi, sehingga meningkatkan konsentrasi partikulat (Morawska *et al.*, 2008; Kwon *et al.*, 2020).



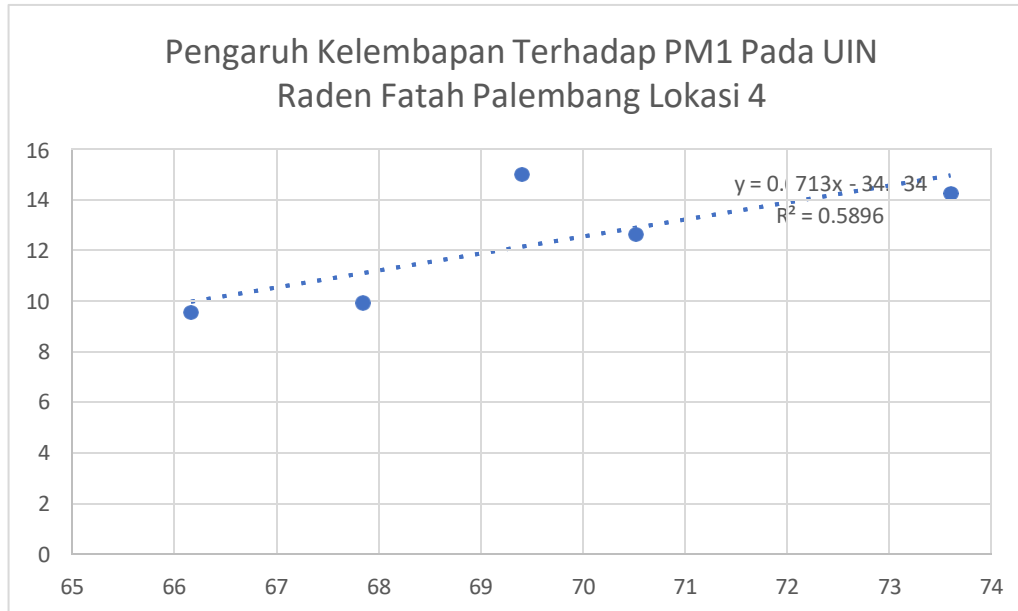
Gambar 2. Hubungan antara kelembapan terhadap PM1.0 lokasi 2

Kemudian pada gambar 2 menunjukkan dengan R^2 sebesar 0,5247, hubungan kelembapan dan PM1.0 di Kanal Psikologi menunjukkan korelasi yang cukup kuat, yang memperkuat hipotesis bahwa kelembapan tinggi di area terbuka dan dekat kanal memperbesar akumulasi partikulat di udara. Kelembapan mempercepat konversi gas menjadi partikel melalui kondensasi senyawa organik (Hallquist *et al.*, 2009; Jimenez *et al.*, 2009)



Gambar 3. Hubungan antara kelembapan terhadap PM1.0 lokasi 3

Pada gambar 3 dengan R^2 hanya 0,0353, grafik ini menunjukkan tidak adanya hubungan signifikan antara kelembaban dan PM1.0, yang dapat diartikan bahwa faktor lain seperti ventilasi alami, tipe vegetasi, dan pola sirkulasi udara lebih dominan dalam memengaruhi konsentrasi partikel di titik ini (Hirabayashi *et al.*, 2019).



Gambar 4. Hubungan antara kelembapan terhadap PM1.0 lokasi 4

Pada gambar 4 di lokasi ini, nilai R^2 sebesar 0,5896 menunjukkan hubungan yang cukup kuat, di mana setiap kenaikan kelembaban berkorelasi dengan peningkatan PM1.0. Hal ini kemungkinan disebabkan oleh efek akumulatif dari kelembaban tinggi dan lalu lintas manusia serta kendaraan, yang memperkaya atmosfer dengan partikel mikro (Kanakidou *et al.*, 2005; Pöschl, 2005).

PENUTUP

Berdasarkan hasil penelitian mengenai karakteristik kualitas udara ambien di empat lokasi kampus UIN Raden Fatah Palembang yang mencakup parameter PM2.5, PM1.0, PM10, formaldehida (HCHO), dan total senyawa organik volatil (TVOC), dapat disimpulkan bahwa lokasi dengan tingkat polusi tertinggi untuk partikulat halus (PM2.5) adalah Jembatan Kanal, sedangkan kadar TVOC dan HCHO tertinggi ditemukan di Gedung Olahraga. Variasi ini menunjukkan bahwa aktivitas manusia, desain bangunan, dan vegetasi sekitar memengaruhi distribusi polutan di lingkungan kampus. Analisis regresi menunjukkan bahwa hubungan antara kelembaban udara dan PM1.0 cukup kuat di lokasi seperti Kanal Psikologi dan Jembatan Kanal ($R^2 > 0,5$), menandakan bahwa kelembaban dapat memperkuat akumulasi partikulat mikro di atmosfer melalui proses kondensasi dan aglomerasi. Paparan polutan seperti TVOC, HCHO, dan PM2.5 secara ekologis dapat menurunkan efisiensi fotosintesis tumbuhan serta mengganggu respirasi

dan dekomposisi bahan organik di tanah. Hal ini berpotensi mengganggu keseimbangan siklus karbon dalam biosfer, sebagaimana ditunjukkan dalam studi sebelumnya (Fares *et al.*, 2013; Friedlingstein *et al.*, 2022). Konsentrasi polutan tertinggi terjadi pada tanggal 25 Maret, yang menunjukkan adanya korelasi antara aktivitas manusia yang meningkat dengan akumulasi polutan di atmosfer, terutama pada hari-hari dengan suhu dan kelembaban yang relatif tinggi.

REFERENSI

- Environmental Protection Agency. (2023). *Formaldehyde*. <https://www.epa.gov/formaldehyde>
- Falkowski, P., Scholes, R. J., Boyle, E., Canadell, J., Canfield, D., Elser, J., ... & Steffen, W. (2000). *The global carbon cycle: A test of our knowledge of Earth as a system*. *Science*, 290(5490), 291-296. <https://doi.org/10.1126/science.290.5490.291>
- Fares, S., Paoletti, E., & Loreto, F. (2013). Impact of ozone on plants: A review of long-term exposure and short-term mechanisms. *Environmental Pollution*, 183, 71–80. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.01.062>
- Friedlingstein, P., Jones, M. W., O'Sullivan, M., Andrew, R. M., Hauck, J., Olsen, A., *et al.* (2022). Global carbon budget 2022. *Earth System Science Data*, 14(11), 4811–4900. <https://doi.org/10.5194/essd-14-4811-2022>
- Grantz, D. A., Garner, J. H. B., & Johnson, D. W. (2003). Ecological effects of particulate matter. *Environment International*, 29(2–3), 213–239. [https://doi.org/10.1016/S0160-4120\(02\)00181-2](https://doi.org/10.1016/S0160-4120(02)00181-2)
- Guo, H., Wang, T., Blake, D. R., Simpson, I. J., & Kwok, Y. H. (2020). Volatile organic compounds in ambient air and their roles in ozone formation in the Pearl River Delta, China. *Atmospheric Environment*, 38(35), 7351–7363. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.09.044>
- Hallquist, M., Wenger, J. C., Baltensperger, U., Rudich, Y., Simpson, D., Claeys, M., ... & Fuzzi, S. (2009). The formation, properties and impact of secondary organic aerosol: Current and emerging issues. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(14), 5155–5236. <https://doi.org/10.5194/acp-9-5155-2009>
- Hirabayashi, S., Kroll, C. N., & Nowak, D. J. (2019). Urban forest effects on carbon emissions and air pollution mitigation. *Environmental Pollution*, 245, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.10.114>

- Jimenez, J. L., Canagaratna, M. R., Donahue, N. M., Prevot, A. S. H., Zhang, Q., Kroll, J. H., ... & Worsnop, D. R. (2009). Evolution of organic aerosols in the atmosphere. *Science*, 326(5959), 1525–1529. <https://doi.org/10.1126/science.1180353>
- Kanakidou, M., Seinfeld, J. H., Pandis, S. N., Barnes, I., Dentener, F. J., Facchini, M. C., ... & Van Dingenen, R. (2005). Organic aerosol and global climate modelling: a review. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 5(4), 1053–1123. <https://doi.org/10.5194/acp-5-1053-2005>
- Kwon, H. S., Ryu, M. H., & Carlsten, C. (2020). Ultrafine particles: unique physicochemical properties relevant to health and disease. *Experimental & Molecular Medicine*, 52(3), 318–328. <https://doi.org/10.1038/s12276-020-0405-1>
- Morawska, L., Ristovski, Z., Jayaratne, E. R., Keogh, D. U., & Ling, X. (2008). Ambient nano and ultrafine particles from motor vehicle emissions: characteristics, ambient processing and implications on human exposure. *Atmospheric Environment*, 42(35), 8113–8138. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.07.050>
- Pöschl, U. (2005). Atmospheric aerosols: composition, transformation, climate and health effects. *Angewandte Chemie International Edition*, 44(46), 7520–7540. <https://doi.org/10.1002/anie.200501122>
- Salthammer, T. (2019). *Very volatile organic compounds: An understudied class of indoor air pollutants*. *Indoor Air*, 29(4), 605–614. <https://doi.org/10.1111/ina.12547>
- Salthammer, T., Mentese, S., & Marutzky, R. (2010). Formaldehyde in the indoor environment. *Chemical Reviews*, 110(4), 2536–2572. <https://doi.org/10.1021/cr800399g>
- Seco, R., Peñuelas, J., & Filella, I. (2013). Short-chain oxygenated VOCs: Emission and uptake by plants and atmospheric sources, sinks, and concentrations. *Atmospheric Environment*, 75, 128–137. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.04.029>
- WHO (World Health Organization). (2021). *WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>
- Zhang, R., Jing, J., Tao, J., Hsu, S. C., Wang, G., Cao, J., ... & Zhu, L. (2018). Chemical characterization and source apportionment of PM_{2.5} in Beijing: Seasonal perspective. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(14), 7053–7074. <https://doi.org/10.5194/acp-13-7053-2013>
- Zhou, Y., Levy, J. I., Evans, J. S., Hammitt, J. K., & Spengler, J. D. (2021). The influence of particulate matter on soil carbon and microbial activity in forest ecosystems. *Journal of Environmental Management*, 285, 112174. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112174>