VOCATECH: Vocational Education and Technology Journal 8, 2 (2026): 193-201
Website: http://ojs.aknacehbarat.ac.id/index.php/vocatech/index
ISSN 2716-5183 (online) ISSN 2686-4770 (print)

MODEL ESTIMASI GLOBAL TILTED IRRADIANCE MENGGUNAKAN PRINCIPAL COMPONENT REGRESSION DI WILAYAH SUMATERA

Rika Sri Utami[1*]
Riski Arifin[2]

[1]Program Studi Teknik Elektro
Universitas Syiah Kuala
Jalan Syech Abdurrauf No. 3, Kopelma Darussalam, Banda Aceh, 23111, INDONESIA
[2] Program Studi Teknik Industri
Universitas Syiah Kuala
Jalan Syech Abdurrauf No. 3, Kopelma Darussalam, Banda Aceh, 23111, INDONESIA

Abstract

This study aims to develop a model for estimating Global Tilted Irradiance (GTI) in the Sumatra region using the Principal Component Regression (PCR) method. The data used consist of solar radiation and meteorological parameters obtained from the Global Solar Atlas, including Direct Normal Irradiance (DNI), Global Horizontal Irradiance (GHI), Diffuse Irradiance (DIF), air temperature, and regional elevation across 154 districts/cities. The multicollinearity test indicates a high correlation among independent variables, with Variance Inflation Factor (VIF) values > 10 and tolerance values < 0.10, making multiple linear regression unsuitable. Therefore, variable transformation was performed using Principal Component Analysis (PCA) before constructing the regression model. The PCA results show that two principal components can explain 86.9% of the data variance. The resulting PCR model is statistically significant with an R^2 value of 0.792, indicating that the model can explain 79.2% of the variation in GTI. The findings demonstrate that PCR is effective in addressing multicollinearity and produces a stable GTI estimation model in tropical regions.

Keywords:
Global Tilted Irradiance, Principal Component Regression, Principal Component Analysis, Multicollinearity, Solar Radiation

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk membangun model estimasi Global Tilted Irradiance (GTI) di wilayah Sumatera menggunakan metode Principal Component Regression (PCR). Data yang digunakan merupakan data radiasi surya dan parameter meteorologi yang diperoleh dari Global Solar Atlas, meliputi Direct Normal Irradiance (DNI), Global Horizontal Irradiance (GHI), Diffuse Irradiance (DIF), temperatur udara, dan elevasi wilayah pada 154 kabupaten/kota. Uji multikolinearitas menunjukkan adanya korelasi tinggi antar variabel independen dengan nilai Variance Inflation Factor (VIF) > 10 dan tolerance < 0,10 sehingga regresi linear berganda tidak layak digunakan. Oleh karena itu, dilakukan transformasi variabel menggunakan Principal Component Analysis (PCA) sebelum membangun model regresi. Hasil PCA menunjukkan dua komponen utama mampu menjelaskan 86,9% variasi data. Model PCR yang dihasilkan signifikan secara statistik dengan nilai R^2 sebesar 0,792, yang menunjukkan bahwa model mampu menjelaskan 79,2% variasi GTI. Hasil penelitian menunjukkan bahwa PCR efektif dalam mengatasi multikolinearitas dan menghasilkan model estimasi GTI yang stabil di wilayah tropis.

Kata Kunci:
Global Tilted Irradiance; Principal Component Regression; Principal Component Analysis; Multikolinearitas; Radiasi Surya

DOI: 10.38038/vocatech.v8i2.332
Received: 10 May 2026; Accepted: 29 July 2026; Published: 30 October 2026

[*]**Corresponding author:**
Rika Sri Utami, Program Studi Teknik Elektro, Universitas Syiah Kuala, Jalan Syech Abdurrauf No. 3, Kopelma Darussalam, Banda Aceh, 23111, INDONESIA
Email: rikasriutami@usk.ac.id

Citation in APA Style: Utami, R.S. & Arifin, R (2026). Model estimasi global tilted irradiance menggunakan principal component regression di wilayah Sumatera. *VOCATECH: Vocational Education and Technology Journal, 8*(2), 193-201.

1. PENDAHULUAN

Kebutuhan energi yang terus meningkat akibat pertumbuhan penduduk dan aktivitas ekonomi mendorong negara-negara di dunia untuk mencari sumber energi yang lebih berkelanjutan dan handal. (Dwi Waluyo et al., 2024; Prasetiyo et al., 2022). Ketergantungan pada bahan bakar fosil menghadirkan tantangan besar dalam hal ketersediaan jangka panjang, harga yang fluktuatif, dan dampak lingkungan yang signifikan. Dalam konteks pembangunan energi global, energi surya menjadi salah satu sumber yang paling menarik karena melimpahnya radiasi matahari yang mencapai permukaan bumi, terutama di wilayah tropis seperti Asia Tenggara (Afif dan & Martin, 2022; Ferdyson & Windarta, 2023).

Sistem tenaga surya, khususnya teknologi fotovoltaik, mengubah energi radiasi matahari menjadi energi listrik tanpa emisi gas rumah kaca secara langsung. Efektivitas sistem ini sangat ditentukan oleh karakteristik radiasi matahari di suatu lokasi, sehingga dibutuhkan model estimasi radiasi yang akurat untuk mendukung perencanaan dan desain sistem tenaga surya (Ertekin, 2020; Rifky et al., 2021; Sianturi, 2021). Di kawasan Indonesia, khususnya Pulau Sumatera yang berada di zona tropis, radiasi matahari relatif tinggi dan berpotensi besar untuk dimanfaatkan melalui instalasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) skala kecil maupun besar. Pemetaan dan pemodelan radiasi surya di wilayah ini menjadi sangat penting untuk memastikan bahwa potensi sumber energi dapat dimanfaatkan secara optimal (Dwi Cahyono et al., 2023).

Dalam studi radiasi matahari, terdapat beberapa parameter yang sering digunakan untuk menggambarkan intensitas dan distribusi radiasi matahari. *Direct Normal Irradiance* (DNI) kWh/m²/day menunjukkan radiasi langsung yang diterima permukaan yang tegak lurus terhadap sinar matahari, sedangkan *Global Horizontal Irradiance* (GHI) kWh/m²/day mencakup total radiasi pada permukaan horizontal yang terdiri dari komponen langsung dan difus (*Diffuse Irradiance*, DIF). Selain itu, kondisi atmosfer seperti temperatur udara dan elevasi wilayah turut memengaruhi jumlah radiasi yang mencapai permukaan bumi. *Global Tilted Irradiance* (GTI) kWh/m²/day merupakan radiasi global yang jatuh pada permukaan miring sesuai sudut panel surya yang dipasang, sehingga menjadi parameter yang lebih relevan untuk estimasi energi yang dihasilkan oleh panel surya secara real (Ebhota & Tabakov, 2024; Le Gal La Salle & Le Gal La Salle Qualité, 2021).

Beberapa penelitian telah menekankan pentingnya pemetaan dan analisis potensi energi surya sebagai dasar perencanaan sistem pembangkit tenaga surya. Penelitian yang dilakukan oleh Utami dan Arifin (Utami & Arifin, 2025) menunjukkan bahwa wilayah Pulau Sumatera memiliki variasi potensi radiasi surya yang cukup signifikan antar kabupaten/kota. Melalui pendekatan pengolahan data radiasi matahari berskala regional, penelitian tersebut menegaskan bahwa analisis radiasi surya tidak hanya penting untuk pemetaan potensi, tetapi juga sebagai landasan pengambilan keputusan dalam pengembangan energi surya yang lebih efisien dan terarah.

Dalam konteks metodologi statistik klasik, pemodelan GTI sering kali menghadapi tantangan ketika komponen radiasi seperti DNI, GHI, dan DIF digunakan secara bersamaan sebagai variabel prediktor (Marion, 2015). Kondisi ini menimbulkan multikolinearitas dalam regresi linear berganda (*Multiple Linear Regression*/MLR). Multikolinearitas menyebabkan koefisien regresi menjadi tidak stabil, standar error membesar, serta interpretasi pengaruh masing-masing variabel menjadi kurang reliabel (Shrestha, 2020). Untuk mengatasi permasalahan tersebut, pendekatan *Principal Component Regression (PCR)* digunakan sebagai alternatif. PCR mengombinasikan *Principal Component Analysis (PCA)* dan regresi linear, di mana PCA mentransformasikan variabel-variabel yang saling berkorelasi menjadi sejumlah komponen utama yang saling ortogonal (tidak berkorelasi) (Ergişi et al., 2024; Valencia et al., 2021). Komponen-komponen inilah yang kemudian digunakan sebagai variabel prediktor dalam model regresi.

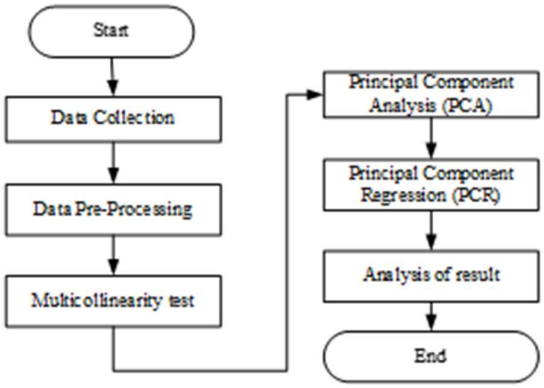
Seperti penelitian oleh Jain et al. (2025a) yang menerapkan *Principal Component Regression (PCR)* dalam memodelkan polutan udara di Delhi, dan menemukan bahwa PCR memberikan estimasi yang lebih akurat dengan kestabilan koefisien yang lebih baik dibandingkan regresi linear biasa di tengah variabel-variabel lingkungan yang berkorelasi tinggi. Studi lain oleh Li et al. (2023) menerapkan PCR dalam pemodelan radiasi permukaan dan menunjukkan performa lebih baik dibandingkan beberapa metode regresi lainnya dalam memprediksi distribusi radiasi permukaan di Reunion Island. Studi di bidang meteorologi lain juga menunjukkan bahwa PCR efektif dalam mereduksi dimensi variabel bebas dan menghasilkan model stabil, seperti pada prediksi konsentrasi PM10 dengan variabel meteorologi (Pasic et al., 2023).

Berdasarkan potensi radiasi surya yang tinggi di wilayah Sumatera serta adanya permasalahan multikolinearitas antar variabel radiasi dan meteorologi, penelitian ini dilakukan untuk mengembangkan model estimasi *Global Tilted Irradiance (GTI)* menggunakan *Principal Component Regression*. Variabel independen yang digunakan meliputi DNI, GHI, DIF, temperatur udara, dan elevasi wilayah, sedangkan GTI sebagai variabel terikat. Pemilihan metode PCR didasarkan pada pertimbangan metodologis bahwa teknik ini mampu mengatasi korelasi tinggi antar variabel bebas dan menghasilkan model estimasi yang lebih stabil

serta signifikan secara statistik dibandingkan regresi linear berganda konvensional. Penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi dalam pengembangan model estimasi radiasi surya yang lebih andal untuk wilayah tropis, khususnya Sumatera.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan tujuan membangun model estimasi Global Tilted Irradiance (GTI) berbasis data radiasi surya dan parameter meterologi. Berikut merupakan flowchart pada penelitian ini.



Gambar 1. Flowchart penelitian

2.1. Pengumpulan Data

Data yang dikumpulkan pada penelitian ini merupakan data sekunder yang bersumber dari *Global Solar Atlas* (GSA) yang dikembangkan oleh World Bank Group bekerja sama dengan *Energy Sector Management Assistance Program* (ESMAP). Data yang digunakan terdiri atas data radiasi matahari, meteorologi, dan geografis pada 154 kabupaten/kota di wilayah Sumatera yang mencakup 10 provinsi. Data yang diunduh pada tahun 2026 berupa nilai rata-rata tahunan (*annual average*) untuk setiap variabel penelitian. Variabel independen meliputi *Direct Normal Irradiance* (DNI), *Global Horizontal Irradiance* (GHI), *Diffuse Horizontal Irradiance* (DIF), temperatur udara (TEMP), dan elevasi (ELE), sedangkan variabel dependen yang digunakan adalah *Global Tilted Irradiance* (GTI).

2.2. Pra Pemrosesan Data

Tahap pra-pemrosesan data dilakukan untuk memastikan bahwa data yang digunakan memenuhi asumsi dasar analisis statistik. Proses ini meliputi pemeriksaan kelengkapan data untuk mengidentifikasi nilai hilang (*missing values*), pengecekan konsistensi data, serta identifikasi nilai pencilan (outliers). Selain itu, dilakukan penyamaan format dan satuan pengukuran agar seluruh variabel dapat dianalisis secara konsisten. Pra-pemrosesan ini bertujuan untuk meminimalkan potensi bias dan kesalahan analisis yang dapat memengaruhi hasil pemodelan.

2.3. Uji Multikolinearitas

Sebelum membangun model utama, dilakukan uji multikolinearitas menggunakan regresi linear berganda awal. Uji ini bertujuan untuk mengetahui tingkat korelasi antar variabel independen. Indikator yang digunakan adalah nilai Variance Inflation Factor (VIF) dan nilai tolerance. Secara matematis, VIF merupakan kebalikan dari nilai Tolerance, dengan persamaan:

$$\text{VIF} = \frac{1}{\text{Tolerance}} \tag{1}$$

Kriteria yang digunakan dalam penelitian ini adalah nilai VIF < 10 dan nilai Tolerance > 0,10 sebagai indikasi tidak terjadinya multikolinearitas. Apabila nilai VIF melebihi 10 atau nilai Tolerance kurang dari 0,10, maka dinyatakan terjadi multikolinearitas yang signifikan (Mariansyah & Syarif, 2020; Susilawati & Didiharyono, 2023). Jika kondisi tersebut terjadi, maka regresi linear berganda konvensional tidak layak digunakan sebagai model utama, sehingga diperlukan metode alternatif untuk mengatasi korelasi antar variabel, yaitu Principal Component Regression (PCR) (Ayinde et al., 2020; Upendra et al., n.d.).

2.4 *Principal Component Analysis* dan *Principal Component Regression*

Untuk mengatasi permasalahan multikolinearitas, penelitian ini menerapkan Principal Component Analysis (PCA) sebagai metode transformasi variabel (Hasanah et al., 2023; Sari, 2023). PCA bertujuan untuk mereduksi dimensi data dengan membentuk sejumlah komponen utama yang merupakan kombinasi linier dari variabel asli dan saling tidak berkorelasi. Analisis PCA dilakukan dengan memperhatikan nilai eigenvalue dan persentase varians yang dijelaskan oleh masing-masing komponen. Komponen utama yang memiliki nilai eigenvalue lebih besar dari satu serta mampu menjelaskan sebagian besar varians data dipilih untuk tahap analisis selanjutnya. Dengan demikian, PCA memungkinkan penyederhanaan struktur data tanpa kehilangan informasi penting yang terkandung dalam variabel asli.

Secara konseptual, PCA bekerja dengan mereduksi dimensi data melalui pembentukan komponen utama yang mampu menangkap variasi terbesar dalam data. Komponen utama pertama (Principal Component 1) menjelaskan proporsi varians terbesar dari keseluruhan data, sedangkan komponen berikutnya menjelaskan variasi terbesar berikutnya dengan syarat tidak berkorelasi dengan komponen sebelumnya. Proses ini memungkinkan penyederhanaan struktur data yang kompleks menjadi sejumlah komponen yang lebih sedikit, namun tetap mampu merepresentasikan informasi utama dari variabel asli.

Komponen utama yang terpilih dari hasil PCA selanjutnya digunakan sebagai variabel independen dalam model Principal Component Regression (PCR). PCR mengombinasikan keunggulan PCA dalam mereduksi dimensi dengan regresi linear dalam membangun hubungan antara variabel prediktor dan variabel respon (Raheem et al., 2019; Wibowo & Ridha, 2020). Penggunaan PCR bertujuan untuk menghasilkan model estimasi GTI yang lebih stabil dan bebas dari multikolinearitas (Stasinopoulos et al., 2021). Evaluasi model PCR dilakukan melalui uji signifikansi simultan (ANOVA) untuk menilai pengaruh komponen utama terhadap GTI secara bersama-sama, serta melalui analisis koefisien determinasi (R^2 dan Adjusted R^2) untuk mengukur kemampuan model dalam menjelaskan variasi GTI. Model PCR dibangun dengan meregresikan GTI terhadap komponen utama yang diperoleh dari PCA. Model regresi dinyatakan dalam bentuk:

$$GTI=\beta_0+\beta_1 PC_1+\beta_2 PC_2+\cdots+\beta_k PC_k \quad (2)$$

di mana:

β_0 adalah konstanta,
$\beta_1,\beta_2,\ldots,\beta_k$ adalah koefisien regresi masing-masing komponen utama,
$PC_1,PC_2,\ldots,PC_k$ adalah komponen utama terpilih,
k adalah jumlah komponen utama yang digunakan dalam model

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Uji Multikolnearitas Regresi Linear Berganda

Uji multikolinearitas dilakukan untuk mengetahui ada tidaknya hubungan linear yang kuat antar variabel bebas. Hasil pengujian menunjukkan bahwa beberapa variabel memiliki nilai Variance Inflation Factor (VIF) yang melebihi batas toleransi (>10), serta nilai tolerance yang rendah (<0,10). Hal ini mengindikasikan adanya multikolinearitas yang kuat pada model regresi linear berganda.

Tabel 1. Uji multikolinearitas

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	Collinearity Statistics	
		B	Std. Error	Beta			Tolerance	VIF
1	(Constant)	-81,374	22,606		-3,600	,000		
	DNI	,053	,022	,076	2,341	,021	,021	46,555
	GHI	,965	,028	,938	34,125	,000	,030	33,395
	DIF	,114	,035	,056	3,293	,001	,077	12,904
	TEMP	-,462	,730	-,014	-,633	,528	,050	20,101
	ELE	-,001	,004	-,005	-,230	,818	,052	19,106

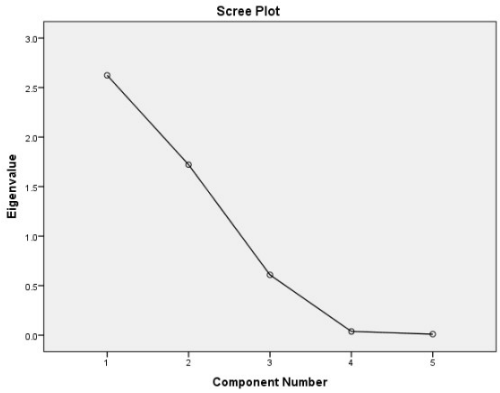
a. Dependent variable: GTI

Hasil uji multikolinearitas menunjukkan bahwa seluruh variabel independen dalam model regresi memiliki nilai tolerance di bawah 0,10 dan nilai VIF di atas 10, yang mengindikasikan adanya multikolinearitas. Kondisi ini menunjukkan bahwa model regresi linear berganda belum memenuhi asumsi klasik, sehingga berpotensi menghasilkan koefisien regresi yang tidak stabil dan kurang reliabel. Oleh karena

itu, diperlukan metode alternatif yang mampu menangani korelasi antar variabel independen, seperti *Principal Component Regression* (PCR), agar diperoleh model yang lebih stabil dan akurat dalam mengestimasi *Global Tilted Irradiance* (GTI).

3.2. Uji Multikolnearitas Regresi Linear Berganda

Principal Component Analysis (PCA) diterapkan untuk mentransformasi variabel independen menjadi sejumlah komponen utama yang saling tidak berkorelasi secara linier. Tujuan penerapan PCA dalam penelitian ini adalah untuk mereduksi dimensi data sekaligus mengatasi permasalahan multikolinearitas antar variabel independen sebelum dilakukan pemodelan regresi.



Gambar 1. Screen plot

Screen plot menunjukkan bahwa hanya dua komponen utama yang memiliki nilai eigenvalue lebih besar dari satu. Setelah komponen kedua, penurunan eigenvalue cenderung landai, sehingga dua komponen utama dipertahankan dan digunakan dalam model *Principal Component Regression* (PCR).

Tabel 2. Total variance explained

Component	Initial Eigenvalues			Extraction Sums of Squared Loadings		
	Total	% of Variance	Cumulative %	Total	% of Variance	Cumulative %
1	2,624	52,478	52,478	2,624	52,478	52,478
2	1,721	34,422	86,900	1,721	34,422	86,900
3	,608	12,169	99,069			
4	,037	,736	99,804			
5	,010	,196	100,000			

Extraction Method: Principal component analysis.

Berdasarkan hasil PCA yang disajikan pada Tabel Total Variance Explained, komponen utama pertama yakni DNI memiliki nilai eigenvalue sebesar 2,624 dan mampu menjelaskan 52,478% variasi data. Komponen utama kedua yakni GHI memiliki nilai eigenvalue sebesar 1,721 dengan kontribusi variasi sebesar 34,422%. Dengan demikian, dua komponen utama pertama secara kumulatif mampu menjelaskan 86,900% total variasi data, yang menunjukkan bahwa sebagian besar informasi dalam variabel independen dapat direpresentasikan oleh dua komponen tersebut. Sementara itu, komponen utama ketiga hingga kelima memiliki nilai eigenvalue kurang dari satu dan kontribusi variasi yang relatif kecil. Oleh karena itu, sesuai dengan kriteria eigenvalue > 1, hanya dua komponen utama pertama yang dipertahankan dan digunakan pada tahap selanjutnya dalam pembentukan model Principal Component Regression (PCR). Hasil ini menunjukkan bahwa PCA efektif dalam mereduksi kompleksitas data tanpa kehilangan informasi yang signifikan, serta menyediakan dasar yang kuat untuk membangun model regresi yang lebih stabil dan bebas dari multikolinearitas.

3.3. *Principal Component Analysis* (PCR)

Model *Principal Component Regression* (PCR) dibangun dengan menggunakan komponen utama yang diperoleh dari tahap *Principal Component Analysis* (PCA). Berdasarkan hasil PCA, dua komponen utama dipilih karena memiliki nilai *eigenvalue* lebih besar dari satu dan mampu menjelaskan sebagian besar variasi data. Komponen utama tersebut merupakan kombinasi linier dari variabel asli, yaitu *Direct Normal Irradiance* (DNI),

Global Horizontal Irradiance (GHI), *Diffuse Irradiance* (DIF), temperatur udara, dan elevasi wilayah. Dengan demikian, kedua komponen utama tersebut mampu merepresentasikan informasi utama dari seluruh variabel prediktor yang digunakan dalam penelitian ini.

Penggunaan komponen utama sebagai variabel bebas dalam model regresi bertujuan untuk mengatasi permasalahan multikolinearitas yang sebelumnya terdeteksi pada variabel independen. Pada regresi linear berganda konvensional, adanya korelasi yang tinggi antar variabel bebas dapat menyebabkan ketidakstabilan koefisien regresi serta meningkatkan nilai *standard error*, sehingga interpretasi model menjadi kurang reliabel. Melalui pendekatan PCR, variabel-variabel yang saling berkorelasi ditransformasikan menjadi komponen utama yang bersifat saling ortogonal (tidak berkorelasi), sehingga model regresi yang dihasilkan menjadi lebih stabil dan dapat memberikan estimasi yang lebih akurat.

Model PCR dalam penelitian ini secara umum dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$GTI=\beta_0+\beta_1 PC_1+\beta_2 PC_2 \quad (3)$$

Pada persamaan tersebut, GTI merupakan variabel dependen yang diestimasi dalam penelitian ini. Simbol β_0 menyatakan konstanta model regresi, sedangkan β_1 dan β_2 merupakan koefisien regresi yang menunjukkan pengaruh masing-masing komponen utama terhadap GTI. Variabel PC_1 dan PC_2 merupakan komponen utama pertama dan kedua yang diperoleh dari hasil *Principal Component Analysis* (PCA) terhadap variabel asli, yaitu DNI, GHI, DIF, temperatur udara, dan elevasi wilayah. Penggunaan komponen utama yang saling tidak berkorelasi memungkinkan model regresi terbebas dari permasalahan multikolinearitas sehingga menghasilkan estimasi GTI yang lebih stabil.

Tabel 3. Uji simultan

Model		Sum of Squares	Df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	646708,805	2	323354,402	286,776	.000[b]
	Residual	170259,946	151	1127,549		
	Total	816968,751	153			

a. Dependent Variable: GTI

b. Predictors: (Constant), REGR factor score 2 for analysis 1, REGR factor score 1 for analysis 1

Berdasarkan hasil uji simultan (ANOVA), model *Principal Component Regression (PCR)* yang dibangun untuk mengestimasi *Global Tilted Irradiance (GTI)* menunjukkan signifikansi statistik yang tinggi. Nilai statistik F sebesar 286,776 dengan nilai signifikansi 0,000 ($p < 0,05$) mengindikasikan bahwa komponen utama yang digunakan dalam model secara bersama-sama berkontribusi signifikan dalam menjelaskan variasi GTI. Selanjutnya, evaluasi kinerja model dilakukan dengan mengamati nilai koefisien determinasi (R^2 dan Adjusted R^2).

Table 4. Koefisien determinasi

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	.890[a]	,792	,789	33,5790

Nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,792 mengindikasikan bahwa model PCR mampu menjelaskan 79,2% variasi *Global Tilted Irradiance (GTI)*. Sementara itu, nilai Adjusted R^2 sebesar 0,789 menunjukkan bahwa kemampuan penjelasan model tetap tinggi setelah mempertimbangkan jumlah variabel dalam model. Hal ini mengindikasikan bahwa model PCR memiliki tingkat kestabilan yang baik dan tidak mengalami *overfitting*. Selain itu, nilai *Standard Error of the Estimate* sebesar 33,5790 menunjukkan tingkat kesalahan estimasi yang relatif rendah, sehingga model PCR dapat digunakan secara andal untuk tujuan estimasi GTI.

Berdasarkan hasil tersebut, dapat disimpulkan bahwa penerapan PCR menghasilkan model estimasi GTI yang stabil dan bebas dari permasalahan multikolinearitas. Transformasi variabel melalui PCA terbukti efektif dalam meningkatkan keandalan model regresi, sehingga PCR dapat digunakan sebagai pendekatan yang sesuai untuk pemodelan GTI berbasis data radiasi surya dan parameter meteorologi.

3.4. Diskusi

Hasil penelitian menunjukkan bahwa pendekatan Principal Component Regression (PCR) mampu mengatasi permasalahan multikolinearitas yang terjadi pada model regresi linear berganda antara variabel radiasi matahari dan parameter meteorologi. Hasil uji multikolinearitas pada model awal menunjukkan

bahwa seluruh variabel independen, yaitu Direct Normal Irradiance (DNI), Global Horizontal Irradiance (GHI), Diffuse Irradiance (DIF), temperatur udara, dan elevasi wilayah memiliki nilai Variance Inflation Factor (VIF) yang tinggi serta nilai tolerance yang rendah. Kondisi ini mengindikasikan adanya korelasi kuat antar variabel bebas sehingga regresi linear berganda konvensional tidak dapat menghasilkan estimasi yang stabil. Oleh karena itu, transformasi variabel menggunakan Principal Component Analysis (PCA) dilakukan untuk menghasilkan komponen utama yang saling ortogonal sebelum digunakan dalam model regresi.

Hasil PCA menunjukkan bahwa dua komponen utama pertama mampu menjelaskan sekitar 86,9% variasi total data, yang berarti sebagian besar informasi dari variabel asli dapat direpresentasikan oleh dua komponen tersebut. Hal ini menunjukkan bahwa variabel radiasi matahari seperti DNI, GHI, dan DIF memiliki kontribusi besar dalam membentuk variasi radiasi yang diterima permukaan bumi. Secara fisik, kondisi ini dapat dijelaskan karena ketiga variabel tersebut merupakan komponen utama radiasi matahari yang menentukan besarnya energi surya yang diterima suatu permukaan. Global Horizontal Irradiance (GHI) menggambarkan total radiasi yang diterima permukaan horizontal, sementara Direct Normal Irradiance (DNI) menunjukkan radiasi langsung dari matahari, dan Diffuse Irradiance (DIF) merupakan radiasi yang telah mengalami hamburan di atmosfer. Kombinasi dari ketiga komponen ini secara langsung memengaruhi nilai Global Tilted Irradiance (GTI) yang menjadi parameter utama dalam perhitungan energi yang diterima panel surya.

Hasil model PCR juga menunjukkan bahwa komponen utama yang terbentuk memiliki pengaruh signifikan terhadap GTI secara simultan dengan nilai signifikansi yang sangat kecil ($p < 0,05$). Nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,792 menunjukkan bahwa model mampu menjelaskan sekitar 79,2% variasi GTI, yang menandakan bahwa variabel radiasi dan meteorologi yang digunakan dalam penelitian ini memiliki kontribusi yang cukup besar dalam memprediksi radiasi pada permukaan miring. Hasil ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Pereira et al. (2024) yang menunjukkan bahwa komponen radiasi langsung dan difus merupakan faktor utama dalam estimasi radiasi pada permukaan miring panel surya. Penelitian tersebut menegaskan bahwa kombinasi variabel radiasi utama mampu memberikan estimasi yang cukup akurat terhadap energi surya yang diterima panel fotovoltaik.

Selain itu, penelitian oleh Al-Dahidi et al. (2024) juga menunjukkan bahwa parameter radiasi seperti GHI dan DNI memiliki kontribusi dominan dalam pemodelan radiasi surya pada permukaan miring menggunakan pendekatan statistik maupun machine learning. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa variabel radiasi langsung dan radiasi global merupakan indikator utama dalam menentukan potensi energi surya di suatu wilayah. Hal ini mendukung hasil penelitian ini yang menunjukkan bahwa komponen utama yang terbentuk dari variabel radiasi memiliki pengaruh besar terhadap estimasi GTI.

Di sisi lain, variabel meteorologi seperti temperatur udara dan elevasi wilayah dalam penelitian ini memiliki kontribusi yang relatif lebih kecil dibandingkan variabel radiasi utama. Secara teoritis, temperatur udara dapat memengaruhi kondisi atmosfer dan efisiensi sistem fotovoltaik, namun pengaruhnya terhadap intensitas radiasi yang mencapai permukaan bumi cenderung tidak sebesar komponen radiasi langsung dan difus. Hal ini juga ditemukan dalam penelitian oleh Raju Kalla et al. (2025) yang menunjukkan bahwa variabel radiasi matahari merupakan faktor dominan dalam pemodelan Global Tilted Irradiance dibandingkan parameter meteorologi lainnya.

Meskipun model yang dihasilkan telah menunjukkan kinerja yang baik, terdapat beberapa variabel lain yang berpotensi meningkatkan akurasi model estimasi GTI apabila dimasukkan dalam penelitian selanjutnya. Salah satu variabel yang penting adalah cloud cover (tutupan awan), karena awan memiliki pengaruh signifikan terhadap distribusi radiasi matahari yang mencapai permukaan bumi. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa tingkat tutupan awan dapat memodifikasi proporsi radiasi langsung dan difus sehingga memengaruhi nilai radiasi total yang diterima panel surya.

Selain itu, variabel relative humidity (kelembaban udara) juga diketahui memiliki hubungan dengan proses hamburan dan penyerapan radiasi di atmosfer. Kelembaban yang tinggi dapat meningkatkan hamburan radiasi sehingga memengaruhi komponen difus yang diterima permukaan bumi. Penelitian oleh Jain et al. (2025b) menunjukkan bahwa variabel meteorologi tambahan seperti kelembaban udara dan kecepatan angin dapat meningkatkan akurasi model prediksi radiasi lingkungan ketika dikombinasikan dengan metode Principal Component Regression.

Variabel lain yang juga dapat dipertimbangkan adalah solar zenith angle atau sudut posisi matahari terhadap permukaan bumi. Parameter ini secara langsung memengaruhi sudut datang radiasi terhadap panel surya sehingga berperan penting dalam menentukan besarnya energi yang diterima permukaan miring. Penelitian oleh Pereira et al. (2024) menunjukkan bahwa parameter geometris matahari seperti sudut zenith dan sudut azimuth dapat meningkatkan akurasi model estimasi radiasi pada sistem fotovoltaik.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pendekatan Principal Component Regression merupakan metode yang efektif untuk mengatasi permasalahan multikolinearitas dalam

pemodelan radiasi surya. Transformasi variabel melalui PCA memungkinkan pengurangan dimensi data tanpa kehilangan informasi penting sehingga menghasilkan model regresi yang lebih stabil. Dengan tingkat koefisien determinasi yang tinggi, model PCR yang dihasilkan dapat digunakan sebagai pendekatan yang cukup andal dalam mengestimasi Global Tilted Irradiance di wilayah tropis seperti Sumatera.

Namun demikian, untuk meningkatkan akurasi model pada penelitian selanjutnya, disarankan untuk menambahkan beberapa variabel atmosfer dan geometris matahari seperti cloud cover, relative humidity, solar zenith angle, dan kecepatan angin. Penambahan variabel tersebut diharapkan dapat menangkap variasi radiasi matahari yang lebih kompleks sehingga menghasilkan model estimasi GTI yang lebih komprehensif dan akurat.

4. SIMPULAN

Penelitian ini bertujuan untuk mengestimasi Global Tilted Irradiance (GTI) menggunakan pendekatan statistik yang mampu mengatasi permasalahan multikolinearitas antar variabel independen. Hasil uji asumsi klasik menunjukkan bahwa regresi linear berganda konvensional tidak layak digunakan karena adanya multikolinearitas tinggi pada variabel DNI, GHI, DIF, temperatur, dan elevasi. Oleh karena itu, Principal Component Regression (PCR) diterapkan dengan mengombinasikan Principal Component Analysis (PCA) dan regresi linear.

Hasil PCA menunjukkan bahwa dua komponen utama pertama mampu menjelaskan sekitar 86,9% variasi data, sehingga cukup merepresentasikan informasi dari seluruh variabel independen. Model PCR yang dibangun menggunakan dua komponen utama tersebut terbukti signifikan secara simultan berdasarkan uji ANOVA. Selain itu, nilai koefisien determinasi menunjukkan bahwa model PCR mampu menjelaskan sebagian besar variasi GTI dengan tingkat kestabilan yang baik. Dengan demikian, PCR terbukti efektif dan layak digunakan sebagai metode estimasi GTI pada data dengan multikolinearitas tinggi.

DAFTAR PUSTAKA

Afif dan, F., & Martin, A. (2022). *Tinjauan Potensi dan Kebijakan Energi Surya di Indonesia*. *6*(1), 43–52.

Al-Dahidi, S., Rinchi, B., Dababseh, R., Ayadi, O., & Alrbai, M. (2024). A geographic multi-scale machine learning framework for predicting solar irradiation on tilted surfaces. *Energy*, *313*, 133767. https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.133767

Ayinde, K., Lukman, A. F., Alabi, O. O., & Bello, H. A. (2020). A new approach of principal component regression estimator with applications to collinear data. *International Journal of Engineering Research and Technology*, *13*(7), 1616–1622. https://doi.org/10.37624/ijert/13.7.2020.1616-1622

Dwi Cahyono, B., Teknik Elektro, J., Negeri Samarinda Jl Ciptomangunkusumo, P., & Gunung Panjang, K. (2023). Rancang bangun sistem pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) sebagai catu daya pompa air submersible. In *JTE UNIBA* (Vol. 7, Number 2).

Dwi Waluyo, B., Aulia Rahman, M. S., Sinaga, N., Akbar Lubis, A., & Verina Br Tarigan, S. (2024). *Sistem monitoring plts berbasis IoT sebagai media pembelajaran*. *11*(1).

Ebhota, W. S., & Tabakov, P. Y. (2024). Energy losses in crystalline silicon rooftop photovoltaic systems in selected site locations in Sub-Saharan Africa. *International Journal of Renewable Energy Development*, *13*(3), 508–520. https://doi.org/10.61435/ijred.2024.57529

Ergişi, S., Üniversitesi, A., Enstitüsü, S. B., Dalı, A., Öğrencisi, L., Sağlık, A. Ü., Enstitüsü, B., Doç, /, & Yavuz, Y. (2024). Performance comparison of least squares, ridge, lasso and principal component regression for addressing multicollinearity in regression analysis. *İstatistik Araştırma Dergisi Journal of Statistical Research*. https://dergipark.org.tr/tr/pub/jsstr

Ertekin, S. (2020). Solar power prediction with an hour-based ensemble machine learning method. *Hittle Journal of Science and Engineering*, 35–40.

Ferdyson, F., & Windarta, J. (2023). Overview pemanfaatan dan perkembangan sumber daya energi surya sebagai energi terbarukan di indonesia. *Jurnal Energi Baru Dan Terbarukan*, *4*(1), 1–6. https://doi.org/10.14710/jebt.2023.15714

Hasanah, S. N., Herdiyeni, Y., & Hardhienata, M. K. D. (2023). The impact of socioeconomic and demographic factors on COVID-19 forecasting model. *Journal of Information Systems Engineering and Business Intelligence*, *9*(1), 70–83. https://doi.org/10.20473/jisebi.9.1.70-83

Jain, D., Bhatnagar, S., Rathi, V., Sachdeva, K., Tewani, A., & Sharma, G. (2025a). Principal component regression approach for measuring the impact of built environment variables on multiple air pollutants in Delhi. *Discover Atmosphere*, *3*(1). https://doi.org/10.1007/s44292-025-00029-7

Jain, D., Bhatnagar, S., Rathi, V., Sachdeva, K., Tewani, A., & Sharma, G. (2025b). Principal component regression approach for measuring the impact of built environment variables on multiple air pollutants in Delhi. *Discover Atmosphere*, *3*(1). https://doi.org/10.1007/s44292-025-00029-7

Le Gal La Salle, J., & Le Gal La Salle Qualité, J. (2021). *Qualité et valeur des prévisions solaires probabilistes*. https://theses.hal.science/tel-03373288v1

Li, Q., Bessafi, M., & Li, P. (2023). Mapping prediction of surface solar radiation with linear regression models: case study over reunion island. *Atmosphere*, *14*(9). https://doi.org/10.3390/atmos14091331

Mariansyah, A., & Syarif, A. (2020). *Pengaruh kualitas produk, kualitas pelayanan, dan harga terhadap kepuasan konsumen Cafe Kabalu*. *3*(2). www.investor.iddi

Marion, B. (2015). A model for deriving the direct normal and diffuse horizontal irradiance from the global tilted irradiance. *Solar Energy*, *122*, 1037–1046. https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.10.024

Pasic, M., Hadziahmetovic, H., Ahmovic, I., & Pasic, M. (2023). Principal component regression modeling and analysis of pm10 and meteorological parameters in Sarajevo with and without temperature inversion. *Sustainability (Switzerland)*, *15*(14). https://doi.org/10.3390/su151411230

Pereira, S., Canhoto, P., & Salgado, R. (2024). Prediction of global solar irradiance on parallel rows of tilted surfaces including the effect of direct and anisotropic diffuse shading. *Energies*, *17*(14). https://doi.org/10.3390/en17143444

Prasetiyo, E. E., Marausna, G., & Nugroho, D. W. (2022). 200 WP solar panel power plant optimization using dual axis solar tracker system. In *Jurnal Nasional Teknik Elektro dan Teknologi Informasi* | (Vol. 11, Number 3).

Raheem, M. A., Udoh, N. S., & Gbolahan, A. T. (2019). Choosing appropriate regression model in the presence of multicolinearity. *Open Journal of Statistics*, *09*(02), 159–168. https://doi.org/10.4236/ojs.2019.92012

Raju Kalla, K., Rao, Bs., Sharmila, A., Venkatesh, S., Sai Bhavana, P., & Parameswari, M. (2025). Enhanced forecasting of solar global tilted irradiance using optimized LSTM and ARIMA models. In *Cuest.fisioter.2025* (Vol. 54, Number 4). https://www.irena.org/Publications/2024/Jul/Renewable-energy-statistics-2024

Rifky, Fikri, A., & Mujirudin, M. (2021). Roofs and walls of buildings as a media for converting solar thermal energy into electrical energy. In *Procedia of Engineering and Life Science* (Vol. 1, Number 1). www.uhamka.ac.id,

Sari, D. R. P. (2023). Metode principal component analysis (PCA) sebagai penanganan asumsi multikolinearitas. *Parameter: Jurnal Matematika, Statistika Dan Terapannya*, *2*(02), 115–124. https://doi.org/10.30598/parameterv2i02pp115-124

Shrestha, N. (2020). Detecting multicollinearity in regression analysis. *American Journal of Applied Mathematics and Statistics*, *8*(2), 39–42. https://doi.org/10.12691/ajams-8-2-1

Sianturi, Y. (2021). Pengukuran dan analisa data radiasi matahari di Stasiun Klimatologi Muaro Jambi. *Megasains*, *12*(1), 40–47. https://doi.org/10.46824/megasains.v12i1.45

Stasinopoulos, M. D., Rigby, R. A., Georgikopoulos, N., & De Bastiani, F. (2021). *Principal component regression in GAMLSS applied to Greek-German government bond yield spreads*.

Susilawati, S., & Didiharyono, D. (2023). Application of principal component regression in analyzing factors affecting human development index. *Jurnal Varian*, *6*(2), 199–208. https://doi.org/10.30812/varian.v6i2.2366

Upendra, S., Abbaiah, R., & Balasiddamuni, P. (n.d.). Multicollinearity in multiple linear regression: Detection, consequences, and remedies. In *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)* (Vol. 11). Retrieved www.ijraset.com

Utami, R. S., & Arifin, R. (2025). *Pemetaan potensi energi surya di pulau sumatera menggunakan algoritma K-Means Clustering*.

Valencia, O., Ortiz, M. C., Sarabia, L. A., Misael Bañuelos, P., & Spain, B. (. (2021). *Principal component regression that minimises the sum of the squares of the relative errors: Application in multivariate calibration models*.

Wibowo, A., & Ridha, M. R. (2020). Comparison of logistic regression model and MARS using multicollinearity data simulation. *JTAM | Jurnal Teori Dan Aplikasi Matematika*, *4*(1), 39. https://doi.org/10.31764/jtam.v4i1.1801