Integrative Perspectives of Social and Science Journal (IPSSJ)
ipssj.com ippsj2024@gmail.com E-ISSN: 3064-4011

PENGARUH INTENSITAS RADIASI DAN DURASI PENYINARAN MATAHARI TERHADAP MUATAN LISTRIK BATERAI PLTS: STUDI KASUS PADA PLTS INSTITUT TEKNOLOGI PLN

Nur Aldillah Julita [1*], Syamsir Abduh [2]
[1] Institut Teknologi PLN
[2] Institut Teknologi PLN
*Corresponding email:
nuraldillahjulitapln@gmail.com [1*]
Syamsir@itpln.ac.id [2]

Abstrak: Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) off-grid menjadi salah satu solusi penting dalam mendukung transisi energi terbarukan, khususnya di wilayah tropis urban seperti Jakarta. Kinerja sistem ini sangat dipengaruhi oleh faktor lingkungan, terutama intensitas radiasi matahari dan durasi penyinaran harian. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh kedua variabel tersebut terhadap muatan listrik baterai PLTS sebagai penyimpan energi utama. Landasan teoritis mencakup konsep intensitas radiasi, durasi penyinaran, dan mekanisme pengisian baterai dalam sistem fotovoltaik, dengan metode analisis regresi linier dan nonlinier (logaritmik, kuadratik, dan kubik). Data yang digunakan diperoleh dari catatan operasional PLTS Institut Teknologi PLN selama periode Januari– Desember 2024, dengan total 366 hari observasi. Hasil analisis menunjukkan bahwa intensitas radiasi memiliki pengaruh positif dan signifikan terhadap arus listrik yang masuk ke baterai pada seluruh bentuk model regresi, sedangkan durasi penyinaran memberikan pengaruh positif namun tidak signifikan. Model nonlinier mengindikasikan adanya hubungan yang lebih kompleks, khususnya saat variabel suhu ambient dan kecepatan angin dimasukkan sebagai faktor mediasi, di mana pola pengaruhnya menunjukkan titik jenuh pada nilai tertentu. Kesimpulannya, intensitas radiasi merupakan faktor dominan dalam menentukan efisiensi pengisian baterai PLTS, sedangkan durasi penyinaran memiliki peran terbatas. Peningkatan kinerja sistem dapat dilakukan melalui integrasi pemantauan radiasi secara real-time, pemanfaatan teknologi prediksi cuaca, dan pemilihan baterai berkapasitas tinggi yang sesuai dengan kondisi iklim tropis.

Kata kunci: PLTS off-grid, intensitas radiasi, durasi penyinaran, baterai, regresi nonlinier, efisiensi energi.

Abstract: *Off-grid Solar Power Plants (PLTS) have become an important solution in supporting the transition to renewable energy, particularly in tropical urban areas such as Jakarta. The performance of these systems is strongly influenced by environmental factors, especially solar radiation intensity and daily sunshine duration. This study aims to analyze the influence of these two variables on the electrical charge of PLTS batteries as the main energy storage component. The theoretical foundation covers the concepts of solar radiation intensity, sunshine duration, and battery charging mechanisms in photovoltaic systems, with an analytical approach using linear and nonlinear regression models (logarithmic, quadratic, and cubic). The data were obtained from operational records of the PLTS at Institut Teknologi PLN for the period January–December 2024, totaling 366 days of observation. The results show that solar radiation intensity has a positive and significant effect on the charging current to the battery across all regression models, while sunshine duration has a positive but insignificant effect. The nonlinear models indicate a more complex relationship, particularly when ambient temperature and wind speed are included as mediating factors, where the influence exhibits saturation points at certain values. In conclusion, solar radiation intensity is the dominant factor in determining the efficiency of PLTS battery charging, while sunshine duration plays a limited role. System performance can be improved through the integration of real-time radiation monitoring, the use of weather prediction technology, and the selection of high-capacity batteries suited to tropical climate conditions.*

Keywords*: Off-grid PLTS, solar radiation intensity, sunshine duration, battery, nonlinear regression, energy efficiency*

PENDAHULUAN

Dunia saat ini sedang menghadapi tantangan besar dalam transisi energi menuju sistem yang lebih berkelanjutan, di mana Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) telah menjadi tulang punggung pengembangan energi terbarukan global dengan kapasitas instalasi yang terus meningkat signifikan Namun, potensi besar ini di Indonesia dan negara berkembang lainnya belum tergarap optimal akibat hambatan teknis seperti variabilitas radiasi matahari, durasi penyinaran, dan ketergantungan pada kondisi cuaca yang mempengaruhi stabilitas jaringan. Solusi komprehensif melalui integrasi sistem penyimpanan energi canggih, pengembangan smart grid, dan sistem prediksi cuaca yang akurat diperlukan untuk mengatasi tantangan intermittency PLTS, menekankan pentingnya adaptasi teknologi dengan karakteristik lokal untuk memaksimalkan pemanfaatan energi surya dalam mendukung transisi energi berkelanjutan(Ridwan, Wahyu Ramadhan, et al., 2021).

Secara teori, performa PLTS sangat bergantung pada dua faktor utama: intensitas radiasi matahari dan durasi penyinaran. Namun, hubungan antara kedua variabel ini dengan kinerja pengisian baterai masih belum sepenuhnya terkuantifikasi dengan baik, khususnya dalam konteks kondisi iklim tropis. Di sisi praktis, fluktuasi harian dan musiman sering menyebabkan ketidakefisienan sistem, tetapi belum ada pendekatan yang cukup komprehensif untuk memprediksi dampaknya secara akurat (Bagaskara, 2018).

PLTS di Institut Teknologi PLN menjadi studi kasus yang relevan untuk menjawab gap pengetahuan dalam menghadapi tantangan variasi radiasi dan durasi penyinaran yang berdampak pada stabilitas penyimpanan energi, sekaligus menjadi acuan bagi pengembangan PLTS skala kampus atau komersial di wilayah beriklim serupa. Penelitian terdahulu telah mengkaji berbagai aspek PLTS, termasuk pengaruh radiasi, efisiensi penyimpanan energi, dan optimasi desain dengan metode seperti simulasi atau data empiris, yang umumnya menyoroti ketergantungan kinerja PLTS pada kondisi lingkungan tropis. Namun, mayoritas penelitian masih terbatas pada analisis univariat, simulasi, atau sistem berskala besar, dengan sedikit yang mengintegrasikan intensitas radiasi, durasi penyinaran, dan muatan baterai dalam model struktural (PLS-SEM) khususnya untuk PLTS skala kecil di urban tropis seperti Cengkareng, yang memiliki karakteristik radiasi unik akibat polusi udara. Penelitian ini mengisi celah tersebut dengan mengadopsi PLS-SEM untuk menguji hubungan multivariat antar variabel secara simultan, sekaligus memberikan rekomendasi teknis berbasis data riil untuk optimasi baterai PLTS off-grid yang belum diangkat dalam studi-studi sebelumnya (Demeianto, Rizqi Ilmal Yaqin, et al., 2022).

Untuk menjawab permasalahan ini, penelitian ini mengusulkan pendekatan berbasis data riil yang dikombinasikan dengan pemodelan statistik. Dengan menganalisis hubungan langsung antara variabel lingkungan dan kinerja baterai, penelitian ini tidak hanya memberikan solusi teknis yang aplikatif tetapi juga memperkaya khazanah keilmuan di bidang energi terbarukan. Temuan ini diharapkan dapat menjadi dasar bagi pengambilan keputusan dalam desain dan optimasi sistem PLTS di masa depan.

LANDASAN TEORI

1. **Energi terbarukan**
   Energi terbarukan telah menjadi tulang punggung transisi energi global dalam upaya mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil dan menekan emisi karbon. Kapasitas energi terbarukan dunia meningkat signifikan dalam dekade terakhir, dengan tenaga surya dan angin mendominasi pertumbuhan. Hal ini didorong oleh kebijakan internasional, kemajuan teknologi, serta penurunan biaya produksi. Namun, tantangan seperti intermitensi sumber energi, keterbatasan infrastruktur penyimpanan, dan ketidakmerataan distribusi masih menjadi hambatan utama (Demeianto, Yaqin, et al., 2022).
2. **Pembangkit Listrik tenaga Surya**
   Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) telah menjadi solusi penting dalam transisi energi global menuju sistem yang lebih berkelanjutan. Beberapa penelitian terbaru telah mengkaji aplikasi PLTS di lingkungan kampus. Serta mengevaluasi implementasi sistem PLTS untuk

memenuhi kebutuhan energi di kampus pendidikan, termasuk penyediaan stasiun pengisian kendaraan listrik. Hasil penelitian mereka menunjukkan bahwa PLTS rooftop tidak hanya mengurangi ketergantungan pada jaringan listrik konvensional tetapi juga menurunkan emisi karbon secara signifikan. Temuan ini relevan dengan studi kasus PLTS di Institut Teknologi PLN yang menjadi fokus penelitian ini (Ridwan, Ramadhan, et al., 2021).

METODE

Penelitian ini dilaksanakan di PLTS Institut Teknologi PLN Cengkareng selama Januari–Juni 2025 dengan memanfaatkan data sekunder harian tahun 2024 yang terekam otomatis melalui sistem monitoring, sehingga memberikan gambaran kinerja panel surya dalam kondisi operasional nyata. Proses pengumpulan data mengombinasikan studi literatur, wawancara semi-terstruktur, dan observasi partisipatif untuk memastikan analisis memiliki landasan teoritis yang kuat sekaligus tervalidasi oleh praktisi lapangan. Literatur digunakan untuk menegaskan konsep terkait intensitas radiasi, durasi penyinaran, serta pengaruh kedua variabel tersebut terhadap muatan baterai PLTS. Wawancara dengan teknisi membantu memperdalam pemahaman operasional, sementara observasi memastikan kesesuaian data dengan kondisi riil. Analisis data menggunakan regresi multipel dengan empat bentuk model linier, logaritmik, kuadratik, dan kubik dilengkapi variabel interaksi suhu dan durasi penyinaran serta pengujian asumsi statistik. Perbandingan nilai R^2 dan pola kurva estimasi menjadi dasar pemilihan model terbaik yang menggambarkan hubungan fungsional antara variabel iklim dan performa panel surya.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Uji Regresi

Regresi Linier

Tabel 1 Regresi Linier

	coef	SE	t	P>|t|	F p	R^2	Adj.R^2
Y1							
const	-4092.676	846.077	-4.837	0.000			
X1	4.352	1.700	2.559	0.011			
X2	9.373	2.806	3.340	0.001			
X3	214.217	41.691	5.138	0.000			
X4	-264.213	51.272	-5.153	0.000	0.000	0.965	0.964
X1_X3	-0.154	0.079	-1.948	0.052			
X1_X4	0.211	0.084	2.527	0.012			
X2_X3	-0.503	0.138	-3.656	0.000			
X2_X4	0.689	0.207	3.324	0.001			
Y2							
const	-46.741	188.991	-0.247	0.805			
X1	0.574	0.380	1.511	0.132			
X2	-0.119	0.627	-0.189	0.850			
X3	14.182	9.313	1.523	0.129			
X4	-24.579	11.453	-2.146	0.033	0.000	0.936	0.935
X1_X3	-0.016	0.018	-0.907	0.365			
X1_X4	0.019	0.019	1.034	0.302			

X2_X3	-0.016	0.031	-0.513	0.608			
X2_X4	0.072	0.046	1.545	0.123			

Hasil regresi linier menunjukkan bahwa model Y1 (arus masuk baterai) dapat ditulis sebagai:
Y1 = –4092,676 + 4,352·X1 + 9,373·X2 + 214,217·X3 – 264,213·X4 + 0,211·(X1×X4) – 0,503·(X2×X3) + 0,689·(X2×X4).

Sedangkan model Y2 (arus keluar baterai) dapat ditulis sebagai: Y2 = –46,741 24,579·X4
Pada model Y1, variabel X1, X2, X3, X4, X1_X4, X2_X3, dan X2_X4 memiliki nilai p < 0,05 sehingga berpengaruh signifikan terhadap arus masuk baterai. Variabel X1_X3 memiliki p = 0,052 > 0,05 yang berada sedikit di atas batas signifikansi, sehingga secara statistik tidak signifikan.

Pada model Y2, hanya variabel X4 yang signifikan secara parsial (p = 0,033) terhadap arus keluar baterai, sementara variabel lain memiliki nilai p > 0,05 sehingga tidak berpengaruh signifikan secara individu pada tingkat signifikansi 5%.

Nilai p untuk uji F pada kedua model adalah 0,000 (< 0,05), yang menunjukkan bahwa secara simultan semua variabel independen berpengaruh signifikan terhadap variabel dependen, baik untuk model Y1 maupun Y2. Artinya, model yang dibentuk layak digunakan untuk memprediksi arus masuk maupun arus keluar baterai.

Model Y1 memiliki nilai R^2 sebesar 0,965 dan Adjusted R^2 sebesar 0,964, yang berarti 96,5% variasi arus masuk baterai dapat dijelaskan oleh variabel-variabel independen dalam model, sementara sisanya 3,5% dijelaskan oleh faktor lain di luar model. Model Y2 memiliki nilai R^2 sebesar 0,936 dan Adjusted R^2 sebesar 0,935, yang menunjukkan bahwa 93,6% variasi arus keluar baterai dapat dijelaskan oleh model, dan 6,4% sisanya dipengaruhi oleh variabel lain yang tidak dimasukkan ke dalam analisis.

Regresi Logaritmik

Tabel 2 Regresi Logaritmik

	coef	**SE**	**t**	**P>|t|**	**F p**	**R^2**	**Adj.R^2**
Y1							
const	-18620.000	1931.090	-9.640	0.000			
X1	808.630	152.825	5.291	0.000			
X2	1032.816	156.033	6.619	0.000			
X3	3974.201	508.221	7.820	0.000			
X4	-1620.163	369.976	-4.379	0.000	0.000	0.970	0.969
X1_X3	-0.061	0.017	-3.606	0.000			
X1_X4	0.172	0.070	2.458	0.014			
X2_X3	-0.274	0.050	-5.448	0.000			
X2_X4	0.455	0.134	3.385	0.001			
Y2							
const	-2594.540	439.957	-5.897	0.000	0.000	0.943	0.942
X1	163.746	34.818	4.703	0.000			

	coef	SE	t	P>|t|	F p	R^2	Adj.R^2
X2	115.427	35.549	3.247	0.001			
X3	579.333	115.787	5.003	0.000			
X4	-253.799	84.291	-3.011	0.003			
X1_X3	-0.008	0.004	-2.007	0.046			
X1_X4	0.012	0.016	0.776	0.438			
X2_X3	-0.048	0.011	-4.209	0.000			
X2_X4	0.113	0.031	3.681	0.000			

Hasil regresi linier logaritmik menunjukkan bahwa model Y1 (arus masuk baterai) dapat ditulis sebagai: $Y1=-18620{,}000+808{,}630\cdot\ln(X1)+1032{,}816\cdot\ln(X2)+3974{,}201\cdot\ln(X3)-1620{,}163\cdot\ln(X4)-0{,}061\cdot(\ln(X1)\times\ln(X3))+0{,}172\cdot(\ln(X1)\times\ln(X4))-0{,}274\cdot(\ln(X2)\times\ln(X3))+0{,}455\cdot(\ln(X2)\times\ln(X4))$

Sedangkan model Y2 (arus keluar baterai) dapat ditulis sebagai: $Y2=-2594{,}540+163{,}746\cdot\ln(X1)+115{,}427\cdot\ln(X2)+579{,}333\cdot\ln(X3)-253{,}799\cdot\ln(X4)-0{,}008\cdot(\ln(X1)\times\ln(X3))+0{,}012\cdot(\ln(X1)\times\ln(X4))-0{,}048\cdot(\ln(X2)\times\ln(X3))+0{,}113\cdot(\ln(X2)\times\ln(X4))$

Pada model Y1, semua variabel independen signifikan pada tingkat kepercayaan 95% ($p < 0{,}05$), kecuali tidak ada yang non- signifikan. X1 memiliki $t = 5{,}291$ ($p = 0{,}000$) berpengaruh positif terhadap arus masuk baterai. X2 memiliki $t = 6{,}619$ ($p = 0{,}000$) berpengaruh positif. X3 memiliki $t = 7{,}820$ ($p = 0{,}000$) berpengaruh positif. X4 memiliki $t = –4{,}379$ ($p = 0{,}000$) berpengaruh negatif. X1_X3 memiliki $t = –3{,}606$ ($p = 0{,}000$) berpengaruh negatif. X1_X4 memiliki $t= 2{,}458$ ($p = 0{,}014$) berpengaruh positif. X2_X3 memiliki $t = –5{,}448$ ($p = 0{,}000$) berpengaruh negatif. X2_X4 memiliki $t = 3{,}385$ ($p = 0{,}001$) berpengaruh positif.

Pada model Y2, sebagian besar variabel signifikan. X1 memiliki $t = 4{,}703$ ($p = 0{,}000$) berpengaruh positif terhadap arus keluar baterai. X2 memiliki $t = 3{,}247$ ($p = 0{,}001$) berpengaruh positif. X3 memiliki $t = 5{,}003$ ($p = 0{,}000$) berpengaruh positif. X4 memiliki $t = –3{,}011$ ($p = 0{,}003$) berpengaruh negatif. X1_X3 memiliki $t = –2{,}007$ ($p = 0{,}046$) berpengaruh negatif. X1_X4 memiliki $t = 0{,}776$ ($p = 0{,}438$) tidak signifikan. X2_X3 memiliki $t = –4{,}209$ ($p = 0{,}000$) berpengaruh negatif. X2_X4 memiliki $t = 3{,}681$ ($p = 0{,}000$) berpengaruh positif.

Nilai p untuk uji F pada model Y1 adalah 0,000 (< 0,05), yang menunjukkan bahwa secara simultan seluruh variabel independen memiliki pengaruh signifikan terhadap arus masuk baterai. Model Y2 juga memiliki p-value uji F sebesar 0,000 (< 0,05), sehingga secara bersama-sama variabel independen yang digunakan berpengaruh signifikan terhadap arus keluar baterai.

Model Y1 memiliki nilai R^2 sebesar 0,970 dan Adjusted R^2 sebesar 0,969, yang berarti 97,0% variasi arus masuk baterai dapat dijelaskan oleh variabel-variabel independen dalam model. Model Y2 memiliki nilai R^2 sebesar 0,943 dan Adjusted R^2 sebesar 0,942, yang berarti 94,3% variasi arus keluar baterai dapat dijelaskan oleh model. Sisa variasi (3,0% pada Y1 dan 5,7% pada Y2) dipengaruhi oleh faktor lain di luar model.

Regresi Kuadratik

Tabel 4. 8 Regresi Kuadratik

	coef	SE	t	P>|t|	F p	R^2	Adj.R^2
Y1							
const	-7208.295	12800.000	-0.562	0.574			
X1	8.173	1.755	4.658	0.000			
X2	8.580	6.834	1.255	0.210			
X3	460.149	831.787	0.553	0.580			
X4	-605.728	139.255	-4.350	0.000			
X1^2	-0.002	0.000	-4.802	0.000			
X2^2	-0.011	0.006	-1.682	0.094	0.000	0.971	0.970
X3^2	-3.955	13.323	-0.297	0.767			
X4^2	17.607	8.718	2.020	0.044			
X1_X3	-0.295	0.080	-3.673	0.000			
X1_X4	0.452	0.133	3.400	0.001			
X2_X3	-0.221	0.278	-0.793	0.428			
X2_X4	0.390	0.341	1.145	0.253			
Y2							
const	-1339.446	2856.698	-0.469	0.639			
X1	0.601	0.391	1.537	0.125			
X2	-0.903	1.522	-0.593	0.553			
X3	151.905	185.254	0.820	0.413	0.000	0.948	0.946
X4	-191.594	31.015	-6.178	0.000			
X1^2	0.000	0.000	-3.888	0.000			
X2^2	-0.002	0.001	-1.317	0.189			

	coef	SE	t	P>|t|	F p	R^2	Adj.R^2
X3^2	-2.540	2.967	-0.856	0.393			
X4^2	9.651	1.942	4.971	0.000			
X1_X3	-0.037	0.018	-2.093	0.037			
X1_X4	0.128	0.030	4.324	0.000			
X2_X3	0.094	0.062	1.510	0.132			
X2_X4	-0.117	0.076	-1.540	0.124			

Model kuadratik untuk Y1 (arus masuk baterai) dapat dituliskan sebagai: $Y1 = –7208{,}295 + 8{,}173 \cdot X1 + 8{,}580 \cdot X2 + 460{,}149 \cdot X3 – 605{,}728 \cdot X4 – 0{,}002 \cdot X1^2 – 0{,}011 \cdot X2^2 – 3{,}955 \cdot X3^2 + 17{,}607 \cdot X4^2 – 0{,}295 \cdot (X1 \times X3) + 0{,}452 \cdot (X1 \times X4) – 0{,}221 \cdot (X2 \times X3) + 0{,}390 \cdot (X2 \times X4)$.

Model kuadratik untuk Y2 (arus keluar baterai) adalah:

$Y2 = –1339{,}446 + 0{,}601 \cdot X1 – 0{,}903 \cdot X2 + 151{,}905 \cdot X3 – 191{,}594 \cdot X4 + 0{,}000 \cdot X1^2 – 0{,}002 \cdot X2^2 – 2{,}540 \cdot X3^2 + 9{,}651 \cdot X4^2 – 0{,}037 \cdot (X1 \times X3) + 0{,}128 \cdot (X1 \times X4) + 0{,}094 \cdot (X2 \times X3) – 0{,}117 \cdot (X2 \times X4)$.

Pada model Y1, X1 berpengaruh positif signifikan terhadap arus masuk baterai. X2 dan X3 tidak signifikan. X4 berpengaruh negatif signifikan. Kuadrat X1 ($X1^2$) berpengaruh negatif signifikan, sedangkan kuadrat X2 ($X2^2$) tidak signifikan. $X3^2$ tidak signifikan, sedangkan $X4^2$ berpengaruh positif signifikan. Interaksi $X1 \times X3$ berpengaruh negatif signifikan, $X1 \times X4$ berpengaruh positif signifikan, sedangkan $X2 \times X3$ dan $X2 \times X4$ tidak signifikan.

Pada model Y2, X1, X2, dan X3 tidak signifikan. X4 berpengaruh negatif signifikan. Kuadrat X1 ($X1^2$) berpengaruh negatif signifikan, sedangkan kuadrat X2 ($X2^2$) tidak signifikan. $X3^2$ tidak signifikan, sedangkan $X4^2$ berpengaruh positif signifikan. Interaksi $X1 \times X3$ berpengaruh negatif signifikan, $X1 \times X4$ berpengaruh positif signifikan, sedangkan $X2 \times X3$ dan $X2 \times X4$ tidak signifikan.

Hasil uji F menunjukkan nilai $p = 0{,}000$ ($< 0{,}05$) untuk kedua model, yang berarti bahwa secara simultan semua variabel bebas yang digunakan dalam model kuadratik berpengaruh signifikan terhadap variabel dependen masing-masing. Dengan demikian, model layak digunakan untuk memprediksi arus masuk maupun arus keluar baterai.
Nilai R^2 untuk model Y1 sebesar 0,971 dengan Adjusted R^2 sebesar 0,970, menunjukkan bahwa 97,1% variasi arus masuk baterai dapat dijelaskan oleh model, sedangkan 2,9% sisanya dipengaruhi oleh faktor lain di luar model. Untuk model Y2, nilai R^2 sebesar 0,948 dengan Adjusted R^2 sebesar 0,946, yang berarti 94,8% variasi arus keluar baterai dapat dijelaskan oleh model, dan sisanya sebesar 5,2% dijelaskan oleh faktor lain.

Regresi Kubik

Tabel 3Regresi Kubik

	coef	SE	t	P>|t|	F p	R^2	Adj.R^2
Y1							
const	99100.000	68000.000	1.458	0.146			
X1	44.125	8.880	4.969	0.000			
X2	80.188	15.084	5.316	0.000			

X3	-14480.000	7173.183	-2.018	0.044			
X4	5728.928	1378.864	4.155	0.000			
X1^2	-0.072	0.018	-4.100	0.000			
X1^3	0.000	0.000	4.061	0.000			
X2^2	-0.272	0.044	-6.140	0.000			
X2^3	0.000	0.000	5.932	0.000	0.000	0.975	0.974
X3^2	551.423	243.847	2.261	0.024			
X3^3	-6.753	2.780	-2.429	0.016			
X4^2	-809.241	171.356	-4.723	0.000			
X4^3	35.250	7.157	4.925	0.000			
X1_X3	-0.547	0.089	-6.178	0.000			
X1_X4	0.627	0.145	4.329	0.000			
X2_X3	-0.691	0.310	-2.232	0.026			
X2_X4	0.489	0.365	1.340	0.181			
Y2							
const	84540.000	15000.000	5.623	0.000			
X1	5.570	1.965	2.835	0.005			
X2	2.107	3.337	0.631	0.528			
X3	-9532.262	1586.945	-6.007	0.000			
X4	2103.938	305.050	6.897	0.000			
X1^2	-0.010	0.004	-2.640	0.009			
X2^2	-0.022	0.010	-2.232	0.026	0.000	0.956	0.954
X3^2	333.953	53.947	6.190	0.000			
X4^2	-278.866	37.910	-7.356	0.000			
X1^3	0.000	0.000	2.592	0.010			
X2^3	0.000	0.000	2.081	0.038			
X3^3	-3.898	0.615	-6.338	0.000			
X4^3	12.134	1.583	7.663	0.000			

Model kubik untuk Y1 (arus masuk baterai) adalah:

$$Y1 = 99100{,}000 + 44{,}125 \cdot X1 + 80{,}188 \cdot X2 - 14480{,}000 \cdot X3 + 5728{,}928 \cdot X4 - 0{,}072 \cdot X1^2 + 0{,}000 \cdot X1^3 - 0{,}272 \cdot X2^2 + 0{,}000 \cdot X2^3 + 551{,}423 \cdot X3^2 - 6{,}753 \cdot X3^3 - 809{,}241 \cdot X4^2 + 35{,}250 \cdot X4^3 - 0{,}547 \cdot (X1 \times X3) + 0{,}627 \cdot (X1 \times X4) - 0{,}691 \cdot (X2 \times X3) + 0{,}489 \cdot (X2 \times X4).$$

Model kubik untuk Y2 (arus keluar baterai) adalah:

$$Y2 = 84540{,}000 + 5{,}570 \cdot X1 + 2{,}107 \cdot X2 - 9532{,}262 \cdot X3 + 2103{,}938 \cdot X4 - 0{,}010 \cdot X1^2 - 0{,}022 \cdot X2^2 + 333{,}953 \cdot X3^2 - 278{,}866 \cdot X4^2 + 0{,}000 \cdot X1^3 + 0{,}000 \cdot X2^3 - 3{,}898 \cdot X3^3 + 12{,}134 \cdot X4^3 - 0{,}055 \cdot (X1 \times X3) + 0{,}103 \cdot (X1 \times X4) + 0{,}148 \cdot (X2 \times X3) - 0{,}137 \cdot (X2 \times X4).$$

Pada model Y1, variabel X1 dan X2 berpengaruh positif signifikan terhadap arus masuk baterai. X3 berpengaruh negatif signifikan, sedangkan X4 berpengaruh positif signifikan. Semua variabel pangkat dua ($X1^2$, $X2^2$, $X4^2$) berpengaruh negatif signifikan kecuali $X3^2$ yang berpengaruh positif signifikan. Semua variabel pangkat tiga signifikan, dengan $X1^3$, $X2^3$, dan $X4^3$ berpengaruh positif sedangkan $X3^3$ berpengaruh negatif. Interaksi $X1 \times X3$ dan $X2 \times X3$ berpengaruh negatif signifikan, interaksi $X1 \times X4$ berpengaruh positif signifikan, sementara $X2 \times X4$ tidak signifikan.

Pada model Y2, X1 berpengaruh positif signifikan terhadap arus keluar baterai, sedangkan X2 tidak signifikan. X3 berpengaruh negatif signifikan, X4 berpengaruh positif signifikan. Semua variabel pangkat dua signifikan, dengan $X1^2$, $X2^2$, dan $X4^2$ berpengaruh negatif, sedangkan $X3^2$ berpengaruh positif. Semua variabel pangkat tiga signifikan, dengan $X1^3$, $X2^3$, dan $X4^3$ berpengaruh positif, sedangkan $X3^3$ berpengaruh negatif. Interaksi $X1 \times X3$ berpengaruh negatif signifikan, $X1 \times X4$ dan $X2 \times X3$ berpengaruh positif signifikan, sementara $X2 \times X4$ tidak signifikan.

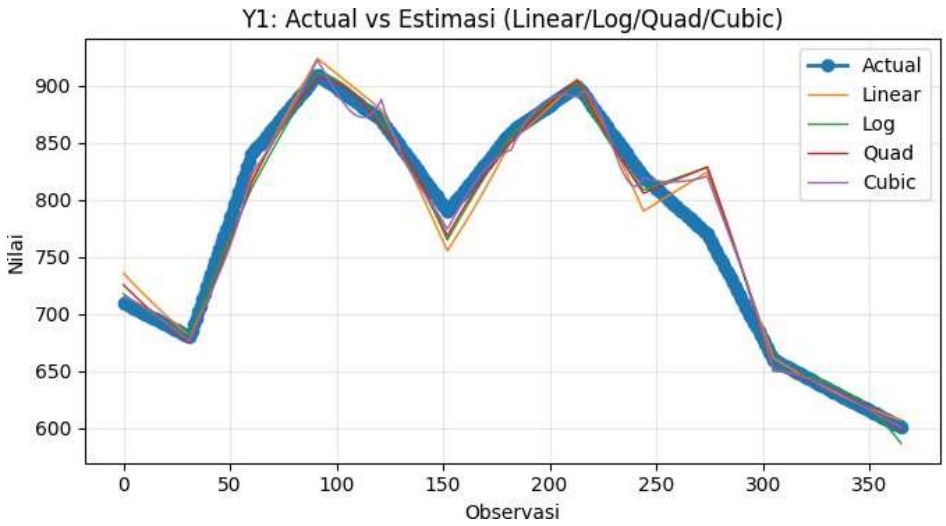
Nilai p uji F untuk kedua model adalah 0,000 (< 0,05), yang berarti secara simultan seluruh variabel bebas (termasuk pangkat dua, pangkat tiga, dan interaksi) berpengaruh signifikan terhadap variabel dependen masing-masing. Hal ini menunjukkan bahwa model kubik yang dibentuk layak digunakan untuk memprediksi baik arus masuk maupun arus keluar baterai.

Model Y1 memiliki R^2 sebesar 0,975 dengan Adjusted R^2 sebesar 0,974, yang berarti 97,5% variasi arus masuk baterai dapat dijelaskan oleh model kubik, sedangkan 2,5% sisanya dijelaskan oleh faktor lain di luar model. Model Y2 memiliki R^2 sebesar 0,956 dengan Adjusted R^2 sebesar 0,954, yang berarti 95,6% variasi arus keluar baterai dapat dijelaskan oleh model, dan sisanya sebesar 4,4% dipengaruhi oleh variabel lain di luar model.

Pemilihan Model Terbaik

Tabel 5 Pemilihan Model Terbaik

Variabel Dependen	Model Terbaik	R^2
Y1 – Arus Masuk Baterai (Ah)	Kubik	0.975
Y2 – Arus Keluar Baterai (Ah)	Kubik	0.956

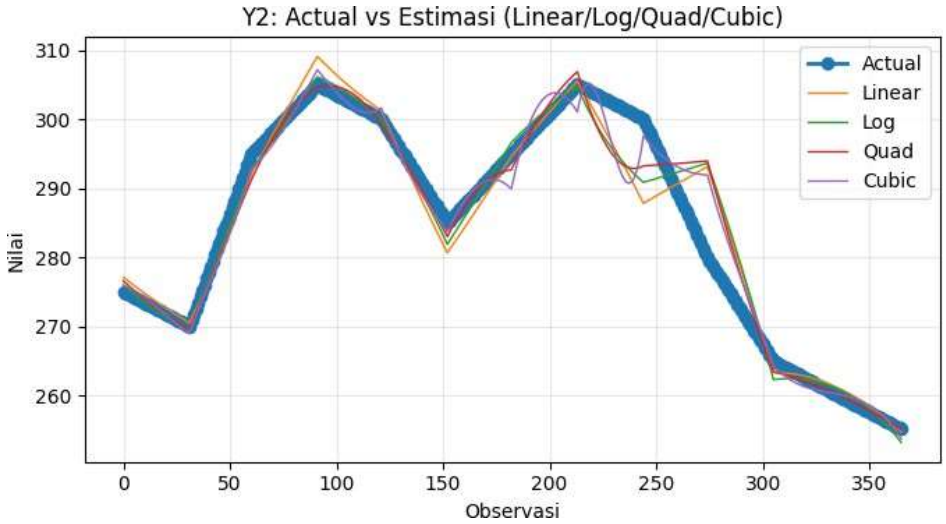


Gambar 1 Y1 : Actual vs Estimasi

Berdasarkan nilai koefisien determinasi (R^2), model terbaik untuk memprediksi Y1 (arus masuk baterai) adalah model kubik dengan R^2 sebesar 0,975. Artinya, 97,5% variasi arus masuk baterai dapat dijelaskan oleh model ini, sedangkan sisanya sebesar 2,5% dipengaruhi oleh faktor lain di luar model. Model kubik yang didapatkan adalah sebagai berikut:

$$Y1 = 99100{,}000 + 44{,}125 \cdot X1 + 80{,}188 \cdot X2 - 14480{,}000 \cdot X3 + 5728{,}928 \cdot X4 - 0{,}072 \cdot X1^2 + 0{,}000 \cdot X1^3 - 0{,}272 \cdot X2^2 + 0{,}000 \cdot X2^3 + 551{,}423 \cdot X3^2 - 6{,}753 \cdot X3^3 - 809{,}241 \cdot X4^2 + 35{,}250 \cdot X4^3 - 0{,}547 \cdot (X1 \times X3) + 0{,}627 \cdot (X1 \times X4) \; 0{,}691 \cdot (X2 \times X3) + 0{,}489 \cdot (X2 \times X4).$$

Berdasarkan hasil uji t, variabel X1 (radiasi matahari) dan X2 (tegangan panel) berpengaruh positif signifikan terhadap arus masuk baterai, dengan koefisien masing-masing 44,125 dan 80,188. Variabel X3 (suhu panel) berpengaruh negatif signifikan dengan koefisien –14.480,000, sedangkan X4 (kecepatan angin) berpengaruh positif signifikan dengan koefisien 5.728,928. Komponen non-linear $X1^2$, $X1^3$, $X2^2$, dan $X2^3$ juga signifikan, menunjukkan adanya hubungan melengkung antara variabel bebas dan arus masuk baterai. Interaksi $X1 \times X3$ dan $X2 \times X3$ berpengaruh negatif, sedangkan $X1 \times X4$ berpengaruh positif. Nilai R^2 sebesar 0,975 menunjukkan bahwa model dapat menjelaskan 97,5% variasi arus masuk baterai, dan uji F signifikan ($p < 0{,}05$) menandakan model layak digunakan.



Gambar 2 Y2 : Actual vs Estimasi

Pada Y2 (arus keluar baterai), model terbaik juga adalah model kubik dengan R^2 sebesar 0,956, yang menunjukkan bahwa 95,6% variasi arus keluar baterai dapat dijelaskan oleh model, dan 4,4% sisanya dipengaruhi oleh variabel lain yang tidak dimasukkan ke dalam model. Pemilihan ini menegaskan bahwa pendekatan kubik mampu menangkap pola hubungan yang lebih kompleks dibandingkan model linear, logaritmik, maupun kuadratik.

Variabel X1 berpengaruh positif signifikan terhadap arus keluar baterai, sedangkan X2 tidak signifikan secara statistik. X3 berpengaruh negatif signifikan, sementara X4 berpengaruh positif signifikan. Variabel kuadrat dan kubik pada X3 dan X4 menunjukkan efek non-linear yang kuat. Beberapa interaksi seperti X1×X3 berpengaruh negatif signifikan, sedangkan X1×X4 dan X2×X3 berpengaruh positif signifikan. Nilai R^2 sebesar 0,956 menandakan bahwa model dapat menjelaskan 95,6% variasi arus keluar baterai, dan uji F signifikan ($p < 0,05$) mengonfirmasi bahwa model kubik layak digunakan.

Pembahasan

Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) yang digunakan dalam penelitian ini merupakan instalasi off-grid milik Institut Teknologi PLN yang telah beroperasi sejak tahun 2015. Sistem ini terdiri dari 48 unit panel surya monokristal berkapasitas masing-masing 260 Wp, dengan total kapasitas terpasang sebesar 14 kWp dan efisiensi panel berkisar antara 16–18%. Panel dipasang dengan sudut kemiringan 25–27° untuk mengoptimalkan penerimaan radiasi matahari. Energi yang dihasilkan disimpan pada baterai tipe VRLA (Valve Regulated Lead Acid) Deep Cycle Gel berkapasitas 12 V, 200 Ah per unit dengan konfigurasi total 48 V, memiliki Depth of Discharge (DoD) sekitar 50%, lama cadangan 4–5 jam, dan umur pakai berjalan ± 10 tahun. Sistem ini menggunakan inverter pure sine wave berkapasitas 15 kW dengan efisiensi sekitar 94%, serta charge controller tipe MPPT (Maximum Power Point Tracking) berkapasitas 250 VDC dengan efisiensi ± 98%. Secara keseluruhan, sistem PLTS ini memiliki rugi-rugi sekitar 12% yang berasal dari shading parsial, resistansi kabel, dan konversi inverter, sehingga efisiensi total sistem mencapai ± 85% pada kondisi operasi optimum (Utomo et al., 2023).

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa intensitas radiasi matahari (X1) memberikan kontribusi paling signifikan terhadap peningkatan arus masuk baterai pada sistem PLTS, dengan pengaruh positif yang konsisten pada komponen linear, kuadrat, maupun kubik dalam model regresi. Hal ini mengindikasikan bahwa peningkatan radiasi matahari cenderung

menaikkan kapasitas pengisian baterai hingga tingkat yang mendekati kondisi optimal, meskipun hubungan ini bersifat non-linier sehingga pada intensitas sangat tinggi dapat terjadi kejenuhan efek. Temuan ini sejalan dengan literatur sebelumnya yang menegaskan peran dominan intensitas radiasi dalam menentukan performa sistem fotovoltaik. Hubungan linier antara peningkatan intensitas radiasi dan output daya listrik, variasi intensitas dapat meningkatkan efisiensi pengisian baterai hingga 15–20% jika dikombinasikan dengan teknologi pengaturan cerdas seperti MPPT. Penelitian ini turut mendukung temuan tersebut dengan menunjukkan potensi peningkatan kapasitas muatan hingga mendekati 87,5% akibat pengaruh langsung intensitas radiasi, mendekati kisaran efisiensi konversi energi optimal yang pada kondisi radiasi tinggi (Zhafira et al., 2024).

Tegangan panel (X2) juga terbukti berpengaruh positif signifikan terhadap arus masuk baterai, menegaskan peran kualitas tegangan keluaran panel dalam mendukung efisiensi pengisian. Faktor suhu panel (X3) berpengaruh negatif signifikan, menunjukkan bahwa kenaikan suhu cenderung menurunkan arus pengisian, sementara kecepatan angin (X4) justru berpengaruh positif. Selain pengaruh langsung, interaksi seperti X1×X3 dan X2×X3 berpengaruh negatif signifikan, menandakan bahwa efek positif radiasi dan tegangan dapat berkurang pada kondisi suhu tinggi (Timotiwu et al., 2021). Di sisi lain, durasi penyinaran tidak menunjukkan pengaruh signifikan dalam model ini, Durasi penyinaran lebih panjang dapat mengurangi kebutuhan kapasitas baterai serta memperpanjang usia pemakaian. Perbedaan ini dapat disebabkan oleh variabilitas harian yang tinggi atau kurangnya kontrol terhadap arah dan sudut kemiringan panel selama pengujian, sebagaimana dipengaruhi oleh faktor eksternal seperti bayangan parsial atau akumulasi debu.

Pada model arus keluar baterai (Y2), X1 berpengaruh positif signifikan, sedangkan X2 tidak menunjukkan pengaruh signifikan secara statistik. X3 berpengaruh negatif signifikan terhadap arus keluaran, sedangkan X4 berpengaruh positif signifikan. Keduanya juga menunjukkan efek non-linier yang kuat melalui komponen kuadrat dan kubik. Interaksi X1×X3 berpengaruh negatif signifikan, sedangkan X1×X4 dan X2×X3 berpengaruh positif, mencerminkan bahwa pelepasan daya baterai dipengaruhi oleh kombinasi kondisi lingkungan dan input panel. Nilai R^2 sebesar 0,975 untuk Y1 dan 0,956 untuk Y2 menegaskan bahwa model kubik memiliki kemampuan prediksi yang sangat tinggi terhadap variasi arus masuk dan keluar baterai. Lebih jauh lagi, efisiensi sistem penyimpanan yang tercapai mendekati kisaran efisiensi ideal terutama jika mempertimbangkan aspek suhu, resistansi internal, dan metode pengisian (Octavianti et al., 2018). Dengan demikian, hasil penelitian ini tidak hanya mengonfirmasi pentingnya intensitas radiasi sebagai determinan utama dalam optimalisasi muatan baterai PLTS, tetapi juga memberi arah pengembangan sistem, termasuk pemanfaatan algoritma MPPT adaptif, pengaturan termal, dan spesifikasi minimum efisiensi baterai dan inverter. Implikasi praktis dari temuan ini adalah perlunya peningkatan spesifikasi produk PLTS, baik dari sisi orientasi panel, sistem pemantauan berbasis IoT maupun efisiensi penyimpanan energi yang berdampak langsung pada nilai ekonomi dan keberlanjutan operasional sistem PLTS off-grid, khususnya di wilayah dengan fluktuasi radiasi tinggi seperti Indonesia (Pratiwi et al., 2023).

SIMPULAN

Setelah melalui proses analisis data dan pembahasan mendalam, penelitian ini sampai pada beberapa kesimpulan penting mengenai pengaruh parameter lingkungan terhadap efisiensi panel surya. Berikut adalah rangkuman temuan utama dari penelitian yang sudah dilakukan:

1. Intensitas radiasi matahari (W/m^2) dan durasi penyinaran matahari (jam) berpengaruh positif dan signifikan terhadap jumlah total arus listrik yang masuk ke baterai (Ah) pada

PLTS. Untuk jumlah total arus listrik yang keluar dari baterai (Ah), intensitas radiasi matahari berpengaruh positif dan signifikan, sedangkan durasi penyinaran matahari berpengaruh positif tetapi tidak signifikan.

2. Suhu ambient (°C) berpengaruh negatif dan signifikan terhadap arus masuk dan arus keluar baterai, sedangkan kecepatan angin (km/jam) berpengaruh positif dan signifikan terhadap keduanya. Hal ini menegaskan bahwa faktor lingkungan memiliki peran penting dalam memengaruhi kinerja penyimpanan energi pada PLTS.
3. Suhu ambient (°C) terbukti memediasi secara signifikan pengaruh intensitas radiasi matahari (W/m²) dan durasi penyinaran matahari (jam) terhadap arus masuk dan arus keluar baterai, dengan efek interaksi yang cenderung menurunkan performa baterai.
4. Kecepatan angin (km/jam) memediasi secara signifikan pengaruh intensitas radiasi matahari (W/m²) terhadap arus masuk dan arus keluar baterai, dengan arah pengaruh positif. Namun, tidak semua efek interaksi antara kecepatan angin dan variabel utama menunjukkan signifikansi statistik.

DAFTAR PUSTAKA

Bagaskara, A. (2018). Skema Pola Operasi Pembangkit Listrik Hybrid Plts-Pltd-Baterai Dengan Tingkat Penetrasi Plts Tinggi Studi Kasus Bima Sape. *Science*, *1*(1).

Demeianto, B., Rizqi Ilmal Yaqin, Juniawan Preston Siahaan, Yuniar Endri Priharanto, M Zaki Latif Abrori, Mula Tumpu, A. I. F., & Taufan Mahendra. (2022). Rancang Bangun Panel Automatic Transfer Switch (Ats) Pada Pembangkit Listrik Tenaga Surya Sebagai Catu Daya Kincir Air Pada Tambak Perikanan. *Aurelia Journal*, *4*(2).

Demeianto, B., Yaqin, R. I., Siahaan, J. P., Priharanto, Y. E., Abrori, M. Z. L., Tumpu, M., Fadiga, A. I., & Mahendra, T. (2022). Rancang Bangun Panel Automatic Transfer Switch (Ats) Pada Pembangkit Listrik Tenaga Surya Sebagai Catu Daya Kincir Air Pada Tambak Perikanan. *Aurelia Journal*, *4*(2). Https://Doi.Org/10.15578/Aj.V4i2.11686

Octavianti, A., Muliadi, M., & Apriansyah, A. (2018). Estimasi Intensitas Radiasi Matahari Di Wilayah Kota Makassar. *Prisma Fisika*, *6*(3). Https://Doi.Org/10.26418/Pf.V6i3.28711

Pratiwi, S. H., Purnamasari, R. T., & Hidayanto, F. (2023). Pengaruh Intensitas Radiasi Matahari Dan Pemberian Pupuk Nitrogen Terhadap Produktivitas Sawi Putih (Brassica Pekinensia L.). *Agrisaintifika: Jurnal Ilmu-Ilmu Pertanian*, *7*(1). Https://Doi.Org/10.32585/Ags.V7i1.3624

Ridwan, Ramadhan, W., Kurniawan, A., Lestari, W., & Setiawan, D. (2021). Pemanfaatan Sinar Matahari Sebagai Energi Alternatif Untuk Kebutuhan Energi Listrik. *Seminar Nasional Karya Ilmiah Multidisiplin*, *1*(1).

Ridwan, Wahyu Ramadhan, Ade Kurniawan, Widya Lestari, & David Setiawan. (2021). Senkim : Seminar Nasional Karya Ilmiah Multidisiplin. *Senkim : Seminar Nasional Karya Ilmiah Multidisiplin*, *1*(1).

Timotiwu, P. B., Manik, T. K. B., & Ginting, Y. C. (2021). Pengaruh Intensitas Radiasi Matahari Terhadap Pertumbuhan Dan Kualitas Selada Merah (Lactuca Sativa L.). *Jurnal Agrotek Tropika*, *9*(1). Https://Doi.Org/10.23960/Jat.V9i1.4770

Utomo, M. S., Nugrahanto, I., & Sungkono, S. (2023). Sistem Penyimpanan Energi Menggunakan Baterai Sel Sekunder Pada Photovoltaic. *Jurnal Elektronika Dan Otomasi Industri*, *10*(1). Https://Doi.Org/10.33795/Elkolind.V10i1.2753

Zhafira, Z., Riviwanto, M., & Gusti, A. (2024). Hubungan Intensitas Radiasi Ultraviolet, Jarak Pengelasan, Dan Karakteristik Pekerja Dengan Gejala Konjungtivitis Fotoelektrik Pada Pekerja Bengkel Las Di Kota Bukittinggi. *Ruwa Jurai: Jurnal Kesehatan Lingkungan*, *18*(1). Https://Doi.Org/10.26630/Rj.V18i1.4130