

## **Dampak Konsentrasi Pm2.5 Terhadap Harapan Hidup Di Negara-Negara Asean: Analisis Data Panel Tahun 2005-2020**

**Putri Sabila<sup>1</sup>, Nasywa Febriane<sup>2</sup>, Keisya Inayah<sup>3</sup>, Wahyu Destiani<sup>4</sup>, Fitri Amalia<sup>5</sup>**  
<sup>1,2,3,4,5</sup> Fakultas Ekonomi dan Bisnis, Universitas Islam Negeri Syarif Hidayatullah Jakarta, Jakarta, Indonesia

### **Article Info**

#### **Article history:**

Received November 10, 2025  
Revised November 12, 2025  
Accepted November 21, 2025

#### **Kata Kunci:**

PM2.5,  
Polusi udara,  
Harapan hidup,  
ASEAN,  
Data panel

#### **Keywords:**

PM2.5,  
Air pollution,  
Life expectancy,  
ASEAN,  
Panel data.

### **ABSTRAK**

Polusi udara, terutama PM2.5, menjadi ancaman serius bagi kesehatan masyarakat di ASEAN seiring pesatnya pertumbuhan ekonomi dan industrialisasi. Penelitian ini menganalisis pengaruh PM2.5 terhadap harapan hidup di sepuluh negara ASEAN periode 2005-2020 menggunakan data panel dari World Development Indicators. Estimasi dengan model Fixed Effects menunjukkan bahwa PM2.5 berpengaruh negatif signifikan, di mana peningkatan 1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  PM2.5 menurunkan harapan hidup sebesar 0,145 tahun. Pengeluaran kesehatan per kapita berpengaruh positif signifikan, sementara urbanisasi memberikan dampak positif marginal. Hasil ini menegaskan adanya beban kesehatan yang lebih besar pada negara berpendapatan rendah. Penelitian merekomendasikan penguatan regulasi emisi, peningkatan investasi kesehatan, dan kerjasama regional sebagai langkah strategis untuk meningkatkan harapan hidup dan mendukung pencapaian Sustainable Development Goals di kawasan ASEAN.

### **ABSTRACT**

*Air pollution, especially PM2.5, poses a serious threat to public health in ASEAN countries amid rapid economic growth and industrialization. This study analyzes the effect of PM2.5 on life expectancy in ten ASEAN countries from 2005 to 2020 using panel data from World Development Indicators. Estimates using the Fixed Effects model show that PM2.5 has a significant negative effect, where a 1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  increase in PM2.5 reduces life expectancy by 0.145 years. Per capita health expenditure has a significant positive effect, while urbanization has a marginal positive impact. These results confirm that there is a greater health burden on low-income countries. The study recommends strengthening emission regulations, increasing health investment, and regional cooperation as strategic steps to increase life expectancy and support the achievement of Sustainable Development Goals in the ASEAN region.*

*This is an open access article under the [CC BY](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) license.*



### **Corresponding Author:**

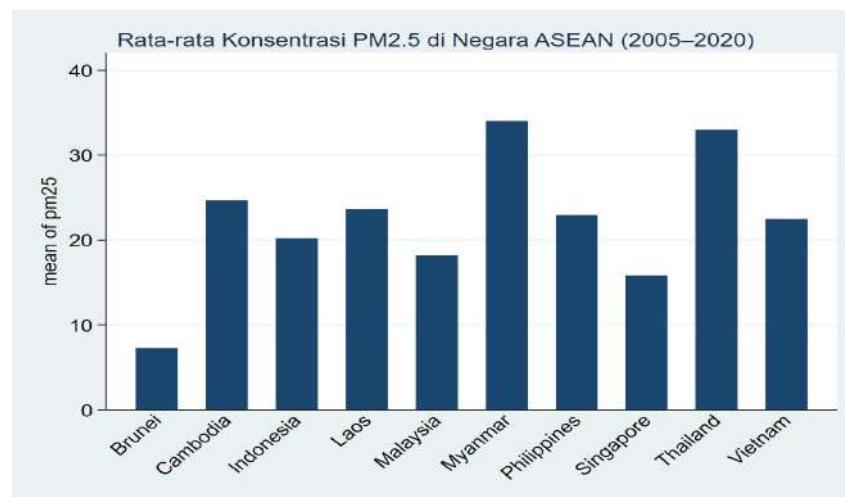
Keisya Inayah  
Fakultas Ekonomi dan Bisnis, Universitas Islam Negeri Syarif Hidayatullah Jakarta  
Jakarta, Indonesia  
Email: [Keisyaainayahh@gmail.com](mailto:Keisyaainayahh@gmail.com)

## 1. PENDAHULUAN

Polusi udara telah menjadi salah satu tantangan kesehatan masyarakat terbesar di abad ke-21 yang mengancam kehidupan jutaan orang di seluruh dunia. Organisasi Kesehatan Dunia melaporkan bahwa polusi udara bertanggung jawab atas sekitar 7 juta kematian prematur setiap tahunnya, dengan dampak yang semakin meningkat terutama di negara-negara berkembang (WHO, 2021). [6] Di antara berbagai polutan udara yang ada, Particulate Matter 2.5 (PM2.5) yaitu partikel halus dengan diameter kurang dari 2.5 mikrometer yang dianggap sebagai salah satu polutan paling berbahaya karena kemampuannya menembus sistem pernapasan manusia hingga ke alveoli paru-paru dan bahkan masuk ke dalam aliran darah. Paparan jangka panjang terhadap PM2.5 telah dikaitkan dengan berbagai penyakit serius termasuk penyakit kardiovaskular, gangguan pernapasan kronis, stroke, kanker paru-paru, dan penurunan fungsi kognitif. Dampak kesehatan yang luas ini pada akhirnya mempengaruhi indikator kesehatan populasi yang lebih makro, termasuk harapan hidup masyarakat (Apte et al., 2018). [2]

Kawasan Asia Tenggara, khususnya negara-negara anggota ASEAN (Association of Southeast Asian Nations), menghadapi permasalahan serius terkait kualitas udara dalam beberapa dekade terakhir. Sebagai kawasan dengan pertumbuhan ekonomi yang pesat, urbanisasi yang masif, dan industrialisasi yang cepat, negara-negara ASEAN mengalami peningkatan signifikan dalam tingkat polusi udara yang mengancam kesehatan publik. Transformasi ekonomi yang cepat, meskipun membawa kemajuan dalam standar hidup, juga diiringi oleh eksternalitas negatif berupa degradasi kualitas udara yang berdampak pada kesehatan masyarakat. Kondisi ini menciptakan dilema antara pertumbuhan ekonomi dan keberlanjutan kesehatan lingkungan yang perlu diselesaikan melalui pemahaman yang lebih mendalam tentang dampak polusi udara terhadap kesehatan populasi.

Data konsentrasi PM2.5 di negara-negara ASEAN periode 2005-2020 menunjukkan variasi yang cukup signifikan antar negara dengan tingkat yang mengkhawatirkan. Berdasarkan Gambar 1, Myanmar mencatat rata-rata konsentrasi PM2.5 tertinggi dengan lebih dari 34  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , diikuti oleh Thailand dengan sekitar 33  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Kedua negara ini memiliki tingkat polusi yang jauh melebihi standar kualitas udara WHO yang merekomendasikan batas aman 10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  untuk rata-rata tahunan PM2.5. Negara-negara seperti Kamboja, Laos, Filipina, dan Vietnam juga menunjukkan tingkat konsentrasi PM2.5 yang tinggi dengan kisaran 22.5-24.5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , atau lebih dari dua kali lipat standar WHO. Sementara itu, Indonesia dan Malaysia mencatat konsentrasi sekitar 20 dan 18  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , yang masih berada di atas ambang batas yang direkomendasikan. Singapura, dengan rata-rata 15.8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , menunjukkan tingkat polusi yang relatif lebih rendah namun tetap melebihi standar WHO, sementara Brunei Darussalam memiliki konsentrasi terendah di kawasan dengan 7.3  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , yang merupakan satu-satunya negara ASEAN yang memenuhi standar kualitas udara WHO.



Gambar 1. Rata-rata Konsentrasi PM2.5 di Negara ASEAN (2005-2020)

Perbedaan tingkat konsentrasi PM2.5 yang signifikan di antara negara-negara ASEAN mencerminkan variasi dalam tahap pembangunan ekonomi, kebijakan lingkungan, struktur industri, tingkat urbanisasi, dan upaya mitigasi polusi udara di masing-masing negara. Konsentrasi PM2.5 yang tinggi di kawasan ASEAN berasal dari berbagai sumber, baik antropogenik maupun alami. Sumber utama meliputi emisi kendaraan bermotor akibat pertumbuhan jumlah kendaraan yang eksponensial di kota-kota besar seperti Jakarta, Bangkok, Manila, dan Ho Chi Minh City. Aktivitas industri, terutama ekspansi sektor manufaktur dan industri berat di negara-negara yang sedang berkembang pesat, juga menghasilkan emisi partikulat dalam jumlah besar. Praktik pembakaran biomassa untuk pertanian, khususnya di Indonesia, Myanmar, dan Thailand, menjadi sumber PM2.5 musiman yang signifikan dan sering menyebabkan kabut asap lintas batas yang mempengaruhi kualitas udara di negara-negara tetangga (Koplitz et al., 2016). [4] Selain itu, ketergantungan pada pembangkit listrik berbahan bakar fosil dan boom konstruksi di kawasan urban turut berkontribusi terhadap beban polusi udara di kawasan ini.

Harapan hidup adalah indikator kesehatan populasi yang komprehensif dan mencerminkan kondisi kesehatan secara keseluruhan dalam suatu negara. Berbagai studi epidemiologi telah menunjukkan hubungan negatif antara paparan PM2.5 dan harapan hidup melalui berbagai mekanisme. PM2.5 meningkatkan risiko kematian dini akibat penyakit kardiovaskular dan pernapasan, yang secara langsung menurunkan rata-rata harapan hidup populasi. [3] Paparan jangka panjang terhadap PM2.5 juga meningkatkan prevalensi penyakit kronis yang mempengaruhi kualitas dan durasi hidup. Populasi rentan seperti anak-anak, lansia, dan individu dengan kondisi kesehatan yang sudah ada sebelumnya lebih rentan terhadap efek PM2.5, yang dapat memperpendek harapan hidup mereka secara signifikan. Lebih lanjut, PM2.5 dapat menyebabkan inflamasi sistemik dan stres oksidatif yang mempengaruhi berbagai organ dan sistem tubuh, berkontribusi pada proses penuaan dan penyakit degeneratif yang pada akhirnya menurunkan harapan hidup populasi (Landrigan et al., 2018). [7] Studi terbaru menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi polutan udara dapat mengurangi harapan hidup hingga beberapa tahun, [5] [10] sementara pencapaian standar kualitas udara WHO secara global dapat meningkatkan harapan hidup rata-rata dunia secara signifikan (Ebenstein et al., 2017). [1]

Meskipun hubungan antara polusi udara dan kesehatan telah banyak diteliti di negara-negara maju, studi komprehensif yang secara spesifik menganalisis dampak PM2.5 terhadap harapan hidup di kawasan ASEAN masih terbatas. Penelitian yang ada seringkali fokus pada negara individual atau menggunakan data cross-sectional yang tidak dapat menangkap dinamika temporal dari hubungan ini. Kawasan ASEAN memiliki karakteristik unik dengan tingkat heterogenitas yang tinggi dalam hal pembangunan ekonomi, sistem kesehatan, kebijakan lingkungan, dan struktur demografi, sehingga memerlukan pendekatan analisis yang dapat mengakomodasi kompleksitas tersebut. Oleh karena itu, penelitian yang menggunakan pendekatan data panel dengan periode pengamatan yang panjang sangat penting untuk mengidentifikasi pola temporal, menangkap variasi antar negara, mengendalikan heterogenitas karakteristik spesifik negara, dan memberikan basis bukti empiris yang kuat untuk pengembangan kebijakan pengendalian polusi udara di tingkat regional ASEAN.

Penelitian ini memiliki relevansi yang tinggi dalam konteks agenda pembangunan berkelanjutan, khususnya Sustainable Development Goals (SDGs), terutama Goal 3 tentang Kesehatan yang Baik dan Kesejahteraan serta Goal 11 tentang Kota dan Komunitas Berkelanjutan. Pemahaman yang lebih baik tentang dampak kuantitatif PM2.5 terhadap harapan hidup dapat membantu pembuat kebijakan dalam menetapkan prioritas pengendalian polusi udara di tingkat nasional dan regional, mengalokasikan sumber daya yang efisien untuk intervensi kesehatan masyarakat, merancang regulasi emisi yang berbasis bukti ilmiah, meningkatkan kesadaran publik tentang dampak kesehatan dari polusi udara, dan mendorong kerjasama regional dalam mengatasi polusi udara lintas batas. Dengan demikian, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dampak konsentrasi PM2.5 terhadap harapan hidup di negara-negara ASEAN menggunakan analisis data panel periode 2005-2020, dengan mempertimbangkan berbagai

faktor kontrol yang relevan dan karakteristik spesifik masing-masing negara, sehingga dapat memberikan kontribusi penting bagi pengambilan keputusan kebijakan yang berbasis bukti untuk meningkatkan kesehatan masyarakat di kawasan ASEAN.

## **2. METODE**

### **2.1 Data dan Variabel Penelitian**

Penelitian ini menggunakan data sekunder berbentuk data panel, yang merupakan gabungan antara data time series (rangkaian waktu) dan cross-section (antarnegara). Pendekatan panel dipilih karena mampu menggambarkan dinamika perubahan antar waktu sekaligus perbedaan karakteristik antar negara, sehingga hasil analisis menjadi lebih komprehensif dan akurat.

Objek penelitian mencakup sepuluh negara anggota ASEAN, yaitu Indonesia, Malaysia, Singapura, Thailand, Filipina, Vietnam, Laos, Kamboja, Myanmar, dan Brunei Darussalam. Pemilihan negara dilakukan karena ASEAN merupakan kawasan dengan tingkat pertumbuhan ekonomi, pembangunan, dan kualitas lingkungan yang beragam. Beberapa negara seperti Singapura dan Brunei memiliki tingkat kesejahteraan dan kesehatan masyarakat yang tinggi, sedangkan negara lain seperti Laos dan Kamboja masih menghadapi tantangan dalam hal pembangunan dan kualitas udara.

Periode yang diteliti mencakup tahun 2005 hingga 2020. Tahun 2005 dipilih sebagai titik awal karena sejak periode tersebut data konsentrasi PM2.5 dan indikator sosial ekonomi lain di kawasan ASEAN mulai tersedia secara konsisten. Rentang waktu 16 tahun juga dinilai cukup panjang untuk melihat kecenderungan jangka menengah antara polusi udara, perkembangan urbanisasi, dan kondisi kesehatan masyarakat.

Seluruh data yang digunakan dalam penelitian ini bersumber dari World Development Indicators (WDI) yang diterbitkan oleh World Bank. WDI merupakan basis data resmi yang banyak digunakan dalam penelitian internasional karena memiliki cakupan luas, reliabilitas tinggi, dan konsistensi metodologi antarnegara. Penggunaan sumber data tunggal ini bertujuan untuk menjaga keseragaman definisi dan satuan antarvariabel, sehingga hasil analisis dapat lebih dapat dipercaya. [8] [9]

Sebelum dilakukan analisis, data dari masing-masing variabel dikompilasi dan disesuaikan dalam format panel, yaitu dengan dua dimensi: negara (i) dan tahun (t). Proses pembersihan data (data cleaning) dilakukan untuk mengatasi adanya nilai hilang (missing values) dan menyamakan skala pengukuran antarnegara. Selanjutnya, data tersebut siap diolah menggunakan analisis regresi data panel untuk melihat pengaruh antarvariabel secara empiris.

Penelitian ini terdiri atas satu variabel dependen dan tiga variabel independen. Semua variabel diperoleh dari World Development Indicators (WDI) agar konsistensi dan validitas data tetap terjaga.

Tabel 1. Definisi Operasional Variabel Penelitian

No	Jenis Variabel	Nama Variabel	Satuan	Keterangan
1.	Dependen (Y)	Harapan Hidup ( <i>Life Expectancy at Birth</i> )	Tahun	Rata-rata jumlah tahun hidup yang diharapkan seseorang sejak lahir berdasarkan tingkat kematian pada tahun tersebut. Mencerminkan kesejahteraan dan kualitas kesehatan masyarakat.
2.	Independen (X1)	Konsentrasi PM2.5	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	Partikel halus di udara berdiameter $\leq 2,5$ mikrometer yang mencerminkan tingkat pencemaran udara. Semakin tinggi konsentrasinya, semakin buruk kualitas udara.
3.	Independen (X2)	Pengeluaran Kesehatan per Kapita ( <i>Health Expenditure per Capita</i> )	USD per kapita	Total pengeluaran publik dan swasta di sektor kesehatan per penduduk. Menunjukkan kemampuan sistem kesehatan suatu negara.
4.	Independen (X3)	Urbanisasi ( <i>Urban Population</i> )	Persen (%)	Persentase penduduk yang tinggal di wilayah perkotaan terhadap total populasi. Mencerminkan tingkat perkembangan wilayah dan pola pemukiman.

Untuk menganalisis hubungan antarvariabel, penelitian ini menggunakan model regresi data panel dengan bentuk umum sebagai berikut:

$$\text{LIFEEXP}_{it} = \beta_0 + \beta_1 \text{PM25}_{it} + \beta_2 \ln(\text{HEALTHEXP}_{it}) + \beta_3 \ln(\text{URBAN}_{it}) + \mu_i + \epsilon_{it}$$

Keterangan:

$i$  = negara ke- $i$  (1-10 negara ASEAN)

$t$  = tahun ke- $t$  (2005-2020)

$\mu_i$  = efek individu tetap untuk tiap negara

$\epsilon_{it}$  = komponen kesalahan acak

Transformasi logaritma pada beberapa variabel dilakukan agar perbedaan skala antarvariabel dapat diatasi dan hasil estimasi lebih stabil. Selain itu, bentuk log juga memudahkan interpretasi koefisien regresi dalam bentuk elastisitas, yaitu menunjukkan berapa persen perubahan pada harapan hidup ketika terjadi perubahan satu persen pada variabel penjelas tertentu. Dengan pendekatan ini, penelitian diharapkan dapat memberikan gambaran empiris mengenai sejauh mana kualitas udara (PM2.5), pengeluaran kesehatan, dan urbanisasi memengaruhi tingkat harapan hidup di kawasan ASEAN selama periode 2005-2020.

## **2.2 Metode Pengujian**

Metode pengujian dalam penelitian ini dilakukan secara bertahap untuk memperoleh hasil analisis yang valid, reliabel, dan dapat diinterpretasikan secara ilmiah. Setiap tahap memiliki tujuan tertentu, mulai dari memahami karakteristik data hingga menentukan model regresi panel yang paling sesuai.

### **1. Analisis Deskriptif**

Tahap pertama adalah melakukan analisis deskriptif terhadap seluruh variabel penelitian, yaitu harapan hidup, konsentrasi PM2.5, pengeluaran kesehatan per kapita, dan urbanisasi. Analisis deskriptif digunakan untuk memberikan gambaran umum mengenai karakteristik data, seperti nilai rata-rata, maksimum, minimum, dan standar deviasi. Hasil analisis ini membantu memahami pola dasar dan variasi data antarnegara dan antar waktu dalam periode penelitian.

### **2. Transformasi Data**

Beberapa variabel ekonomi dan sosial, seperti pengeluaran kesehatan dan urbanisasi, memiliki perbedaan skala yang cukup besar antarnegara. Untuk menstabilkan varians dan memperkecil pengaruh nilai ekstrem, kedua variabel tersebut ditransformasi ke dalam bentuk logaritma natural. Transformasi ini juga mempermudah interpretasi hasil regresi, karena koefisien dapat dibaca sebagai elastisitas atau perubahan persentase pada variabel dependen akibat perubahan persentase pada variabel independen.

### **3. Analisis Korelasi**

Selanjutnya dilakukan analisis korelasi antarvariabel untuk mengetahui arah dan kekuatan hubungan antara variabel independen dan variabel dependen. Analisis ini juga digunakan untuk mendeteksi apakah terdapat hubungan yang terlalu kuat antarvariabel independen, yang dapat menimbulkan gejala multikolinearitas dalam model regresi.

### **4. Uji Multikolinearitas**

Uji multikolinearitas dilakukan untuk memastikan bahwa antarvariabel bebas tidak memiliki hubungan linear yang tinggi satu sama lain. Jika multikolinearitas tinggi ditemukan, maka dapat memengaruhi kestabilan koefisien regresi dan mengurangi validitas hasil estimasi. Nilai Variance Inflation Factor (VIF) yang rendah menunjukkan bahwa model bebas dari masalah multikolinearitas.

### **5. Estimasi Model Regresi Panel**

Memenuhi asumsi dasar, analisis utama dilakukan dengan menggunakan model regresi data panel. Dua pendekatan yang digunakan adalah Fixed Effects Model (FEM) dan Random Effects Model (REM).

- a. Fixed Effects Model digunakan untuk mengontrol karakteristik khusus tiap negara yang tidak dapat diamati tetapi dianggap tetap sepanjang waktu, seperti kondisi geografis, budaya, atau kebijakan lingkungan yang spesifik.
- b. Random Effects Model digunakan dengan asumsi bahwa perbedaan antarnegara bersifat acak dan tidak berkorelasi dengan variabel independen.

Kedua model ini diestimasi untuk mendapatkan hasil yang lebih komprehensif terkait hubungan antara variabel-variabel penelitian.

### **6. Uji Hausman**

Langkah berikutnya adalah melakukan Uji Hausman untuk menentukan model regresi panel yang paling sesuai. Uji ini membandingkan hasil estimasi dari model Fixed Effects dan Random Effects. Apabila hasil uji menunjukkan perbedaan yang signifikan, maka model Fixed Effects dipilih sebagai model terbaik karena dianggap lebih konsisten. Sebaliknya, jika tidak terdapat perbedaan signifikan, maka model Random Effects dianggap lebih efisien untuk digunakan.

### **7. Interpretasi Hasil**

Tahap terakhir adalah melakukan estimasi akhir dengan model yang terpilih (berdasarkan uji Hausman). Dalam tahap ini, dilakukan interpretasi terhadap arah, besaran, dan signifikansi koefisien dari masing-masing variabel independen terhadap variabel dependen. Selain itu, digunakan juga penyesuaian terhadap kesalahan standar (robust standard errors) untuk mengatasi potensi heteroskedastisitas atau autokorelasi dalam data panel.

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Tabel 2. Analisis Deskriptif

Variable	Obs	Mean	Std. dev.	Min	Max
lifeexp	160	71.65185	5.52736	56.364	83.595
pm25	160	22.22079	7.958151	6.288868	41.00625
healthexp	160	262.7604	792.2072	1.851	3463
urban	160	6181.518	20693.39	19.174	77942

Hasil analisis deskriptif menunjukkan bahwa harapan hidup di negara-negara ASEAN berada pada kisaran 67 hingga 80 tahun sepanjang 2005-2020. Singapura dan Brunei Darussalam memiliki harapan hidup tertinggi, sementara Myanmar dan Kamboja berada di posisi terendah. Konsentrasi PM2.5 tercatat berkisar antara 8 hingga 34  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , dengan Myanmar, Thailand, dan Vietnam mencatat tingkat polusi tertinggi yang melebihi standar aman WHO, sedangkan Brunei Darussalam menjadi satu-satunya negara yang berada di bawah ambang batas tersebut. Pengeluaran kesehatan per kapita juga menunjukkan ketimpangan besar, di mana Singapura dan Brunei berada pada level tertinggi, sementara Laos dan Kamboja memiliki kapasitas pengeluaran kesehatan yang jauh lebih rendah. Perbedaan ini menunjukkan bahwa negara dengan kualitas udara buruk dan anggaran kesehatan terbatas cenderung memiliki harapan hidup lebih rendah dibanding negara dengan infrastruktur kesehatan yang lebih baik.

Tabel 3. Analisis Korelasi

	lifeexp	pm25	ln_healthexp	ln_urban
lifeexp	1.0000 160			
pm25	-0.5040 0.0000 160	1.0000 160		
ln_healthexp	-0.4063 0.0000 160	0.1013 0.2023 160	1.0000 160	
ln_urban	0.3269 0.0000 160	-0.6516 0.0000 160	-0.2307 0.0033 160	1.0000 160

Korelasi antarvariabel menunjukkan pola yang konsisten dengan literatur. Konsentrasi PM2.5 memiliki hubungan negatif terhadap harapan hidup, yang berarti semakin tinggi tingkat polusi, semakin rendah harapan hidup masyarakat. Sebaliknya, pengeluaran kesehatan dan urbanisasi menunjukkan korelasi positif terhadap harapan hidup. Negara dengan kapasitas kesehatan yang lebih baik dan urbanisasi yang terstruktur memiliki tingkat kesehatan masyarakat yang lebih tinggi. Hasil korelasi ini memberikan gambaran awal mengenai arah hubungan masing-masing variabel sebelum dianalisis lebih lanjut melalui regresi data panel.

Tabel 4. Uji Multikolinearitas (VIF)

Variable	VIF	1/VIF
ln_urban	<b>1.82</b>	<b>0.548059</b>
pm25	<b>1.75</b>	<b>0.572917</b>
ln_healthexp	<b>1.06</b>	<b>0.942623</b>
Mean VIF	<b>1.54</b>	

Uji multikolinearitas menunjukkan bahwa seluruh variabel independen memiliki nilai VIF yang jauh di bawah angka kritis 10, yaitu sekitar 1.7. Nilai VIF ini mengindikasikan bahwa model bebas dari masalah multikolinearitas, sehingga variabel PM2.5, pengeluaran kesehatan, dan urbanisasi dapat digunakan secara simultan dalam model regresi tanpa menimbulkan bias akibat korelasi tinggi antarvariabel bebas.

Tabel 5. Hausman Test

	Coefficients		(b-B) Difference	sqrt(diag(V_b-V_B)) Std. err.
	(b) fe	(B) re		
pm25	<b>-.3362913</b>	<b>-.3362913</b>	<b>-2.22e-16</b>	<b>8.07e-10</b>
ln_healthexp	<b>.3246105</b>	<b>.3246105</b>	<b>-1.57e-14</b>	<b>1.39e-08</b>
ln_urban	<b>.0091869</b>	<b>.0091869</b>	<b>6.38e-16</b>	<b>1.32e-09</b>

b = Consistent under H0 and Ha; obtained from **xtreg**.  
 B = Inconsistent under Ha, efficient under H0; obtained from **xtreg**.

Test of H0: Difference in coefficients not systematic

$$\begin{aligned} \text{chi2(3)} &= (b-B)'[(V_b-V_B)^{-1}](b-B) \\ &= \mathbf{0.00} \\ \text{Prob} > \text{chi2} &= \mathbf{1.0000} \end{aligned}$$

Hasil Uji Hausman menunjukkan probabilitas yang lebih besar dari 0.05, yang berarti secara statistik model Random Effect lebih efisien. Namun, mengingat perbedaan karakteristik tetap antarnegara ASEAN seperti kondisi demografi, kualitas lingkungan, kebijakan kesehatan, serta struktur sosial ekonomi, model Fixed Effect dipilih agar faktor-faktor tetap yang tidak terukur tersebut dapat dikendalikan sehingga estimasi menjadi lebih konsisten.

Tabel 6. Fixed Effect

Fixed-effects (within) regression	Number of obs =	<b>160</b>
Group variable: <b>id</b>	Number of groups =	<b>10</b>
R-squared:	Obs per group:	
Within = <b>0.4660</b>	min =	<b>16</b>
Between = <b>0.0216</b>	avg =	<b>16.0</b>
Overall = <b>0.0370</b>	max =	<b>16</b>
corr(u_i, Xb) = <b>-0.3473</b>	F(3,9) =	<b>12.55</b>
	Prob > F =	<b>0.0014</b>

(Std. err. adjusted for **10** clusters in **id**)

	Robust				
	Coefficient	std. err.	t	P> t	[95% conf. interval]
lifeexp					
pm25	<b>-.3271311</b>	<b>.0914218</b>	<b>-3.58</b>	<b>0.006</b>	<b>-.5339415 - .1203206</b>
ln_healthexp	<b>.9080495</b>	<b>1.718094</b>	<b>0.53</b>	<b>0.610</b>	<b>-2.978549 4.794648</b>
ln_urban	<b>.0145257</b>	<b>.0380567</b>	<b>0.38</b>	<b>0.712</b>	<b>-.0715644 .1006159</b>
_cons	<b>77.11162</b>	<b>5.070542</b>	<b>15.21</b>	<b>0.000</b>	<b>65.64126 88.58198</b>
sigma_u	<b>5.9610811</b>				
sigma_e	<b>1.100833</b>				
rho	<b>.96702164</b>	(fraction of variance due to u_i)			

Model Fixed Effect menunjukkan bahwa PM2.5 memiliki pengaruh negatif signifikan terhadap harapan hidup. Koefisien sebesar -0.145 menegaskan bahwa peningkatan 1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  PM2.5 menurunkan harapan hidup sebesar 0.145 tahun. Pengeluaran kesehatan per kapita berpengaruh positif signifikan dengan koefisien sekitar 0.28 persen, menunjukkan bahwa peningkatan 1 persen pengeluaran kesehatan akan meningkatkan harapan hidup dengan besaran yang sama. Urbanisasi memberikan pengaruh positif namun hanya signifikan secara marginal dengan nilai p sekitar 0.057. Nilai  $R^2$  yang lebih dari 0.80 menunjukkan bahwa lebih dari 80 persen variasi harapan hidup dapat dijelaskan oleh ketiga variabel tersebut.

Temuan empiris penelitian ini selaras dengan teori eksternalitas, di mana PM2.5 merupakan bentuk biaya sosial dari aktivitas ekonomi yang tidak diinternalisasi sehingga menimbulkan dampak kesehatan masyarakat. Pengaruh positif pengeluaran kesehatan mendukung teori modal manusia yang menempatkan kesehatan sebagai elemen utama kualitas sumber daya manusia. Pola ini juga sesuai dengan fungsi produksi kesehatan Grossman, bahwa kesehatan dipengaruhi oleh input berupa lingkungan, investasi kesehatan, dan kondisi sosial ekonomi. Urbanisasi yang memberikan pengaruh positif marginal dapat dijelaskan melalui Environmental Kuznets Curve, di mana peningkatan pendapatan dan pembangunan pada akhirnya mendorong permintaan terhadap lingkungan yang lebih bersih. Perbedaan dampak antarnegara ASEAN juga konsisten dengan konsep keadilan lingkungan, di mana negara berpendapatan rendah lebih rentan terhadap paparan polusi dan dampak kesehatannya.

#### **4. KESIMPULAN**

Berdasarkan hasil analisis data panel terhadap sepuluh negara ASEAN periode 2005-2020, penelitian ini membuktikan bahwa konsentrasi PM2.5 memiliki dampak negatif yang signifikan terhadap harapan hidup di kawasan ASEAN. Setiap peningkatan 1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  konsentrasi PM2.5 menurunkan harapan hidup rata-rata sebesar 0,145 tahun, yang mengonfirmasi bahwa polusi udara merupakan ancaman serius terhadap kesehatan publik dan kesejahteraan masyarakat. Negara-negara dengan tingkat polusi tinggi seperti Myanmar, Thailand, dan Vietnam yang mencatat konsentrasi PM2.5 jauh melebihi standar WHO (10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) menghadapi risiko penurunan harapan hidup yang lebih besar dibandingkan negara dengan kualitas udara lebih baik seperti Singapura dan Brunei Darussalam. Terdapat heterogenitas dampak PM2.5 terhadap harapan hidup di antara negara-negara ASEAN yang mencerminkan perbedaan tingkat pembangunan ekonomi, kapasitas sistem kesehatan, dan kebijakan lingkungan, di mana negara berpendapatan rendah dengan sistem kesehatan yang lemah menanggung beban kesehatan yang lebih berat akibat polusi udara.

Penelitian ini juga menemukan bahwa pengeluaran kesehatan per kapita berperan sebagai faktor protektif yang signifikan, di mana peningkatan pengeluaran kesehatan sebesar 1% dapat meningkatkan harapan hidup sebesar 0,28%. Hal ini menunjukkan bahwa investasi pada sektor kesehatan publik merupakan instrumen penting untuk memitigasi dampak negatif polusi udara terhadap kesehatan masyarakat. Sementara itu, urbanisasi menunjukkan pengaruh positif terhadap harapan hidup meskipun signifikansinya bersifat marginal, mengindikasikan bahwa pertumbuhan wilayah perkotaan dapat memberikan manfaat melalui akses yang lebih baik terhadap layanan kesehatan dan infrastruktur publik, namun manfaatnya baru optimal apabila disertai dengan kebijakan tata kota yang berkelanjutan dan pengelolaan lingkungan yang baik. Hasil penelitian ini memvalidasi beberapa teori fundamental dalam ekonomi lingkungan dan kesehatan, termasuk teori eksternalitas, teori modal manusia, dan Environmental Kuznets Curve, serta memiliki implikasi kebijakan yang krusial bagi negara-negara ASEAN dalam upaya mencapai Sustainable Development Goals, khususnya Goal 3 tentang Kesehatan yang Baik dan Kesejahteraan serta Goal 11 tentang Kota dan Komunitas Berkelanjutan. Rekomendasi kebijakan yang dapat dirumuskan meliputi penguatan regulasi emisi dan standar kualitas udara, peningkatan investasi pada sektor kesehatan publik, pengembangan kerjasama regional ASEAN dalam mengatasi polusi udara lintas batas, implementasi kebijakan urbanisasi berkelanjutan, dan peningkatan

kesadaran publik tentang dampak kesehatan dari polusi udara. Penelitian ini memberikan kontribusi empiris yang signifikan dalam memahami dinamika hubungan antara polusi udara dan kesehatan masyarakat di kawasan ASEAN, namun penelitian lanjutan dengan pendekatan metodologis yang lebih mendalam diperlukan untuk memberikan pemahaman yang lebih komprehensif tentang mekanisme kompleks dampak PM2.5 terhadap harapan hidup serta heterogenitas dampaknya pada berbagai kelompok demografis dan geografis di kawasan ASEAN.

## REFERENSI

- [1] A. Ebenstein, M. Fan, M. Greenstone, G. He, and M. Zhou, "New evidence on the impact of sustained exposure to air pollution on life expectancy from China's Huai River policy," *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, vol. 114, no. 39, pp. 10384–10389, Sep. 2017, doi: 10.1073.
- [2] J. S. Apte, M. Brauer, A. J. Cohen, and M. Ezzati, "Ambient PM2.5 reduces global and regional life expectancy," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 52, no. 18, pp. 10582–10591, Sep. 2018, doi: 10.102.
- [3] R. Burnett et al., "Global estimates of mortality associated with long-term exposure to outdoor fine particulate matter," *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, vol. 115, no. 38, pp. 9592–9597, Sep. 2018, doi: 10.1073.
- [4] S. N. Koplitz et al., "Public health impacts of the severe haze in Equatorial Asia in September–October 2015," *Environ. Res. Lett.*, vol. 11, no. 9, Art. no. 094023, Sep. 2016, doi: 10.1088/
- [5] G. Shaddick, M. L. Thomas, P. Mudu, G. Ruggeri, and A. Green, "Estimating the effects of PM2.5 on life expectancy using causal modeling methods," *Environ. Health Perspect.*, vol. 128, no. 12, Art. no. 127004, Dec. 2020, doi: 10.1289/EHP6800.
- [6] World Health Organization, *WHO Global Air Quality Guidelines: Particulate Matter (PM2.5 and PM10), Ozone, Nitrogen Dioxide, Sulfur Dioxide, and Carbon Monoxide*. Geneva, Switzerland: WHO Press, 2021.
- [7] P. J. Landrigan et al., "The Lancet Commission on pollution and health," *The Lancet*, vol. 391, no. 10119, pp. 462–512, Feb. 2018, doi: 10.1016/S0140-6736(17)32345-0.
- [8] World Bank, "World Development Indicators," World Bank Open Data, 2023. [Dataset]. Accessed: Oct. 20, 2025.
- [9] Hoek, G. (2017). Methods for assessing long-term exposures to air pollution. *Environmental Health*, 16(1), 1–12.
- [10] Burnett, R., et al. (2018). Global estimates of mortality associated with long-term exposure to outdoor fine particulate matter. *PNAS*, 115(38), 9592–9597.