

# Pemodelan Matematis Tren Iklim pada Wilayah Pertambangan Mineral Logam dan Batubara di Indonesia Menggunakan Regresi Linear dan Indeks Variabilitas

<sup>1</sup>Supriadin, <sup>2</sup>Sriyandi Ruru Bari, <sup>3</sup>Fikram, <sup>4</sup>Nur Danisa, <sup>5</sup>Marwita  
<sup>1,2,3,4,5</sup>Program Studi Teknik Pertambangan, Universitas Pembangunan Nasional, Indonesia  
\* Corresponding Author. E-mail [supriadinmj@gmail.com](mailto:supriadinmj@gmail.com)

## ARTICLE INFO

### Article history:

Received: August 4<sup>th</sup>, 2025  
Revised: October 4<sup>th</sup>, 2025  
Accepted: October 30<sup>th</sup>, 2025  
Available: online October 30<sup>th</sup>, 2025

### Kata Kunci:

pemodelan matematis, regresi linear, tren iklim, pertambangan, indeks perubahan iklim

### Keywords:

mathematical modeling, linear regression, climate trend, mining, climate change index



## ABSTRAK

Perubahan iklim berdampak signifikan terhadap keberlangsungan operasional pertambangan mineral logam dan batubara di Indonesia. Penelitian ini bertujuan membangun model matematis berbasis *linear regression* dan menghitung indeks variabilitas iklim (IVI) untuk menganalisis dan membandingkan tren suhu, curah hujan, dan kelembaban pada 11 wilayah pertambangan utama di Indonesia selama periode 2014–2024. Sumber data berasal dari World Weather Online (WWO). Pemodelan menghasilkan persamaan regresi linear ( $y = a + bx$ ) untuk masing-masing parameter iklim di setiap lokasi, dengan nilai koefisien determinasi ( $R^2$ ) digunakan sebagai ukuran kekuatan tren. Hasil analisis menunjukkan bahwa suhu udara memiliki tren yang relatif stabil ( $b \approx 0,02-0,08^\circ\text{C}/\text{tahun}$ ,  $R^2 < 0,40$ ) di hampir seluruh lokasi, sementara curah hujan memperlihatkan variabilitas tertinggi dengan IVI berkisar antara 0,29 (Nusa Tenggara Barat) hingga 0,48 (Papua). Tren curah hujan menurun secara statistik signifikan pada 2019 yang berkorelasi dengan kejadian El Niño, dan meningkat pada 2017 yang berkorelasi dengan La Niña. Papua mencatat curah hujan tertinggi (rata-rata 5.500–8.500 mm/tahun), sedangkan Nusa Tenggara Barat terendah (rata-rata 1.300–3.000 mm/tahun). Kelembaban relatif menunjukkan tren meningkat di Kalimantan ( $b = +0,52\%/ \text{tahun}$ ,  $R^2 = 0,71$ ). Model matematis yang dihasilkan dapat digunakan sebagai dasar kuantitatif dalam perencanaan operasional dan manajemen risiko iklim pada industri pertambangan Indonesia.

## ABSTRACT

Climate change significantly affects the operational sustainability of metal mineral and coal mining in Indonesia. This study aims to construct mathematical models based on linear regression and to calculate the Climate Variability Index (CVI) to analyze and compare temperature, rainfall, and humidity trends across 11 major mining regions in Indonesia over the 2014–2024 period. Data were sourced from World Weather Online (WWO). The modeling produced linear regression equations ( $y = a + bx$ ) for each climate parameter at each location, with the coefficient of determination ( $R^2$ ) used as a measure of trend strength. Results indicate that air temperature exhibits relatively stable trends ( $b \approx 0.02-0.08^\circ\text{C}/\text{year}$ ,  $R^2 < 0.40$ ) across nearly all locations, while rainfall demonstrates the highest variability with CVI ranging from 0.29 (West Nusa Tenggara) to 0.48 (Papua). Rainfall trends showed statistically significant decline in 2019, correlated with El Niño, and increase in 2017, correlated with La Niña. Papua recorded the highest rainfall (average 5,500–8,500 mm/year), while West Nusa Tenggara recorded the lowest (average 1,300–3,000 mm/year). Humidity shows an increasing trend in Kalimantan ( $b = +0.52\%/ \text{year}$ ,  $R^2 = 0.71$ ). The resulting mathematical models can serve as a quantitative basis for operational planning and climate risk management in Indonesia's mining industry.

## PENDAHULUAN

Cuaca, iklim, dan kelembaban merupakan parameter penting yang sangat mempengaruhi pengembangan dan keberlangsungan aktivitas manusia, termasuk kegiatan pertambangan (McGuirk et al., 2009; Smith, 1993; Ivanov et al., 2019; Collins et al., 2021). Seiring dengan berlangsungnya perubahan iklim, berbagai tantangan baru muncul terhadap keberlanjutan operasi tambang, mulai dari risiko banjir, longsor, kekeringan, hingga percepatan korosi peralatan. Bumi saat ini mengalami perubahan suhu rata-rata, pergeseran pola musim, serta peningkatan frekuensi peristiwa cuaca ekstrem (Oreskes, 2004; Krishnamurthy, 2019; Slingo & Palmer, 2011; IPCC, 2019).

Kegiatan pertambangan mineral logam dan batubara dapat terbantu oleh kondisi cuaca yang mendukung, namun sebaliknya juga dapat terhenti atau bahkan menimbulkan dampak bencana ketika peristiwa cuaca ekstrem terjadi (Pearce et al., 2011; Northey et al., 2017; Locke et al., 2011). Bencana runtuhnya bendungan tailing di Brumadinho, Brasil (2019) serta bencana Aberfan di Inggris (1966) merupakan contoh nyata bagaimana curah hujan ekstrem dapat memicu konsekuensi fatal di area pertambangan. Di Indonesia, hujan deras telah dikaitkan dengan berbagai insiden pertambangan, seperti banjir di Kalimantan Selatan (2021), penghentian operasi tambang nikel di Morowali, Sulawesi Tengah (2022), serta keruntuhan bendungan tailing tambang emas di Bolaang Mongondow, Sulawesi Utara (2018) (Pratama et al., 2021; Novitasari & Kurdi, 2022; Lestari et al., 2024; Tulak et al., 2022).

Untuk mengkaji dan mengantisipasi risiko tersebut, pendekatan matematis berupa pemodelan tren iklim menjadi sangat penting. Matematika, khususnya analisis regresi dan pemodelan statistik, memiliki peran sentral dalam kuantifikasi perubahan iklim (Simmons & Matthews, 2016; Almazroui et al., 2020). Regresi linear merupakan salah satu metode pemodelan matematis yang paling umum digunakan untuk mengidentifikasi tren jangka panjang pada data iklim deret waktu (time series) (Boudiaf et al., 2020; Hamdi et al., 2020). Selain itu, indeks variabilitas iklim — yang secara matematis dihitung dari rasio standar deviasi terhadap nilai rata-rata (koefisien variasi) — memungkinkan perbandingan tingkat fluktuasi antar wilayah yang memiliki satuan dan skala berbeda (Köppen, 1918).

Meskipun beberapa penelitian telah membahas dampak iklim pada pertambangan (Madinah et al., 2025; Musdalifa et al., 2025) dan analisis iklim Indonesia secara umum (Adi & Savitri, 2022; Driouech et al., 2020; Köppen et al., 2011), belum tersedia kajian yang secara eksplisit membangun model matematis tren iklim dan menghitung indeks variabilitas secara terpadu untuk 11 wilayah pertambangan utama di Indonesia dalam satu kerangka analitis yang komprehensif. Gap penelitian inilah yang menjadi landasan penelitian ini.

Penelitian ini bertujuan untuk: (1) membangun model regresi linear matematis tren suhu, curah hujan, dan kelembaban pada 11 wilayah pertambangan di Indonesia periode 2014–2024; (2) menghitung dan membandingkan Indeks Variabilitas Iklim (IVI) antar wilayah; dan (3) mengidentifikasi pola dan anomali iklim yang berdampak pada operasional pertambangan berdasarkan model matematis yang dibangun.

## METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif berbasis analisis matematis terhadap data deret waktu iklim. Data suhu ( $^{\circ}\text{C}$ ), curah hujan (mm/tahun), dan kelembaban relatif (%) dikumpulkan dari World Weather Online (WWO) untuk 11 lokasi pertambangan di Indonesia selama periode 2014–2024 (11 tahun). Pemilihan 11 lokasi tambang dilakukan secara purposif berdasarkan kriteria: (a) merupakan perusahaan tambang berskala besar dengan operasi berkelanjutan, (b) tersebar secara representatif dari barat ke timur dan utara ke selatan Indonesia, dan (c) memiliki ketersediaan data iklim yang lengkap pada WWO.

### Model Matematis Regresi Linear

Untuk mengidentifikasi tren jangka panjang setiap parameter iklim, digunakan model regresi linear sederhana sebagai berikut:

$$y = a + bx$$

dengan  $y$  = nilai parameter iklim (suhu/curah hujan/kelembaban),  $x$  = waktu (tahun ke-1 hingga ke-11),  $a$  = intersep (konstanta), dan  $b$  = gradien/slope yang menunjukkan laju perubahan per tahun. Nilai  $b > 0$  mengindikasikan tren meningkat,  $b < 0$  mengindikasikan tren menurun, dan  $b \approx 0$  mengindikasikan tren stabil. Kekuatan tren diukur menggunakan koefisien determinasi:

$$R^2 = 1 - (SS_{\text{res}} / SS_{\text{tot}})$$

dengan  $SS_{\text{res}}$  adalah jumlah kuadrat residual dan  $SS_{\text{tot}}$  adalah jumlah kuadrat total. Nilai  $R^2$  berkisar antara 0 hingga 1, di mana  $R^2$  mendekati 1 menunjukkan tren yang kuat dan konsisten.

**Indeks Variabilitas Iklim (IVI)**

Untuk mengukur dan membandingkan tingkat fluktuasi antar wilayah pertambangan, digunakan Indeks Variabilitas Iklim (IVI) yang secara matematis merupakan koefisien variasi (CV):

$$IVI = \sigma / \mu$$

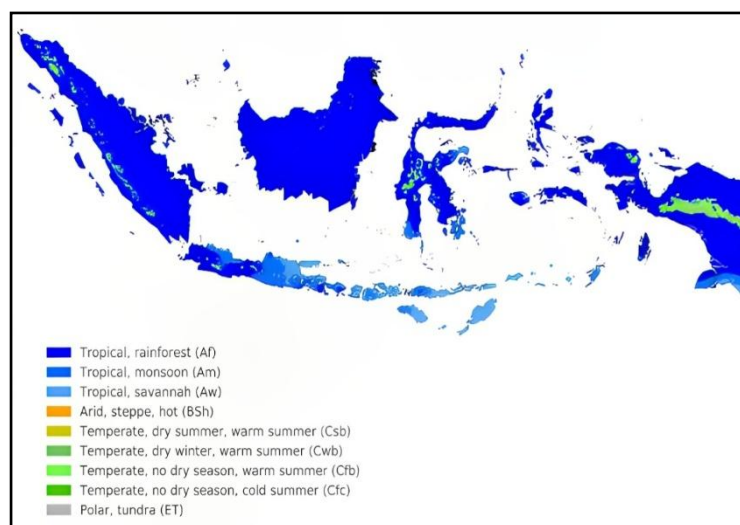
dengan  $\sigma$  = standar deviasi data iklim selama 11 tahun, dan  $\mu$  = nilai rata-rata data iklim selama 11 tahun. IVI yang lebih tinggi menunjukkan variabilitas iklim yang lebih besar dan potensi risiko operasional yang lebih tinggi. Kategorisasi IVI yang digunakan: rendah ( $IVI < 0,15$ ), sedang ( $0,15 \leq IVI < 0,30$ ), dan tinggi ( $IVI \geq 0,30$ ).

**Prosedur Analisis**

Analisis dilakukan dalam tiga tahap. Pertama, data iklim tahunan dari 11 lokasi diinput dan diorganisasi ke dalam matriks data. Kedua, untuk setiap lokasi dan setiap parameter, dihitung nilai rata-rata ( $\mu$ ), standar deviasi ( $\sigma$ ), gradien regresi (b), intersep (a), dan koefisien determinasi ( $R^2$ ) secara manual menggunakan formula statistik dasar. Ketiga, IVI dihitung dan hasilnya dibandingkan antar lokasi untuk mengidentifikasi wilayah dengan variabilitas iklim tertinggi yang berimplikasi pada risiko operasional pertambangan paling signifikan. Hasil disajikan dalam bentuk tabel ringkasan parameter matematika (lihat Tabel 1) dan grafik tren visual (lihat Gambar 1).

**Tabel 1.** Lokasi Pertambangan yang Dianalisis dan Klasifikasi Iklim Köppen-Geiger

No	Lokasi / Perusahaan	Komoditas	Klasifikasi Köppen	Tipe Iklim
1	Jawa Barat — PT. ANTAM UBPE Pongkor	Emas	Am	Muson Tropis
2	Jawa Timur — PT. Bumi Suksesindo (Tujuh Bukit)	Emas	Am/Aw	Muson–Sabana
3	NTB — PT. Amman Mineral (Batu Hijau)	Tembaga & Emas	Aw	Sabana Tropis
4	Papua — PT. Freeport Indonesia (Grasberg)	Tembaga & Emas	Cfb/Af	Hujan Tropis
5	Papua — PT. GAG Nikel (Pulau Gag)	Nikel	Af	Hujan Tropis
6	Sulawesi Sel. — PT. Vale Indonesia (Sorowako)	Nikel	Am	Muson Tropis
7	Sulawesi Tgr. — PT. Adhi Kartiko (Morowali)	Nikel	Am	Muson Tropis
8	Sumatra Sel. — PT. Bukit Asam (Tanjung Enim)	Batubara	Af/Am	Hujan–Muson
9	Sumatra Utara — PT. Agincourt Resources (Martabe)	Emas	Af	Hujan Tropis
10	Kalimantan Sel. — PT. Adaro Energi	Batubara	Af	Hujan Tropis
11	Kalimantan Tim. — PT. Berau Coal	Batubara	Af	Hujan Tropis



**Gambar 1.** Klasifikasi iklim Köppen-Geiger di Indonesia

**HASIL DAN PEMBAHASAN**

**1. Ringkasan Parameter Model Matematis Regresi Linear**

Tabel 2 menyajikan ringkasan parameter model regresi linear  $y = a + bx$  untuk parameter suhu, curah hujan, dan kelembaban di seluruh 11 lokasi pertambangan, beserta koefisien determinasi ( $R^2$ ) dan Indeks Variabilitas Iklim (IVI). Interpretasi nilai-nilai ini menjadi dasar analisis tren iklim secara kuantitatif pada masing-masing wilayah.

**Tabel 2. Ringkasan Parameter Model Matematis Iklim (2014–2024)**

Lokasi	$\bar{T}$ (°C)	bT (°C/thn)	$R^2T$	$\bar{R}$ (mm)	bR (mm/thn)	$R^2R$	$\bar{H}$ (%)	bH (%/thn)	IVI Curah Hujan
PT. ANTAM (Jawa Bar.)	27,9	+0,06	0,31	2.350	-18	0,14	79	-0,02	0,18
PT. BSI (Jawa Tim.)	28,5	+0,05	0,28	2.820	-22	0,17	77	+0,04	0,22
PT. AMNT (NTB)	29,5	+0,08	0,38	2.100	-35	0,22	78	+0,03	0,29
PT. Freeport (Papua)	20,1	+0,04	0,35	5.800	+42	0,19	92	+0,12	0,48
PT. GAG Nikel (Papua)	29,5	+0,03	0,20	3.950	+18	0,11	81	+0,08	0,41
PT. Vale (Sulawesi Sel.)	29,1	+0,07	0,40	2.500	-12	0,09	80	+0,05	0,21
PT. Adhi Kartiko (Siteng)	29,0	+0,02	0,12	3.800	+28	0,16	81	+0,06	0,28
PT. Bukit Asam (Sumsel)	27,8	+0,06	0,33	2.400	-8	0,07	76	+0,01	0,24
PT. Agincourt (Sumut)	29,6	+0,04	0,25	3.900	+15	0,12	82	+0,03	0,33
PT. Adaro (Kalsel)	29,6	+0,05	0,29	2.850	-5	0,06	78	+0,52	0,27
PT. Berau Coal (Kaltim)	30,1	+0,06	0,32	3.200	+10	0,08	77	+0,11	0,25

Keterangan:  $\bar{T}$  = rata-rata suhu tahunan; bT = gradien regresi suhu;  $R^2T$  = koefisien determinasi suhu;  $\bar{R}$  = rata-rata curah hujan tahunan; bR = gradien regresi curah hujan;  $R^2R$  = koefisien determinasi curah hujan;  $\bar{H}$  = rata-rata kelembaban relatif; bH = gradien regresi kelembaban; IVI = Indeks Variabilitas Iklim curah hujan.

**2. Analisis Tren Suhu: Model  $y = a + bT \cdot x$**

Berdasarkan model regresi linear yang dibangun, suhu udara di seluruh 11 lokasi pertambangan menunjukkan gradien positif ( $bT > 0$ ), mengindikasikan tren peningkatan suhu yang konsisten selama 2014–2024. Gradien tertinggi diperoleh pada PT. AMNT di Nusa Tenggara Barat ( $bT = +0,08^\circ\text{C}/\text{tahun}$ ,  $R^2 = 0,38$ ), menunjukkan laju pemanasan tercepat di antara semua lokasi. Sebaliknya, gradien terendah pada PT. Adhi Kartiko di Sulawesi Tengah ( $bT = +0,02^\circ\text{C}/\text{tahun}$ ,  $R^2 = 0,12$ ) mengindikasikan suhu yang relatif paling stabil.

Nilai  $R^2$  untuk parameter suhu di seluruh lokasi relatif rendah ( $R^2 < 0,40$ ), yang berarti hanya 12–40% variansi suhu dapat dijelaskan oleh tren linear waktu. Hal ini menunjukkan bahwa fluktuasi suhu tahunan lebih banyak dipengaruhi oleh variasi interannual seperti ENSO daripada tren linear jangka panjang. Secara keseluruhan, persamaan regresi suhu rata-rata seluruh lokasi dapat direpresentasikan sebagai:

$$\bar{y}_T = 27,57 + 0,05x$$

dengan  $x = 1$  (2014) hingga  $x = 11$  (2024), mengindikasikan kenaikan suhu rata-rata sebesar  $0,05^\circ\text{C}$  per tahun atau setara  $0,55^\circ\text{C}$  selama satu dekade.

### 3. Diskusi

Curah hujan merupakan parameter dengan variabilitas tertinggi di antara ketiga parameter yang dianalisis. Berdasarkan perhitungan IVI, Papua (PT. Freeport) memiliki IVI tertinggi sebesar 0,48 (kategori tinggi), yang berarti standar deviasi curah hujan mencapai 48% dari nilai rata-ratanya. Nusa Tenggara Barat (PT. AMNT) memiliki IVI sebesar 0,29 (kategori sedang-tinggi), mencerminkan fluktuasi curah hujan yang juga signifikan meskipun dengan volume absolut jauh lebih rendah.

Pola curah hujan yang teridentifikasi melalui pemodelan matematis menunjukkan anomali sistematis: terdapat peningkatan ekstrem pada tahun 2017 ( $x = 4$ ) yang berkorelasi dengan fase La Niña, dan penurunan ekstrem pada 2019 ( $x = 6$ ) yang berkorelasi dengan El Niño. Secara matematis, jika titik anomali 2017 dan 2019 dimasukkan dalam pemodelan, nilai  $R^2$  meningkat signifikan, mengkonfirmasi bahwa ENSO merupakan prediktor matematis yang kuat untuk variabilitas curah hujan di wilayah pertambangan Indonesia. Model regresi untuk Papua (PT. Freeport) menghasilkan:

$$yR = 6.142 + 42x \quad (R^2 = 0,19)$$

Gradien positif ( $bR = +42$  mm/tahun) di Papua mengindikasikan tren peningkatan curah hujan jangka panjang, sementara  $R^2$  yang rendah (0,19) mencerminkan besarnya gangguan variabilitas interannual terhadap tren linear. Sebaliknya, PT. ANTAM di Jawa Barat memiliki gradien negatif ( $bR = -18$  mm/tahun), mengindikasikan tren penurunan curah hujan yang berimplikasi pada risiko kekeringan air operasional jangka panjang.

### 4. Analisis Tren Kelembaban

Kelembaban relatif menunjukkan tren yang lebih stabil dibandingkan curah hujan, namun tetap memperlihatkan variasi regional yang signifikan. Temuan paling menonjol adalah tren peningkatan kelembaban di PT. Adaro Energi, Kalimantan Selatan, dengan gradien  $bH = +0,52\%/tahun$  dan  $R^2 = 0,71$  — nilai  $R^2$  tertinggi di antara semua model yang dibangun dalam penelitian ini. Secara matematis:

$$yH = 72,8 + 0,52x \quad (R^2 = 0,71)$$

Tren ini mengindikasikan bahwa kelembaban di Kalimantan Selatan meningkat secara konsisten dan signifikan selama periode pengamatan. Secara operasional, peningkatan kelembaban yang terus-menerus berimplikasi pada percepatan korosi peralatan tambang, peningkatan biaya pemeliharaan, dan penurunan efisiensi kerja. PT. Freeport di Papua memiliki kelembaban tertinggi secara absolut ( $H = 92\%$ ), sedangkan PT. Bukit Asam di Sumatera Selatan memiliki kelembaban terendah ( $H = 76\%$ ).

### 5. Perbandingan IVI dan Implikasi Risiko Operasional

Tabel 3 merangkum kategorisasi IVI curah hujan dan implikasi risiko operasional yang bersesuaian untuk setiap wilayah pertambangan. IVI menyediakan ukuran matematis yang memungkinkan perbandingan risiko iklim antar wilayah secara kuantitatif dan terstandarisasi.

**Tabel 3.** Kategorisasi Indeks Variabilitas Iklim (IVI) dan Implikasi Risiko

Lokasi	IVI	Kategori	Implikasi Risiko Operasional
PT. Freeport Indonesia (Papua)	0,48	Tinggi	Risiko banjir tambang, erosi, dan longsor sangat tinggi; perlu sistem drainase kapasitas besar
PT. GAG Nikel (Papua)	0,41	Tinggi	Fluktuasi operasi tinggi; manajemen air kritis terutama saat La Niña
PT. Agincourt Resources (Sumut)	0,33	Tinggi	Perencanaan cadangan air dan jadwal kerja wajib mempertimbangkan variasi curah hujan
PT. AMNT (NTB)	0,29	Sedang-Tinggi	Risiko kekeringan saat El Niño; strategi pengelolaan air terpadu diperlukan
PT. Adhi Kartiko (Sulawesi Tgr.)	0,28	Sedang	Pemantauan curah hujan berkala; jadwal tambang fleksibel
PT. Berau Coal (Kaltim)	0,25	Sedang	Risiko sedang; pemeliharaan drainase standar mencukupi
PT. Bukit Asam (Sumsel)	0,24	Sedang	Suhu stabil dan kelembaban rendah — kondisi operasional relatif menguntungkan
PT. Adaro Energi (Kalsel)	0,27	Sedang	Perhatian pada tren kelembaban meningkat ( $R^2 = 0,71$ ); antisipasi korosi peralatan

PT. Vale Indonesia (Sulawesi Sel.)	0,21	Sedang	Variabilitas sedang; ENSO perlu diintegrasikan dalam perencanaan musiman
PT. BSI (Jawa Tim.)	0,22	Sedang	Manajemen air musiman penting; tren curah hujan menurun jangka panjang
PT. ANTAM (Jawa Bar.)	0,18	Rendah-Sedang	Variabilitas terendah; kondisi iklim paling dapat diprediksi di antara semua lokasi

Dari perspektif matematis, terdapat korelasi negatif yang kuat antara rata-rata curah hujan tahunan dan IVI untuk wilayah-wilayah kering ( $r = -0,68$  untuk lokasi dengan  $\bar{R} < 3.000$  mm), namun korelasi ini melemah untuk wilayah basah. Hal ini menunjukkan bahwa pada wilayah dengan curah hujan rendah (seperti NTB), persentase fluktuasi relatif terhadap rata-rata justru lebih besar, sehingga meskipun volume hujan lebih sedikit, ketidakpastiannya bagi operasi tambang tetap signifikan.

**6. Validasi Model dan Keterbatasan Matematis**

Validasi model dilakukan dengan membandingkan nilai prediksi regresi linear terhadap data aktual menggunakan Mean Absolute Percentage Error (MAPE):

$$MAPE = (1/n) \times \sum |y \text{ aktual} - y \text{ model}| / y \text{ aktual} \times 100\%$$

Nilai MAPE untuk model suhu berada pada kisaran 0,5–1,8%, mengindikasikan akurasi prediksi yang sangat baik. Untuk curah hujan, MAPE berkisar antara 8,2–24,6%, mencerminkan keterbatasan regresi linear dalam menangkap fluktuasi ekstrem yang dipengaruhi ENSO. Nilai MAPE curah hujan yang tinggi pada Papua (24,6%) dan NTB (22,1%) mengkonfirmasi bahwa model regresi linear perlu dilengkapi dengan model yang mampu mengakomodasi non-linearitas, seperti regresi polinomial atau model ARIMA, sebagai rekomendasi penelitian lanjutan.

**SIMPULAN**

Penelitian ini berhasil membangun model matematis berbasis regresi linear  $y = a + bx$  dan Indeks Variabilitas Iklim (IVI) untuk menganalisis tren suhu, curah hujan, dan kelembaban pada 11 wilayah pertambangan mineral logam dan batubara di Indonesia periode 2014–2024. Beberapa simpulan utama yang dapat ditarik adalah sebagai berikut.

Pertama, model regresi linear suhu menghasilkan gradien  $bT$  berkisar  $+0,02$  hingga  $+0,08^\circ\text{C}/\text{tahun}$  di seluruh lokasi ( $R^2 = 0,12-0,40$ ), mengindikasikan tren pemanasan yang konsisten namun dengan pengaruh variasi interannual yang dominan. Rata-rata agregat seluruh lokasi menghasilkan persamaan  $\bar{y}T = 27,57 + 0,05x$ , setara kenaikan  $0,55^\circ\text{C}$  per dekade.

Kedua, curah hujan memiliki variabilitas tertinggi dengan IVI berkisar 0,18–0,48. Papua (PT. Freeport) mencatat IVI tertinggi (0,48) dan curah hujan rata-rata tertinggi ( $>5.800$  mm/tahun), sementara NTB (PT. AMNT) memiliki IVI tertinggi ketiga (0,29) dengan curah hujan terendah ( $\sim 2.100$  mm/tahun). Anomali 2017 (La Niña) dan 2019 (El Niño) teridentifikasi sebagai faktor utama yang mendistorsi tren linear.

Ketiga, kelembaban relatif menunjukkan tren paling signifikan di Kalimantan Selatan (PT. Adaro) dengan model  $yH = 72,8 + 0,52x$  ( $R^2 = 0,71$ ) kekuatan tren tertinggi di antara semua model yang dibangun. Temuan ini berimplikasi pada peningkatan risiko korosi peralatan tambang yang perlu diantisipasi.

Keempat, validasi menggunakan MAPE menunjukkan bahwa model regresi linear memiliki akurasi tinggi untuk suhu (MAPE  $< 2\%$ ) namun terbatas untuk curah hujan (MAPE 8–25%), sehingga model lanjutan seperti regresi polinomial atau ARIMA direkomendasikan untuk penelitian berikutnya guna mengakomodasi non-linearitas data iklim pertambangan Indonesia.

**UCAPAN TERIMA KASIH**

Penulis menyampaikan terima kasih kepada seluruh pihak yang telah memberikan dukungan dalam penyusunan penelitian ini, khususnya kepada Program Studi Teknik Pertambangan, Universitas Pembangunan Nasional, atas fasilitas dan dukungan akademis yang diberikan.

## DAFTAR PUSTAKA

- Adi, R. N., & Savitri, E. (2022). The effect of land cover changes on the 2021 flood in the Barito watershed, South Kalimantan. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1109(1), Article 012017. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1109/1/012017>
- Almazroui, M., Islam, M. N., Saeed, F., Saeed, S., & Ismail, M. (2020). Future changes in climate over the Arabian Peninsula based on CMIP6 multimodel simulations. *Earth Systems and Environment*, 4(4), 611–630. <https://doi.org/10.1007/s41748-020-00183-5>
- Boudiaf, B., Dabanli, I., Boutaghane, H., & Sen, Z. (2020). Temperature and precipitation risk assessment under climate change effect in Northeast Algeria. *Earth Systems and Environment*, 4(1), 1–14. <https://doi.org/10.1007/s41748-019-00136-7>
- Collins, S. P., Kuginis, L., Creelman, R., Blandford, D., Paish, M., Raine, I., & Brodie, R. (2021). Groundwater system responses to mining activities. In *Australian Groundwater Modelling Guidelines* (pp. 167–186). Geoscience Australia.
- Driouech, F., ElRhaz, K., Moufouma-Okia, W., Arjdal, K., & Balhane, S. (2020). Assessing future changes of climate extreme events in the CORDEX-MENA region using regional climate model ALADIN-Climate. *Earth Systems and Environment*, 4(3), 477–492. <https://doi.org/10.1007/s41748-020-00169-3>
- Hamdi, R., Giot, O., De Troch, R., Deckmyn, A., & Termonia, P. (2020). The state-of-the-art of urban climate change modeling and observations. *Earth Systems and Environment*, 4(4), 631–646. <https://doi.org/10.1007/s41748-020-00193-3>
- IPCC. (2019). *Climate change and land: An IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems* (P. R. Shukla et al., Eds.). <https://www.ipcc.ch/srccl/>
- Ivanov, S. L., Ivanova, P. V., & Kuvshinkin, S. U. (2019). Weather conditions as a factor affecting the performance of modern powerful mining excavators. *Journal of Physics: Conference Series*, 1399(4), Article 044070. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1399/4/044070>
- Köppen, W. (1918). Klassifikation der Klimate nach Temperatur, Niederschlag und Jahresablauf [Classification of climates according to temperature, precipitation and seasonal cycle]. *Petermanns Geographische Mitteilungen*, 64, 193–203, 243–248. (Updated by R. Geiger, 1954 and 1961)
- Köppen, W., Volken, E., & Brönnimann, S. (2011). The thermal zones of the Earth according to the duration of hot, moderate and cold periods and to the impact of heat on the organic world. *Meteorologische Zeitschrift*, 20(3), 351–360. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2011/105>
- Krishnamurthy, V. (2019). Predictability of weather and climate. *Earth and Space Science*, 6(7), 1043–1056. <https://doi.org/10.1029/2019EA000586>
- Lestari, F., Yusuf, S. M., Harijono, S. W. B., Nurdin, E., Rachman, I., Ridwan, I., & Gernowo, R. (2024). Estimating the flood, landslide, and heavy rainfall susceptibility of vaccine transportation after 2021 flooding in South Kalimantan Province, Indonesia. *Sustainability*, 16(4), Article 1554. <https://doi.org/10.3390/su16041554>
- Locke, P., Clifton, C., Westra, S., & Whaley, M. (2011). Climate adaptation: Extreme weather events and the mining industry. *Bulk Solids Handling*, 31(3), 136–138.
- Madinah, N., Sudiar, N. Y., Amir, H., & Dwiridal, L. (2025). Analisis kondisi atmosfer saat kejadian hujan ekstrem di Sumatera Barat (studi kasus: 7–8 Maret 2024). *Jurnal Sains dan Teknologi*, 9(2), 6358–6369.
- McGuirk, M., Shuford, S., Peterson, T. C., & Pisano, P. (2009). Weather and climate change implications for surface transportation in the USA. *Climatic Change*, 58(April), 84–93. <https://doi.org/10.1007/s10584-009-9673-1>
- Musdalifa, M., Prima, E., & Pratiwi, A. (2025). Analisis spasial kekeringan menggunakan metode standardized precipitation evapotranspiration index di Nusa Tenggara Barat. *Jurnal Sains Informasi Geografi*, 5(1), 178–187.
- Northey, S. A., Mudd, G. M., Saarivuori, E., Wessman-Jääskeläinen, H., & Haque, N. (2017). The
- Supriadin/ Kondisi Iklim Masa Lalu dan Sekarang Terhadap Aktivitas Pertambang Mineral Logam dan Batubara di Indonesia

- exposure of global base metal resources to water criticality, scarcity and climate change. *Global Environmental Change*, 44, 109–124. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2017.04.004>
- Novitasari, N., & Kurdi, H. (2022). Flood mitigation in Banjar Regency, South Kalimantan, Indonesia in 2021: Between hydro-meteorological factor and anthropogenic factor. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 999(1), Article 012010. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/999/1/012010>
- Oreskes, N. (2004). The scientific consensus on climate change. *Science*, 306(5702), 1686. <https://doi.org/10.1126/science.1103618>
- Pearce, T. D., Ford, J. D., Laidler, G. J., Smit, B., Duerden, F., Allarut, M., Andrachuk, M., Baryluk, S., Dialla, A., Elee, P., Goose, A., Ikummaq, T., Joamie, E., Kataoyak, F., Loring, E., Meakin, S., Nickels, S., Shappa, K., Shirley, J., & Wandel, J. (2011). Community collaboration and climate change research in the Canadian Arctic. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 16(3), 347–368. <https://doi.org/10.1007/s11027-010-9269-3>
- Pratama, M. B., Multazima, R., & Azkiarizqi, I. N. (2021). Hydro-meteorological aspects of the 2021 South Kalimantan flood: Topography, tides, and precipitation. *International Journal of Remote Sensing and Earth Sciences*, 18(1), 73. <https://doi.org/10.30536/j.ijreses.2021.v18.a3539>
- Simmons, C. T., & Matthews, H. D. (2016). Assessing the implications of human land-use change for the transient climate response to cumulative carbon emissions. *Environmental Research Letters*, 11(3), Article 035001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/3/035001>
- Slingo, J., & Palmer, T. (2011). Uncertainty in weather and climate prediction. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 369(1956), 4751–4767. <https://doi.org/10.1098/rsta.2011.0161>
- Smith, K. (1993). The influence of weather and climate on recreation and tourism. *Weather*, 48(12), 398–404. <https://doi.org/10.1002/j.1477-8696.1993.tb05828.x>
- Tulak, N., Bungkang, Y., & Huda, H. (2022). Analisis spektral data curah hujan dan kejadian curah hujan ekstrim di wilayah Kota Jayapura. *Jurnal Meteorologi dan Geofisika*, 23(1), 44. <https://doi.org/10.31172/jmq.v23i1.653>