

PM2.5 Concentration Pattern in ASEAN Countries Based on Population Density

Pola Konsentrasi PM2.5 di Negara-negara ASEAN Berdasarkan Kepadatan Penduduk

Achmad Yahya Teguh Panuju¹, Mustofa Usman²
{achmad.yahya@eng.unila.ac.id^{1*}}

Program Studi Doktor Ilmu Lingkungan, Universitas Lampung¹, Jurusan Matematika,
Universitas Lampung²

Abstract. *The concentration of PM2.5 in ambient air is one of the indicators of air quality that affects public health. This pollutant is considered hazardous due to its small size, which allows it to enter the lungs and remain suspended in the air for a considerable amount of time. Identifying the patterns of PM2.5 concentration distribution is important to recognize the influential factors in increasing PM2.5 concentrations, thus enabling better formulation of solutions. This study analyzed the patterns of PM2.5 concentrations in three ASEAN countries: Indonesia, Vietnam, and Thailand. Four randomly selected measurement locations were chosen in each country, with two locations in densely populated areas and two others in low-density areas. The sample data of PM2.5 concentrations were analyzed using nested factor analysis of variance, which allowed the relationship between the taken parameters, namely country, location, and population density classification, to be determined. The results revealed that all parameters had a significant influence on PM2.5 concentrations.*

Keywords – PM2.5 Concentrations; Population Density; Nested Factor ANOVA

Abstrak. *Konsentrasi PM2.5 di udara ambien merupakan salah satu tolak ukur kualitas udara yang berpengaruh pada kesehatan masyarakat pada suatu wilayah. Polutan ini dianggap berbahaya karena ukurannya sangat kecil, sehingga dapat memasuki paru-paru dan mengambang di udara dalam waktu yang cukup lama. Identifikasi pola sebaran konsentrasi PM2.5 penting untuk dilakukan sebagai upaya mengenali aspek-aspek yang berpengaruh dalam peningkatan konsentrasi PM2.5, sehingga perumusan solusi dapat dilakukan lebih baik. Penelitian ini menganalisis pola konsentrasi PM2.5 di tiga negara ASEAN yaitu Indonesia, Vietnam dan Thailand. Di setiap negara dipilih empat lokasi pengukuran secara acak, di mana dua lokasi berada pada wilayah dengan kepadatan penduduk tinggi, dan dua lainnya memiliki kepadatan rendah. Data konsentrasi PM2.5 sampel dianalisis menggunakan metode analisis varians dengan faktor bersarang, sehingga dapat diketahui hubungan antara parameter yang diambil yaitu negara, lokasi dan klasifikasi kepadatan penduduk. Dari hasil pengolahan ini didapatkan bahwa semua parameter memiliki pengaruh yang signifikan terhadap konsentrasi PM2.5.*

Kata Kunci – konsentrasi PM2.5; kepadatan populasi; ANOVA faktor bersarang

I. PENDAHULUAN

Pencemaran udara telah menjadi isu yang krusial untuk dibahas selama 1 dekade terakhir. Hal ini dipicu oleh kesadaran tentang tingginya peningkatan pencemaran udara di dunia dan keterkaitannya dengan penurunan tingkat kesehatan manusia secara umum. Salah satu penyebab dari pola penurunan kesehatan ini adalah karena banyaknya polutan yang terhisap ke dalam tubuh manusia sehingga menimbulkan berbagai gangguan pada metabolisme tubuh [1]. Fenomena ini sangat terlihat dampaknya di kota-kota besar, dan hal ini ditengarai berhubungan dengan padatnya populasi penduduk di wilayah perkotaan [2]. Secara umum, populasi penduduk di kota-kota besar di berbagai negara terus bertambah, dan hal ini juga menyebabkan eskalasi aktivitas yang meliputi aktivitas produksi, transportasi, rekreasi dan lainnya. Setiap aktivitas ini menghasilkan emisi polutan ke udara ambien, di mana beberapa sektor utama yang paling banyak berkontribusi terhadap produksi emisi adalah sektor transportasi, industri dan perkantoran. Ada pun beberapa polutan yang kerap dibahas antara lain adalah gas-gas berbahaya CO, NO₂ atau SO₂, serta partikulat halus yang mengambang di udara yang disebut sebagai PM atau *particulate matters* [3].

Di antara polutan tersebut, PM2.5 merupakan tipe polutan yang mendapatkan perhatian khusus karena ukurannya yang amat kecil yaitu berdiameter lebih kecil dari 2,5 mikron, sehingga dapat memasuki alveoli pada paru-paru. Penelitian sebelumnya telah mengidentifikasi beberapa penyakit mematikan yang bermula dari masuknya PM2.5 ke dalam tubuh seseorang, di antaranya kanker paru-paru dan penyakit kardiovaskular [4]. Ditambah lagi PM2.5 memiliki masa mengambang di udara yang cukup lama, sehingga meningkatkan risiko terhisap ke dalam tubuh manusia dan menyebabkan berbagai gangguan kesehatan. Di lokasi dengan kepadatan yang tinggi dan dalam kondisi kering tanpa

hujan, PM2.5 dapat mencapai konsentrasi yang amat tinggi. Pada penelitian sebelumnya telah diketahui bahwa kadar PM2.5 di Jakarta mencapai tingkat tertinggi pada musim kemarau, serta terendahnya pada musim hujan [5].

PM2.5 dihasilkan dari berbagai aktivitas manusia, di mana salah satu yang utama adalah dari proses pembakaran bahan bakar fosil. Karena itu sektor transportasi ditengarai sebagai sektor yang memiliki kontribusi paling tinggi terhadap kadar PM2.5. Tentunya kepadatan populasi penduduk juga akan memiliki keterkaitan dengan tingginya aktivitas transportasi di suatu wilayah [6]. Negara-negara yang telah cukup berhasil dalam mengembangkan sistem transportasi yang ramah lingkungan, yaitu dengan meningkatkan peran kendaraan transportasi umum berbasis listrik, maupun negara dengan jumlah penduduk bersepeda cukup tinggi, relatif mampu mereduksi emisi di sektor transportasi. Namun kebanyakan negara berkembang seperti negara-negara di Asia Tenggara (ASEAN) masih memiliki masalah serius terkait pesatnya pertumbuhan kendaraan bermotor baik di perkotaan maupun wilayah pedesaan [7, 8].

Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi pola konsentrasi PM2.5 di negara-negara Asia Tenggara berdasarkan kepadatan penduduk, sebagai salah satu modal untuk menganalisis penyebab tingginya konsentrasi PM2.5 di udara ambien. Penelitian dengan tema dan metode serupa belum ditemukan pada artikel-artikel ilmiah yang ada pada saat ini, sedangkan identifikasi pola ini dibutuhkan untuk perumusan strategi lebih lanjut sebagai solusi reduksi polutan di masa yang akan datang. Diharapkan bahwa hasil dari penelitian ini dapat menjadi kontribusi dalam bidang keilmuan ilmu lingkungan khususnya dan bermanfaat pula bagi para pemegang kebijakan yang terkait untuk mencapai tingkat keberlanjutan yang lebih baik di negara-negara Asia Tenggara pada umumnya.

II. METODE

Penelitian sebelumnya telah menganalisis konsentrasi PM2.5 di kota Jakarta dan Taipei [9]. Dalam penelitian tersebut didapatkan bahwa kadar PM2.5 memiliki korelasi positif terhadap area perumahan, kelembaban dan temperatur udara. Secara umum ditemukan bahwa konsentrasi PM2.5 di Jakarta lebih tinggi dibandingkan Taipei. Dalam penelitian lain di Vietnam pada masa COVID-19, konsentrasi PM2.5 dianalisis secara statistik. Beberapa temuan yang penting antara lain adalah bahwa konsentrasi PM2.5 dipengaruhi secara signifikan oleh jam sibuk, serta menurun cukup drastis pada masa pembatasan mobilitas masyarakat [10]. Konsentrasi PM2.5 di udara cenderung fluktuatif secara dinamis dan mengalami perubahan setiap hari. Namun kecenderungannya dapat dilihat melalui pengamatan dalam kurun waktu yang memadai. Secara umum, konsentrasi PM2.5 akan meningkat pada saat tingkat aktivitas manusia naik [11]. Nilai ambang batas (NAB) pada penelitian ini diambil berdasarkan Peraturan BMKG nomor 2 tahun 2020, di mana konsentrasi PM2.5 yang masih dianggap aman berada pada level sedang, dengan nilainya sebesar 65 $\mu\text{gram}/\text{m}^3$.

Data PM2.5 pada artikel ini merupakan data sekunder yang diambil situs www.aqicn.org, sebuah organisasi nirlaba internasional yang menyediakan data kualitas udara untuk berbagai negara. Sampel data yang dipakai pada analisis ini diambil dari tanggal 1 – 31 Maret tahun 2022. Data pada penelitian ini diambil dari titik-titik pengukuran yang tersebar di berbagai negara, di mana wilayah Asia Tenggara ditetapkan sebagai wilayah sampel karena negara-negara di dalamnya banyak memiliki kemiripan karakteristik dalam hal populasi. Negara Indonesia, Thailand dan Vietnam dipilih sebagai sampel negara dengan pertimbangan kelengkapan data yang tersedia pada rentang waktu yang dimaksud. Kemudian lokasi-lokasi dari ketiga negara tersebut diklasifikasikan ke dalam kategori populasi padat dan tidak padat berdasarkan data kependudukan yang ada di internet. Setelah itu dari setiap grup hasil klasifikasi dipilih 2 lokasi secara random, sehingga total lokasi untuk setiap negara adalah 4 lokasi untuk dianalisis sebagaimana diberikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Lokasi Data PM2.5

Negara	Lokasi Populasi Padat (HD)	Lokasi Populasi Rendah (LD)
Indonesia	Palembang	Banjar Baru
	Jambi	Kototabang
Vietnam	Hanoi	Gia Lai
	Viet Tri	Cao Bang
Thailand	Bangkok (CH)	Saraburi
	Bangkok (RPO)	Prachin Buri

Dalam pengolahan data, parameter negara diberi notasi CNT (*country*), parameter klasifikasi kepadatan penduduk dengan LV (*level of density*), sedangkan lokasi pengukuran menggunakan notasi *City*. Namun ketiga parameter ini tentunya tidak berdiri sendiri, melainkan terdapat interaksi antar parameter. Karena itu metode statistik yang digunakan adalah analisis varians dengan faktor bersarang (*nested factor analysis of variance* / ANOVA), sesuai dengan kompleksitas data yang didapatkan. Dengan metode ini, selain dapat terlihat pengaruh dari setiap parameter terhadap luaran yang berupa konsentrasi PM2.5, namun juga dapat dilihat dan dianalisis pengaruh interaksi antar parameter terhadap luaran. Selain itu pada bagian hasil juga ditampilkan grafik konsentrasi PM2.5 secara harian berbasis interaksi parameter, sehingga dapat dianalisis lebih jauh terkait dinamika PM2.5 di setiap lokasi.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Luaran yang akan dianalisis dari data pada penelitian ini adalah konsentrasi PM2.5, sedangkan parameter yang ditentukan pada penelitian ini adalah negara, klasifikasi kepadatan penduduk dan lokasi pengukuran. Model dirumuskan pada persamaan 1.

$$PM_{2.5} = \mu + C_i + Lv_j + City(C.Lv) + (C_i * Lv) + \varepsilon_{ijk} \quad (1)$$

Untuk menguji signifikansi dari model yang telah diformulasikan ini maka data diolah menggunakan metode ANOVA, dan hasilnya dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Analisis Varians untuk Tes Model

Sumber	DF	Jumlah kuadrat	Rerata Kuadrat	F Value	Pr > F
Model	11	222295.3219	20208.6656	48.89	<.0001
Error	357	147574.9274	413.3751		
Total Terkoreksi	368	369870.2493			

Dari hasil uji F=48,89 dengan p-value <0.0001. Jadi tolak Ho, ini berarti model sangat signifikan.

Tabel 3. Identifikasi R-Square

R-Square	Coeff Var	Root MSE	PM25 Mean
0.601009	31.90733	20.33163	63.72087

Dari tabel 3 diperoleh R-square=0.6010 yang berarti 60,1 % keragaman PM2.5 dijelaskan oleh model.

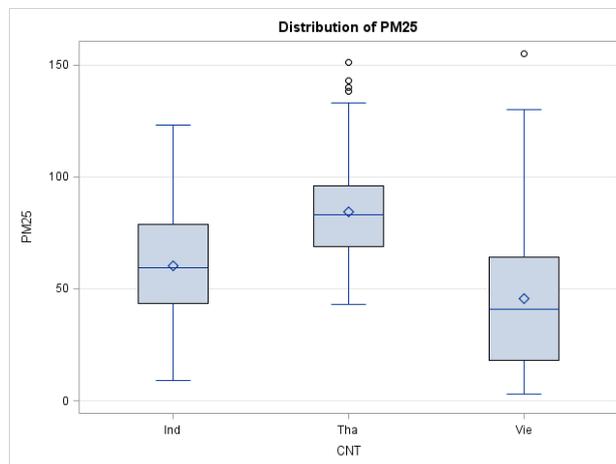
Tabel 4. Analisis varians

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
CNT	2	94857.22513	47428.61256	114.74	<.0001
LV	1	6922.51884	6922.51884	16.75	<.0001
CNT*LV	2	25679.75330	12839.87665	31.06	<.0001
CITY(CNT*LV)	6	94835.82463	15805.97077	38.24	<.0001

Untuk menguji apakah ada perbedaan rata2 PM2.5 di Indonesia, Thailand dan Vietnam, maka dilakukan uji hipotesis sebagaimana diberikan pada persamaan 2.

$$H_0: \mu_{Ind} = \mu_{Tha} = \mu_{Vie} \quad (2)$$

Dari tabel 4 diperoleh uji F=114,74 dengan p value <0.0001 dan disimpulkan tolak Ho, jadi ada perbedaan rata-rata PM2.5 di tiga negara tersebut. Perbedaan nilai rata-rata dan keragamannya dapat dilihat pada box plot pada Gambar 1.



Gambar 1. Box Plot Distribusi PM2.5 Berdasarkan Negara

Dari gambar 1, menunjukkan rata-rata PM2.5 di mana rata-rata tertinggi adalah Thailand, kemudian Indonesia, dan Vietnam. Box plot (Gambar 1) menunjukkan bahwa berdasarkan kriteria, Indonesia 50% di atas NAB, sedangkan Thailand sekitar 70% di atas NAB. Sedangkan Vietnam 80% di bawah NAB, sehingga kualitas udara di Vietnam sangat baik jika dibandingkan kualitas udara di Indonesia, apalagi dibandingkan dengan Thailand. Sedangkan dilihat dari keragaman, nampaknya tidak terlalu terlihat perbedaan secara khusus.

Tabel 5.

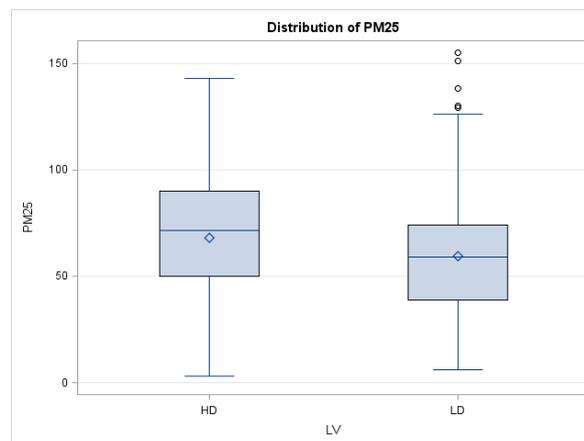
Comparisons significant at the 0.05 level are indicated by ***.			
CNT	Difference	Simultaneous 95% Confidence	
Comparison	Between Means	Limits	
Tha - Ind	24.089	18.012	30.166
Tha - Vie	38.952	32.838	45.067
Ind - Vie	14.864	8.749	20.978

Dari tabel 5, multiple comparison dengan menggunakan uji Tukey, perbedaan antara Indonesia dan Thailand sebesar 24,089 dan sangat signifikan (***). Perbandingan antara Thailand dan Vietnam dengan selisih rata-rata 38,952 dan perbedaan ini sangat signifikan (***). Perbandingan Indonesia dan Vietnam di mana selisih rata-ratanya 14,864.

Dari tabel 4, untuk uji level density dengan hipotesis pada persamaan 3.

$$H_0: \mu_{HD} = \mu_{LD} \quad (3)$$

Dari uji F, diperoleh F 16,75 dengan p-value <0.0001 yang berarti sangat signifikan, menunjukkan adanya perbedaan rata-rata PM2.5 dilihat dari klasifikasi kepadatan penduduk.



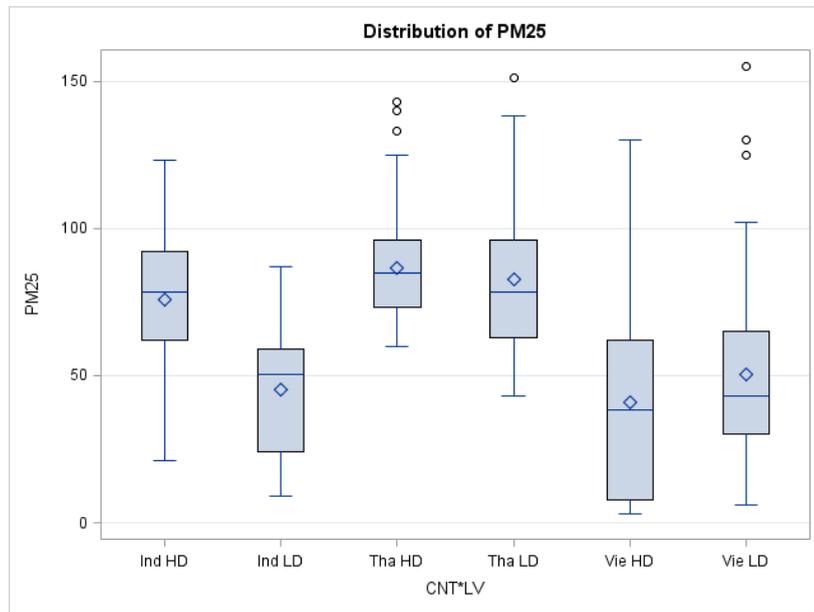
Gambar 2. Box Plot Distribusi PM2.5 Berdasarkan Klasifikasi Kepadatan Penduduk

Gambar 2 menunjukkan rata-rata PM2.5 untuk kota dengan kepadatan penduduk tinggi memiliki nilai yang lebih besar dibandingkan kota-kota dengan kepadatan yang rendah. Berdasarkan kriteria level pencemaran, sebagian besar data PM2.5 untuk LD populasi yaitu 70% di bawah NAB. Sedangkan untuk kota-kota HD, data di bawah ambang adalah sekian 30 %. Sedangkan keragamannya relatif sama.

Kembali pada tabel 4, untuk menguji interaksi antara parameter negara dan klasifikasi kepadatan penduduk maka dibuat hipotesis sebagaimana diberikan pada persamaan 4.

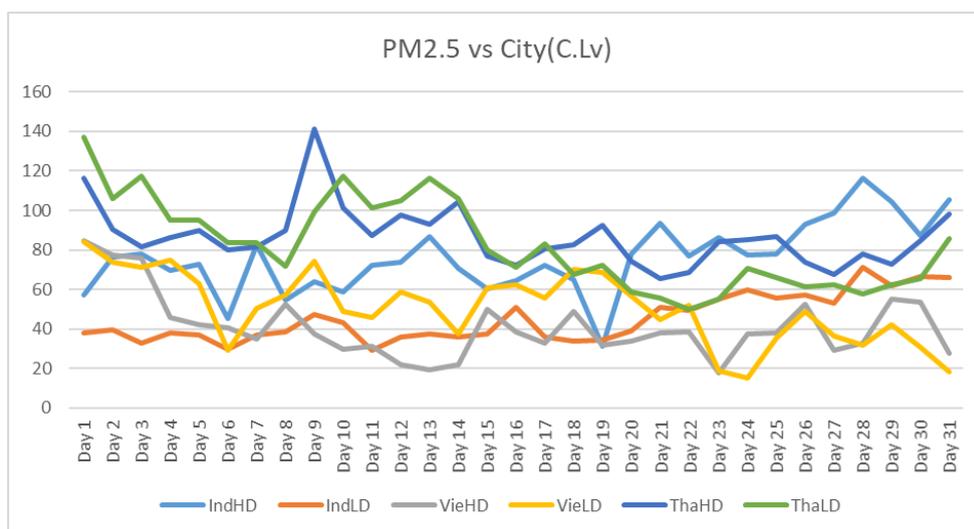
$$H_0: \mu_{Ind.HD} = \mu_{Ind.LD} = \mu_{Tha.HD} = \mu_{Tha.LD} = \mu_{Vie.HD} = \mu_{Vie.LD} \quad (4)$$

Dari tabel 4, uji F 31,06 dengan p-value <0.0001, sangat signifikan. Jadi ditolak H_0 , yang berarti ada interaksi antara negara dan klasifikasi kepadatan penduduk.



Gambar 3. Box Plot Distribusi PM2.5 Berdasarkan Interaksi C dan LV

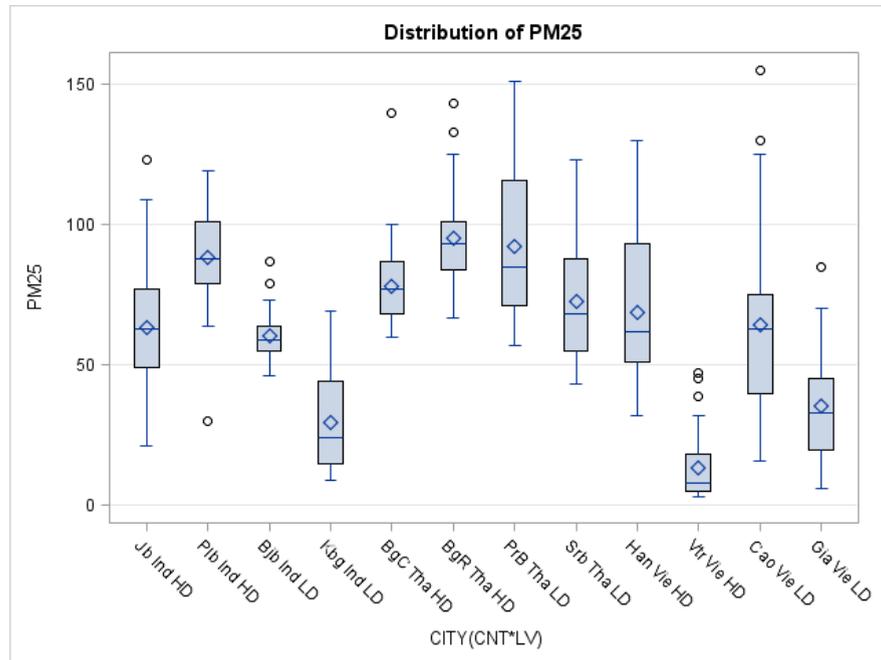
Gambar 3 menunjukkan rata-rata PM2.5 yang tinggi adalah Tha.HD, Tha.LD dan Ind.HD. Sedangkan PM2.5 yang rendah adalah Ind.LD, Vie.HD dan Vie.LD. Gambar ini menunjukkan 2 grup, yaitu yang tinggi dan rendah, dengan rata-rata di atas 75, di mana Ind.HD rata-ratanya 75,90. Tha.HD 86,64 dan Tha.LD 82,53. Di grup ke-2, Ind.LD, Vie.HD dan Vie.LD rata-ratanya di bawah 50, menunjukkan tingkat pencemaran yang rendah, mengacu pada kriteria NAB 65, di mana Ind.LD 45,09, Vie.HD 41,06 dan Vie.LD 50,44. Sedangkan jika dilihat dari keragaman, nampak bahwa Ind.LD dan Tha.HD keragamannya nampak lebih kecil dibanding yang lain. Membentuk 3 grup, yaitu Ind.LD dan Tha.HD, Ind.HD dan Tha.LD, serta Vie.HD dan Vie.LD.



Gambar 4. Konsentrasi PM2.5 selama 1 Bulan Berdasarkan Interaksi C dan LV

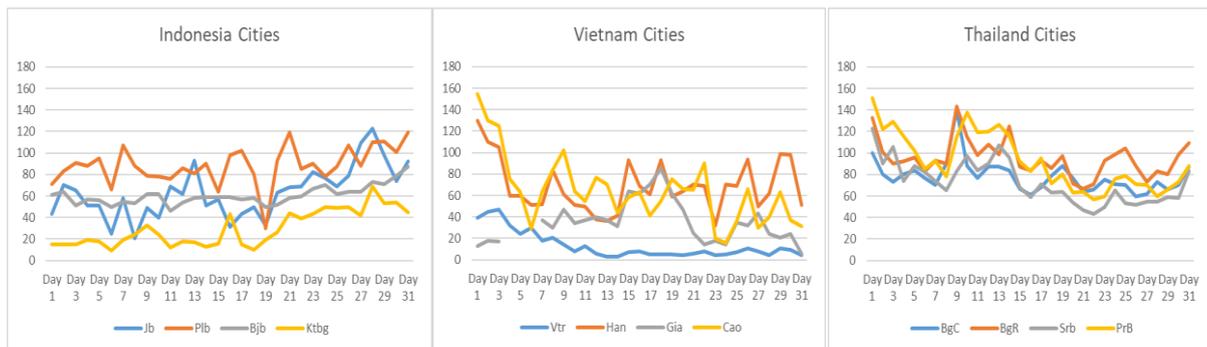
Dari tabel 4, parameter lokasi disarangkan kepada parameter negara dan klasifikasi kepadatan penduduk. Dari uji F 38,24 dengan p-value <0.0001, sangat signifikan. Yang berarti ada perbedaan rata-rata PM2.5 di dalam kategori interaksi parameter ini. Gambar 4 memberikan dinamika perubahan konsentrasi PM2.5 dari hari ke hari berdasarkan interaksi negara dan klasifikasi kepadatan penduduk. Secara umum terdapat pola penurunan konsentrasi sejak awal bulan, kemudian kembali naik menjelang pertengahan bulan. Sementara di akhir bulan terdapat dua pola yang

berbeda, yaitu pola naik untuk Indonesia dan Thailand, dan pola turun untuk Vietnam baik pada klasifikasi kepadatan penduduk tinggi maupun rendah.



Gambar 5. Box Plot Distribusi PM2.5 Berdasarkan Interaksi City(CNT*LV)

Dari gambar 5, tampak beberapa lokasi memiliki rata-rata konsentrasi PM2.5 berada di atas NAB. Lokasi-lokasi tersebut antara lain adalah Palembang, Jambi, Bangkok (CH dan RPO), Prachin Buri, Saraburi, Hanoi dan Cao Bang. Hampir semua lokasi dengan kepadatan penduduk tinggi masuk dalam kategori ini, kecuali Viet Tri di Vietnam. Bahkan Viet Tri memiliki konsentrasi PM2.5 yang paling rendah dibandingkan seluruh lokasi yang lain. Tiga lokasi yang berkepadatan penduduk rendah juga masuk dalam kategori PM2.5 cukup tinggi, yaitu Prachin Buri, Saraburi dan Cao Bang. Bahkan Prachin Buri pada hari-hari tertentu memiliki konsentrasi PM2.5 yang sangat tinggi.



Gambar 6. Konsentrasi PM2.5 Harian Berdasarkan Negara

Gambar 6 menunjukkan konsentrasi PM2.5 harian di setiap lokasi, dan dikelompokkan berdasarkan asal negara. Lokasi di Indonesia menunjukkan pola naik, Vietnam menunjukkan pola turun, sedangkan Thailand menunjukkan pola turun di awal, namun naik kembali di akhir bulan.

Hasil ini menunjukkan bahwa segera perlu dilakukan implementasi solusi untuk mereduksi konsentrasi PM2.5 di lokasi-lokasi yang memiliki konsentrasi PM2.5 tinggi, karena bahaya dari polutan ini terhadap kesehatan manusia. Mengacu pada data pada penelitian ini, populasi memiliki pengaruh yang signifikan terhadap konsentrasi PM2.5, namun tidak selamanya demikian. Ada kemungkinan bagi lokasi dengan populasi padat untuk tetap memiliki kualitas udara yang baik. Aktivitas masyarakat hanya dapat ditekan melalui kejadian luar biasa seperti yang terjadi masa pandemi COVID 19 [10], namun dampak lingkungan dari aktivitas tersebut masih dapat direduksi melalui strategi lain, misalnya melalui pemakaian produk-produk yang lebih ramah lingkungan [12]. Dalam konteks transportasi

misalnya, pemakaian kendaraan listrik akan memberikan efek signifikan untuk mereduksi kadar polutan di udara termasuk PM2.5. Strategi lain adalah dengan melakukan edukasi dan upaya-upaya perbaikan perilaku masyarakat, misalnya untuk lebih sering berjalan kaki atau menggunakan sepeda dalam aktivitas harian mereka.

VI. KESIMPULAN

Konsentrasi PM2.5 di suatu wilayah merupakan isu lingkungan yang perlu dicermati terutama karena kaitannya dengan permasalahan kesehatan masyarakat. Penelitian ini menganalisis sebaran konsentrasi PM2.5 di tiga negara ASEAN yaitu Indonesia, Vietnam dan Thailand selama satu bulan menggunakan metode nested factors ANOVA. Hasil pengolahan data menunjukkan bahwa ketiga parameter yaitu negara, tingkat kepadatan penduduk dan lokasi pengukuran semuanya memiliki pengaruh yang signifikan terhadap konsentrasi PM2.5 di udara ambien. Secara umum, Thailand memiliki rata-rata konsentrasi PM2.5 yang tertinggi dibandingkan dua negara lainnya, sedangkan Vietnam adalah yang paling rendah. Wilayah dengan kepadatan penduduk tinggi memiliki konsentrasi PM2.5 yang lebih tinggi dibandingkan wilayah dengan kepadatan rendah. Terdapat 8 lokasi yang memiliki rata-rata konsentrasi PM2.5 yang lebih tinggi dari NAB dalam kurun waktu pengambilan data.

Hasil di atas menunjukkan bahwa secara umum kualitas udara pada wilayah-wilayah yang diamati masih perlu untuk diperbaiki, baik melalui pendekatan teknologi, edukasi dan tentunya kebijakan. Temuan-temuan yang diperoleh dalam penelitian ini diharapkan dapat dimanfaatkan oleh peneliti lainnya dalam pengembangan keilmuan yang terkait, serta merumuskan solusi untuk mereduksi dampak lingkungan secara lebih akurat di masa yang akan datang.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada www.aciqn.org untuk data yang disediakan, serta kepada seluruh pihak lain yang memiliki kontribusi dalam penulisan artikel ini.

REFERENSI

- [1] A. D. Susanto, Air pollution and human health. *Med J Indones*. Vol. 29, No. 1, 2020, pp 8-10.
- [2] M. J. Kim, Y. S. Chang, S. M. Kim, Impact of Income, Density, and Population Size on PM2.5 Pollutions: A Scaling Analysis of 254 Large Cities in Six Developed Countries, *Int J Environ Res Public Health*, Vol. 18, No. 17., 2021.
- [3] Z. Li, Y. Wang, Z. Xu, Y. Cao, Characteristics and sources of atmospheric pollutants in typical inland cities in arid regions of central Asia: A case study of Urumqi city. *PLoS ONE*, Vol. 16, No. 4, 2021.
- [4] P. Thangavel, D. Park, Y. C. Lee, Recent Insights into Particulate Matter (PM2.5)-Mediated Toxicity in Humans: An Overview, *Int J Environ Res Public Health*, Vol. 19, No. 12, 2022.
- [5] D. Gusnita, N. Cholianawati, Pola konsentrasi dan trayektori polutan PM2.5 serta faktor meteo di kota Jakarta, *Jurnal Kimia dan Pendidikan Kimia*, Vol 4, No. 3, 2019.
- [6] B. Haryanto, B. Resosoedarmo, S. T. B. Utami, B. Hartono, E. Hermawati, Effect of Ambient Particulate Matter 2.5 Micrometer (PM2.5) to Prevalence of Impaired Lung Function and Asthma in Tangerang and Makassar, *Jurnal Kesehatan Masyarakat Nasional*, Vol 10, No. 4, 2016.
- [7] S. Kaffashi, M. N. Shamsudin, M. S. Clark, S. F. Sidique, A. Radam, Road Transport System in Southeast Asia; Problems and Economic Solutions, *Curr World Environ*, Vol. 11, No. 1, 2016.
- [8] A. Y. T. Panuju, Desain Produk Ramah Lingkungan di Indonesia: Tantangan dan Peluang di Masa Depan, Graha Ilmu, 2021.
- [9] W. L. Kusuma, W. Chih-Da, Z. Yu-Ting, H. H. Hapsari, J. L. Muhamad, PM2.5 Pollutant in Asia — A Comparison of Metropolis Cities in Indonesia and Taiwan, *Int. J. Environ. Res. and Public Health*, Vol 16, 2019.
- [10] G. T. H. Nguyen, H. Hoang-Cong, L. T. La, Statistical Analysis for Understanding PM2.5 Air Quality and the Impacts of COVID-19 Social Distancing in Several Provinces and Cities in Vietnam, *Water Air Soil Pollut*, Vol. 234, No. 2, 2023.
- [11] A. R. Perdana, A. I. Pangastuti, Y. D. Haryanto, Analisis konsentrasi PM10 dan PM2.5 pada titik pemantauan Bundaran HI Jakarta Pusat periode data Februari – Oktober 2021, *Jurnal Kajian Ilmu dan Pendidikan Geografi*, Vol. 6, No. 1, 2023.
- [12] A. Y. T. Panuju, M. Martinus, A. Riszal, H. Kobayashi, Sustainable Design Implementation— Measuring Environmental Impact and User Responsibility, *Int. J. Automation Technology*, Vol. 16, No. 6, 2022.