J@TI JURNAL TEKNIK INDUSTRI UNIVERSITAS DIPONEGORO

Vol. 20, No. 3, September 2025

OPTIMASI PENGGUNAAN SISTEM HYBRID PANEL SURYA-PLN UNTUK MEMINIMASI BIAYA ENERGI LISTRIK JANGKA PANJANG (STUDI KASUS: 20 TAHUN)

F. Edwin Wiranata, Ika Murti Kristiyani*, Timothy Rey Laheba

Departemen Teknik Industri, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Atma Jaya Yogyakarta,
Jl. Babarsari No. 43, Yogyakarta, Indonesia 55281

Abstract

Integrasi panel surya dengan jaringan PLN menjadi salah satu solusi menjanjikan untuk mengurangi ketergantungan energi fosil dan biaya listrik. Namun, penentuan kapasitas panel surya optimal yang mempertimbangkan degradasi efisiensi dan biaya investasi masih menjadi tantangan terutama bagi konsumen rumah tangga yang memiliki luas area terbatas. Penelitian ini bertujuan untuk menghitung kapasitas panel surya optimal yang meminimasi total biaya selama 20 tahun. Metodologi penelitian ini meliputi penentuan parameter sebagai data awal, pemodelan matematika, simulasi untuk optimasi serta analisis sensitivitas. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah model optimasi non-linear dengan variabel kapasitas panel surya (S), degradasi efisiensi tahunan (0,5%), dan biaya energi PLN (Rp1700/kWh). Analisis dilakukan melalui simulasi numerik untuk berbagai kapasitas S. Pada studi kasus dengan kebutuhan energi 5000 kWh/tahun, kapasitas optimal adalah 4 KWp (26,7 m²), menghasilkan total biaya Rp 48.000.000,- selama 20 tahun (penghematan 71,8% dibandingkan tanpa panel surya). Model ini memberikan kerangka kuantitatif untuk memilih ukuran sistem hybrid yang optimal, dengan sensitivitas terhadap harga panel surya dan degradasi efisiensi.

Keywords: *panel surya; energi terbarukan; optimasi; hybrid*

Abstract

[Optimization of the Solar Panel-PLN Hybrid System to Minimize Long-Term Electricity Costs: A 20-Year Case Study] *Integration of solar panels with the PLN network is a promising solution to reduce dependence on fossil fuels and electricity costs. However, determining the optimal solar panel capacity that accounts for efficiency degradation and investment costs remains a challenge, especially for household consumers with limited land area. This study aims to calculate the optimal solar panel capacity that minimizes the total cost over a 20-year period. The research methodology includes determining parameters as initial data, mathematical modeling, simulation for optimization, and sensitivity analysis. The method used is a non-linear optimization model with variables such as solar panel capacity (S), annual efficiency degradation (0.5%), and PLN energy costs (IDR 1700/kWh). Numerical simulations were conducted for various solar panel capacities (S). In a case study with an energy requirement of 5000 kWh/year, the optimal capacity was found to be 4 KWp (26.7 m²), resulting in a total cost of IDR 48 million over 20 years, which represents a 71.8% savings compared to not using solar panels. This model provides a quantitative framework for selecting the optimal hybrid system size, with sensitivity to solar panel prices and efficiency degradation.*

Keywords: *solar panel; renewable energy; optimization; hybrid*

1. Pendahuluan

Pemanfaatan energi terbarukan sebagai alternatif sumber listrik semakin populer seiring meningkatnya kesadaran lingkungan dan kebutuhan energi masyarakat. Di Indonesia, energi surya menjadi salah satu opsi potensial yang patut dipertimbangkan, didukung oleh persepsi positif masyarakat terhadap penggunaan sel surya sebagai sumber alternatif (Alnavis dkk., 2024). Terlebih potensi yang dimiliki Indonesia untuk menghasilkan energi terbarukan cukup besar, seperti tenaga surya, angin, dan ombak. Indonesia berada di daerah ekuator dan memiliki garis pantai yang panjang sehingga potensi energi listrik dari tenaga surya sangat besar (Amin dkk., 2018). Namun,

*Penulis Korespondensi.

E-mail: ika.murti@uajy.ac.id

permintaan energi listrik yang terus meningkat akibat pertumbuhan populasi dan industrialisasi justru masih bergantung pada sumber fosil yang tidak hanya berdampak lingkungan, tetapi juga rentan terhadap fluktuasi biaya (Setyono & Kiono, 2021). Maka dari itu pengembangan sistem energi terbarukan, khususnya tenaga surya perlu dioptimalkan. Disisi lain, investasi panel surya juga tidak dapat dikatakan murah (Yuwono dkk., 2021). Namun, dalam jangka panjang dan perhitungan yang tepat, panel surya menjadi salah satu solusi alternatif energi listrik yang layak untuk dimanfaatkan (Pasaribu dkk., 2023; Kartikasari dkk., 2024). Di beberapa tempat, pembakit utama energi listrik bahkan belum memadai, tetapi potensi untuk membangun pembakit listrik dengan sistem hibrid, misalnya dari tenaga surya dan tenaga angin sebagai sumber alternatif cukup tinggi (Syarif & Yunus, 2012). Sistem ini memungkinkan optimalisasi pemanfaatan sumber daya lokal sekaligus memitigasi ketergantungan berlebihan pada satu jenis energi. Selain itu, dari perspektif lingkungan, meskipun dalam skala besar, sel surya memberikan dampak negatif yang cukup besar terhadap lingkungan (Quek dkk., 2024), tetapi dalam skala rumah tangga, penggunaan panel surya di atap rumah dapat mengurangi efek negatif terhadap lingkungan melalui reduksi emisi karbon (Yin dkk., 2024; Villa-Ávila dkk., 2024).

Dengan adanya berbagai alternatif, kita dapat menentukan sendiri sistem energi listrik yang optimal untuk digunakan sehari-hari. Misalnya dengan memanfaatkan tenaga surya sepenuhnya, atau dengan menggunakan sistem hibrid, yaitu kombinasi energi surya dan energi listrik fosil yang disalurkan oleh PLN. Selain sebagai sumber energi terbarukan, panel surya telah banyak dipakai karena ramah lingkungan (Dwisari dkk., 2023). Panel surya menjadi alternatif berkelanjutan (Sanjaya dkk., 2024), tetapi keterbatasan produksi energi (misal: pada malam hari atau cuaca berawan) memerlukan integrasi dengan jaringan PLN (sistem hibrid). Namun, jika hanya memanfaatkan energi dari jaringan PLN, adakalanya fluktuasi dan ketidakstabilan mempengaruhi peralatan elektronik pada sistem kita (Suwitno dkk., 2024; Zaini dkk., 2022). Selain itu, kenaikan tarif PLN juga mempengaruhi biaya total yang kita keluarkan untuk listrik terutama dalam jangka waktu yang panjang, sehingga penggunaan energi surya perlu dipertimbangkan. Namun, hambatan investasi awal tetap menjadi dilema utama yang memerlukan formulasi strategi optimasi berbasis analisis yang komprehensif. Persoalannya adalah seberapa besar investasi kita untuk sistem hibrid ini agar optimal. Beberapa penelitian fokus pada desain dan model sistem hibrid (Dei & Batjargal, 2022; Desai dkk., 2019; Hamoodi dkk., 2024), tetapi kurang membahas optimasi kapasitas panel surya yang mempertimbangkan degradasi efisiensi tahunan dan biaya investasi operasional kumulatif jangka panjang. Selain itu, studi sebelumnya belum mengkaji sistem hibrid secara spesifik untuk konsumen rumah tangga. Studi ini mengisi celah tersebut dengan mengembangkan dan melakukan simulasi model matematika untuk menentukan kapasitas panel surya optimal dengan sistem hibrid yang *cost-effective* selama 20 tahun pemakaian.

Dengan semakin meningkatnya kebutuhan energi dan keterbatasan lahan untuk instalasi energi terbarukan di area pemukiman, maka urgensi untuk merancang sistem yang hemat biaya dan efisien dalam jangka panjang menjadi semakin tinggi. Penelitian ini memiliki implikasi strategis tidak hanya bagi konsumen rumah tangga, tetapi juga bagi pengambil kebijakan dalam merumuskan insentif dan regulasi terkait energi terbarukan. Melalui pendekatan kuantitatif, studi ini menawarkan kerangka analisis yang aplikatif untuk menentukan kapasitas panel surya optimal dalam sistem hibrid, dengan mempertimbangkan aspek teknis dan ekonomi secara bersamaan. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat berkontribusi terhadap percepatan pemanfaatan teknologi energi terbarukan secara lebih rasional dan terukur.

Teori

Seiring berjalannya waktu, efisiensi panel surya terus berkurang atau dengan kata lain mengalami degradasi efisiensi. Penurunan efisiensi panel surya dari waktu ke waktu dapat dimodelkan secara eksponensial berdasarkan laju degradasi tahunan (Jordan & Kurtz, 2013). Dengan mempertimbangkan degradasi efisiensi (d), energi yang dihasilkan panel surya pada tahun ke-t ($E_{\text{solar}}(t)$) dapat dihitung dengan persamaan berikut ini.

$$E_{\text{solar}}(t) = S.E_{\text{solar/KWp}}.(1-d)^{t-1} \quad (1)$$

dengan
S = kapasitas daya listrik yang dihasilkan oleh panel surya dalam satuan kilowatt *peak* (KWp)
$E_{\text{solar/KWp}}$ = produksi energi listrik dari panel surya per KWp per tahun (kWh/KWp/tahun)
d = degradasi efisiensi.

Biaya kumulatif sistem hibrid terdiri dari biaya investasi panel surya dan biaya operasional penggunaan listrik dari PLN. Biaya investasi panel surya (C_{solar}) dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$C_{\text{solar}} = C_{\text{panel}} \, . \, S \quad (2)$$

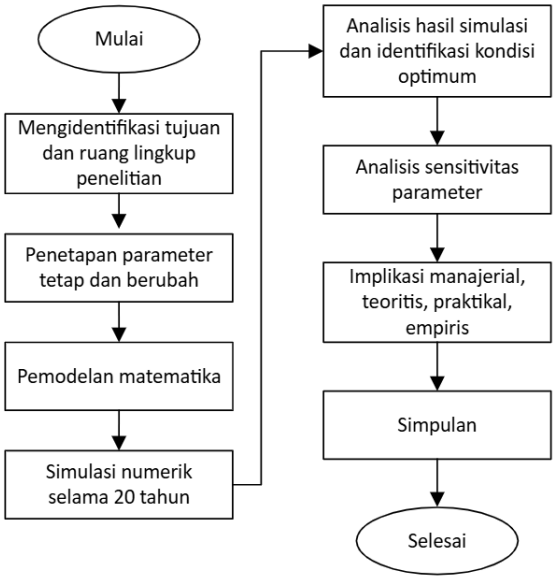
dengan
C_{panel} = biaya panel surya per kWp.

Sedangkan, biaya penggunaan listrik PLN (C_{PLN}) dihitung selama jangka waktu (T) 20 tahun dengan mempertimbangkan penurunan produksi energi panel surya akibat degradasi efisiensi. Persamaannya adalah sebagai berikut.

$$C_{\text{PLN}} = \sum_{t=1}^{T} \left[C_{tarif}. \max(E_{total} - E_{solar}(t), 0) \right] \quad (3)$$

dengan C_{tarif} = harga listrik PLN, yaitu Rp 1.700,- per kWh, maka total biaya sistem hibrid adalah:

$$Total\ Biaya = C_{\text{solar}} + C_{\text{PLN}} \quad (4)$$



Gambar 1. *Flowchart* Proses Penelitian

Tabel 1. Parameter Penelitian

No	Parameter	Nilai atau Kuantitas
1	Kebutuhan energi tahunan (E_{total})	5.000 kWh/tahun
2	Produksi Panel Surya per kWp ($E_{solar/kWp}$)	1.500 kWh/kWp/tahun
3	Biaya panel surya per KWp (C_{panel})	Rp 12.000.000,-/kWp
4	Biaya PLN per kWh (C_{tarif})	Rp 1.700,-/kWh
5	Degradasi panel per tahun (d)	0,5% per tahun
6	Efisiensi panel per satuan luas (η)	0,15 KWp/m^2 (6,67 m^2 per KWp)
7	Masa pakai (T)	20 tahun

2. Metode Penelitian

Pendekatan yang digunakan mengadaptasi metode optimasi biaya kumulatif berbasis simulasi numerik, dengan mempertimbangkan faktor degradasi, biaya listrik PLN, dan efisiensi konversi luas panel. Berbeda dari penelitian sebelumnya yang hanya fokus pada kapasitas awal tanpa mempertimbangkan umur sistem dan batasan fisik lahan, model ini menyertakan parameter efisiensi luas dan skenario sensitivitas sebagai pembeda. **Gambar 1** merupakan *flowchart* proses yang dilakukan dalam penelitian ini. Proses dimulai dengan mengidentifikasi tujuan dan ruang lingkup penelitian, diikuti oleh penetapan parameter tetap (biaya PLN) dan parameter yang berubah (degradasi efisiensi), serta pemodelan matematika. Selanjutnya dilakukan simulasi numerik selama 20 tahun untuk memperoleh hasil dan mengidentifikasi hasil yang optimum. Setelah itu, analisis sensitivitas dan penarikan implikasi manajerial, teoritis, praktikal dan empiris. Langkah terakhir adalah penarikan kesimpulan.

Parameter

Ada banyak sekali variabel yang mempengaruhi baik energi yang dihasilkan maupun biaya yang dikeluarkan. Untuk itu, pada penelitian ini, variabel-variabel tersebut dibatasi dengan sejumlah asumsi dan parameter studi kasus. Menurut data di Badan Pusat Statistik, konsumsi energi listrik Indonesia mencapai 1.200 kWh per kapita. Dengan asumsi dalam satu rumah terdiri dari 4-5 anggota keluarga, asumsi penggunaan listrik adalah 5.000 kWh per tahun. Energi listrik yang dihasilkan dari panel surya juga sangat bergantung pada lokasinya, contohnya di Indonesia dengan rata-rata menghasilkan 4-5 kWh/m^2/hari, secara umum untuk 1 kWp menghasilkan sekitar 1.500 kWh/tahun. Selanjutnya asumsi biaya instalasi panel surya adalah Rp 12.000.000,-/kWp dengan jangka waktu pemakaian T = 20 tahun. Secara lengkap parameter yang digunakan dapat dilihat pada **Tabel 1**.

Simulasi numerik

Simulasi perhitungan digunakan untuk menghitung total biaya adalah untuk S = 0 sampai dengan 10 KWp. Untuk menghitung defisit energi tahunan, deret geometri dapat digunakan yaitu sebagai berikut.

$$\sum_{t=1}^{T} r^{t-1} = \frac{1-r^T}{1-r} \quad (5)$$

Dengan nilai r = 1 – d diperoleh

$$\sum_{t=1}^{T} (1-d)^{t-1} = \frac{1-(1-d)^T}{d} \quad (6)$$

Luaran dari model ini adalah kapasitas optimal yang berkaitan langsung dengan luas panel surya yang dibutuhkan. Untuk mengonversi kapasitas optimal ke luas optimal dapat menggunakan persamaan berikut ini.

$$A = \frac{S_{optimal}}{\eta} \quad (7)$$

Tabel 2. Total Biaya Simulasi Model

S (KWp)	Biaya Panel (Rp)	Biaya PLN (Rp)	Total Defisit Energi (kWh)	Total Biaya (Rp)
0	0	170.000.000	100.000	170.000.000
1	12.000.000	121.351.344	71.383	133.351.344
2	24.000.000	72.702.689	42.766	96.702.689
3	36.000.000	24.054.034	14.149	60.054.034
4	48.000.000	0	0	48.000.000
5	60.000.000	0	0	60.000.000
6	72.000.000	0	0	72.000.000

Dengan A adalah luas optimal, $S_{optimal}$ adalah kapasitas optimal, dan η adalah efisiensi panel per satuan luas. Dengan nilai η = 0,15 KWp/m^2, maka luas optimal dapat dihitung dengan persamaan berikut.

$$A = \frac{S_{optimal}}{0{,}15} \quad (8)$$

3. Hasil & Pembahasan

Sistem hibrid dalam penelitian ini merupakan integrasi panel surya dengan penggunaan listrik dari PLN. Konsumsi energi per tahun adalah 5.000 kWh, sehingga ketika energi yang dihasilkan dari panel surya dalam satu tahun kurang dari angka tersebut, sistem akan menggunakan energi listrik dari PLN. Defisit energi setiap tahun diartikan sebagai seberapa besar energi listrik dari PLN yang digunakan untuk mencukupi kebutuhan 5.000 kWh. Secara matematis, defisit energi adalah selisih kebutuhan energi dengan energi yang dihasilkan panel surya dalam satu tahun.

$$\text{Defisit} = E_{\text{total}} - E_{\text{solar}} \quad (9)$$

Sedangkan energi yang dihasilkan dari panel surya adalah hasil kali S dengan produksi panel surya per kWp atau secara matematis adalah $E_{\text{solar}} = S.E_{\text{solar/kWp}}$. Karena $E_{\text{solar/kWp}}$ = 1500 kWh/kWp/tahun, maka $E_{\text{solar}} = S.1500$, sehingga defisit dapat ditulis sebagai berikut.

$$\text{Defisit} = 5000 - S.1500 \quad (10)$$

Dalam jangka waktu 20 tahun, defisit per tahun terus bertambah akibat penurunan efisiensi. Persamaan total defisit dapat dituliskan sebagai berikut.

$$Defisit\ total = \sum_{t=1}^{T}[5000 - S.1500.(1-d)^{t-1}] \quad (11)$$

Selanjutnya, fungsi *max* perlu ditambahkan di dalam fungsi untuk menghindari nilai negatif pada hasil perhitungan defisit energi karena defisit energi hanya dihitung ketika ada kekurangan energi dari panel surya. Selain itu, jika energi yang diproduksi panel surya lebih besar dari kebutuhan atau terjadi surplus, maka selisih energi tersebut hanya dapat dikonsumsi atau dengan kata lain tidak ada defisit energi (defisit bernilai 0). Dengan pendekatan ini, persamaan total defisit energi dapat dituliskan sebagai berikut.

$$Total\ Defisit\ Energi = \sum_{t=1}^{20}[\max(5000 - S.1500.(1-d)^{t-1}, 0)] \quad (12)$$

Nilai total defisit energi ini adalah C_{PLN}. Dari persamaan total biaya (Total Biaya = $C_{\text{solar}} + C_{\text{PLN}}$), maka total biaya yang dikeluarkan selama 20 tahun dapat dituliskan dalam persamaan berikut ini.

$$Total\ Biaya = 12.000.000.S + \sum_{t=1}^{20}[1700.\max(5000 - S.1500.(1-d)^{t-1}, 0)] \quad (13)$$

Langkah berikutnya adalah melakukan simulasi dengan pendekatan numerik dalam menghitung total biaya untuk S bernilai 0 sampai 10 dan mencari total biaya terendah. **Tabel 2** cukup menampilkan sampai setidaknya pada S = 6 karena untuk nilai S yang lebih besar, nilai total biaya akan sama dengan biaya panel yang semakin tinggi. Hasilnya dapat dilihat pada **Tabel 2**.

Berdasarkan **Tabel 2** dan **Gambar 2**, biaya optimal adalah pada S = 4 KWp dengan total biaya sebesar Rp 48.000.000,-. **Gambar 2** menunjukkan garis merah merupakan nilai S yang optimal. Dengan nilai S optimal adalah 4 KWp, maka luas panel optimal adalah 26,7 m^2. Berdasarkan Keputusan Menteri Pemukiman dan Prasarana Wilayah (Kepmen Kimpraswil) Nomor 403/KPTS/M/2002 tentang Pedoman Teknis Pembangunan Rumah Sederhana Sehat (Rs Sehat), luas ideal per jiwa adalah 9,0 m^2 atau jika diasumsikan dalam satu rumah terdapat 4 orang, maka luas rumah minimal adalah 36,0 m^2. Ini berarti, untuk rumah 1 lantai angka 26,7 m^2 meliputi 74% dari total luas bangunan. Jika kita bandingkan dengan total biaya tanpa panel surya, yaitu Rp 170.000.000,-, dengan menggunakan sistem hibrid yang optimal, penghematan dapat mencapai 71,8%.

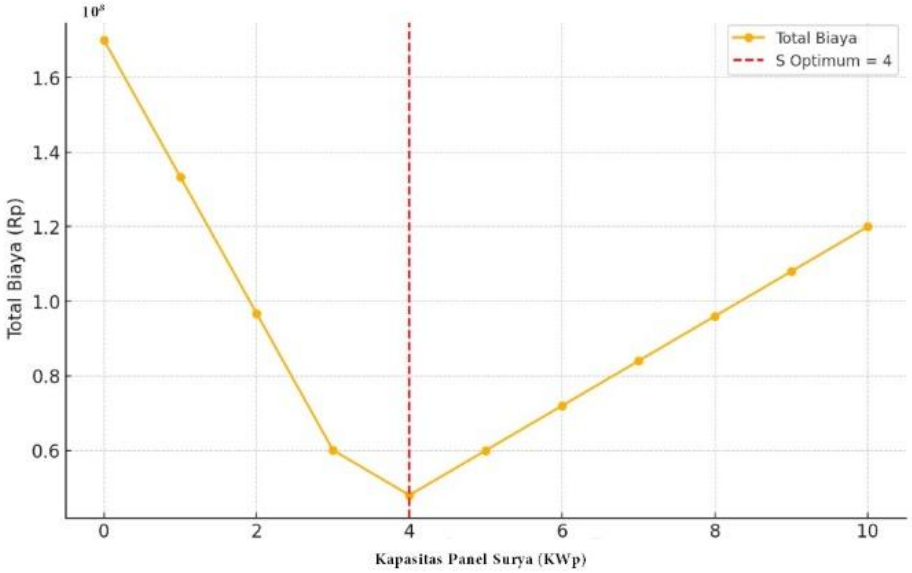
Untuk mengecek produksi energi panel surya khusus pada tahun ke-20, kita dapat menggunakan persamaan ($E_{\text{solar}}(t) = S.E_{\text{solar/KWp}}.(1-d)^{t-1}$). Pertama, kita hitung faktor degradasinya untuk melihat performa panel surya pada tahun ke-20.

$$(1-d)^{t-1} = (1-0{,}005)^{19} = (0{,}995)^{19} \approx 0{,}906$$

Hasil perhitungan tersebut menunjukkan pada tahun ke-20, panel surya masih beroperasi pada 90,6% dari efisiensi awalnya. Selanjutnya, kita hitung energi yang dihasilkan pada tahun ke-20.

$$E_{\text{solar}}(20) = (4)(1500)(0{,}906) = 5436 \text{ kWh}$$

Faktor degradasi total dapat dihitung dengan persamaan deret geometri, sebagai berikut.



Gambar 2. Grafik Biaya Optimal

$$\sum_{t=1}^{20}(1-0{,}005)^{t-1} = \frac{1-(1-0{,}005)^{20}}{0{,}005}$$

$$\sum_{t=1}^{20}(0{,}995)^{t-1} = 18{,}77$$

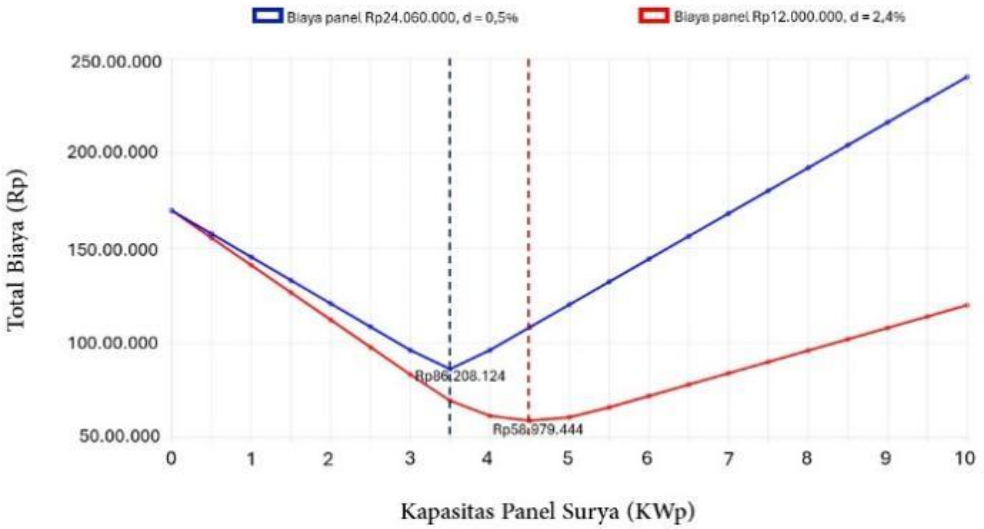
Selanjutnya, total produksi energi listrik dari panel surya selama 20 tahun adalah sebagai berikut.

E_{solar} = (4)(1500)(18,77) = 112.620 kWh

Produksi energi panel surya pada tahun ke-20 masih mencapai 5.438 kWh/tahun yang mana angka ini masih lebih besar dari kebutuhan 5.000 kWh/tahun sehingga sampai pada tahun ke-20, tanpa menggunakan energi listrik dari PLN, dengan luas panel optimal ini sudah cukup untuk memenuhi kebutuhan energi listrik rata-rata per tahun. Begitu pula dalam jangka panjang, produksi energi sebesar 112.620 kWh sudah melebihi kebutuhan selama 20 tahun, yaitu 100.000 kWh. Meskipun nilai optimal ini menunjukkan energi dari PLN tidak digunakan, ini tidak mengurangi esensi dari optimasi sistem hibrid panel surya-PLN. Tujuan utama dari sistem hibrid adalah meminimalkan biaya total, termasuk investasi dan operasional dengan mengoptimalkan kapasitas panel surya. Sistem hibrid dirancang untuk memanfaatkan sebanyak mungkin sumber energi terbarukan, sambil tetap mengandalkan PLN sebagai cadangan ketika produksi energi surya tidak mencukupi, terlebih untuk daerah yang sering mengalami fluktuasi cuaca dan jumlah sinar matahari yang berubah-ubah. Meskipun pada S = 4 KWp, energi PLN tidak diperlukan, tetapi dengan sistem seperti ini juga dapat memberikan fleksibilitas misalnya saat ada peningkatan kebutuhan energi listrik di masa depan, sistem dapat dengan mudah mengambil listrik dari PLN tanpa perlu modifikasi besar. Kesimpulannya, sistem hibrid dengan luas panel 26,7 m^2 (S = 4 KWp) adalah optimal untuk meminimalkan biaya, baik dengan atau tanpa penggunaan listrik PLN. Jika kapasitas panel surya kurang dari 4 KWp, sistem akan memerlukan listrik dari PLN yang akan meningkatkan biaya operasional. Sebaliknya, jika kapasitas panel surya lebih dari 4 KWp, biaya investasi akan meningkat tanpa manfaat tambahan.

Sensitivitas model pada simulasi ini dapat ditinjau dari biaya panel surya, biaya listrik PLN, dan tingkat degradasi. Namun, jika melihat dari optimalnya biaya total dengan memanfaatkan energi panel surya sepenuhnya, maka yang dapat membuat panel surya menjadi tidak optimal adalah apabila biaya panel surya meningkat dan degradasi panel surya tinggi. Sedangkan biaya listrik PLN yang meningkat tidak mempengaruhi optimasi pada S = 4 KWp. Meskipun demikian, dari simulasi persamaan (total biaya) kapasitas optimal (S) cukup konsisten di angka 4 KWp. Nilai S optimal berubah di angka $S \approx$ 3,5 KWp saat biaya panel surya > ±Rp 24.060.000,- per KWp dengan total biaya optimal di angka Rp 86.208.124,-. Hal ini tentu masuk akal mengingat biaya panel surya yang tinggi hanya membuat pemasangan panel surya pada sistem hibrid menjadi semakin tidak efisien. Sedangkan untuk pengurangan efisiensi performa panel, perubahan S optimal baru signifikan ketika pengurangannya sebesar > ±2,4%, yaitu di angka $S \approx$ 4,5 dengan biaya total di angka Rp 58.979.444,-. **Gambar 3** menunjukkan grafik biaya optimal sensitivitas model.

Berdasarkan analisis tersebut, perubahan dua parameter yang mempengaruhi sensitivitas model adalah perubahan nilai biaya instalasi panel surya dan degradasi panel per tahun. Energi yang dihasilkan oleh panel surya dapat mengalami degradasi, sehingga masa pakainya hingga 20-30 tahun (Kartikasari dkk., 2024). Pengaruh perubahan tersebut dapat dikatakan cukup kecil karena butuh harga yang sangat tinggi pada instalasi panel dan degradasi yang cukup tinggi (>2,4%) untuk membuat perubahan S optimal. Ini menunjukkan S = 4 KWp atau setara dengan luas panel 26,7 m^2 tetap menjadi ukuran yang paling ekonomis untuk sistem hibrid panel surya-PLN. Bagaimanapun juga, model ini memiliki angka kebutuhan listrik yang



Gambar 3. Grafik Biaya Optimal Sensitivitas Model

Tabel 3. Hasil Penting Simulasi Model dan Sensitivitas Model

Skenario	Kapasitas Panel Surya (KWp)	Luas Panel (m²)	Total Biaya 20 Tahun (Rp)	Penghematan (%)	Keterangan
Dasar (*default*)	4	26,7	48.000.000	71,80	Kondisi optimal, tidak memerlukan energi dari PLN
Tanpa PLTS (hanya PLN)	0	0	170.000.000	–	Biaya tertinggi tanpa energi terbarukan
S > 4 (contoh: 6 KWp)	6	40	72.000.000	57,60	Biaya meningkat, tidak ada tambahan manfaat
Biaya panel naik > Rp24 juta/KWp	3,5	23,3	86.208.124	49,30	Kapasitas optimal turun karena investasi terlalu mahal
Degradasi panel > 2,4%/tahun	4,5	30	58.979.444	65,30	Kapasitas optimal naik karena performa panel lebih cepat turun

konstan, yaitu 5.000 kWh/tahun sehingga model ini dapat dikembangkan lebih lanjut untuk melihat bagaimana pengaruh kebutuhan energi listrik yang besar terhadap sistem hibrid panel surya-PLN yang optimal, misalnya pada perkantoran atau universitas. Selain itu, perlu ada analisis yang spesifik dengan mempertimbangkan intensitas sinar matahari, pola konsumsi listrik, harga komponen, dan kebijakan subsidi pemerintah.

Tabel 3 menyajikan hasil-hasil penting mencakup skenario dan sensitivitas model berdasarkan model yang disimulasikan. Temuan ini memiliki implikasi manajerial bagi rumah tangga, pengembang perumahan, dan pemerintah selaku regulator energi. Bagi rumah tangga, hasil penelitian ini memberikan gambaran praktis untuk menentukan kapasitas panel surya yang paling hemat biaya dalam jangka panjang, sehingga membantu dalam perencanaan anggaran energi dan investasi rumah tangga. Dengan mengetahui kapasitas optimal sebesar 4 KWp, konsumen dapat menghindari pengeluaran berlebih maupun kekurangan suplai energi. Rumah tangga dapat menentukan luas atap optimum yang perlu dialokasikan untuk mencapai efisiensi maksimum tanpa investasi berlebih. Misalnya dengan $S > 4$ KWp tidak memberi manfaat tambahan dalam konteks kebutuhan 5.000 KWh/tahun.

Bagi pengembang perumahan, informasi ini dapat digunakan untuk merancang tipe rumah yang secara struktur dan luasan atap telah siap untuk instalasi dengan sistem hibrid. Temuan ini memungkinkan pengembang mengembangkan paket hunian berbasis energi terbarukan (*green housing*) sebagai nilai tambah pemasaran sekaligus penyesuaian terhadap tren ESG (*Environmental, Social, and Governance).* Dengan informasi efisiensi dan return dalam 20 tahun, pengembang dapat menyusun skema pembiayaan (cicilan panel, *bundling* KPR) dan menjalin mitra dengan penyedia sistem PLTS.

Bagi pemerintah, hasil ini dapat menjadi dasar untuk menyusun kebijakan insentif yang lebih terarah, misalnya subsidi berbasis luas efektif atap untuk panel surya, kapasitas sistem, atau tingkat efisiensi jangka panjang. Pemerintah juga dapat menggunakannya sebagai perencanaan energi nasional, misalnya dalam *roadmap* transisi energi nasional. Pemerintah dapat memproyeksikan penghematan energi apabila misalnya ada 10 juta rumah tangga memanfaatkan sistem hibrid 4 KWp. Perhitungan pengurangan emisi CO_2 per rumah tangga juga dapat dilakukan sebagai laporan dan penentuan langkah strategis ke depannya.

Pendekatan kuantitatif yang digunakan dalam studi ini tidak hanya relevan untuk sektor rumah

tangga, tetapi juga memiliki potensi luas untuk diadaptasi pada segmen lain seperti perkantoran, sekolah, dan pelaku Usaha Mikro, Kecil, dan Menengah (UMKM). Dengan menyesuaikan parameter kebutuhan energi harian, pola konsumsi, serta batasan teknis seperti luas atap tersedia, jam operasional, dan kapasitas beban listrik, model ini dapat membantu pihak yang bukan rumah tangga dalam merancang sistem hibrid yang optimal secara teknis dan ekonomis. Misalnya, pada perkantoran dengan beban dominan di siang hari, sistem dapat dirancang agar PLTS menjadi sumber utama, sementara PLN berfungsi sebagai cadangan. Di sisi lain, UMKM yang beroperasi di lahan sempit dapat memanfaatkan pendekatan ini untuk mengevaluasi kelayakan investasi dalam sistem energi terbarukan skala kecil. Dengan penerapan yang tepat, model ini dapat meningkatkan efisiensi energi berbagai sektor, mendukung pengurangan emisi karbon, dan mempercepat transformasi energi berkelanjutan.

Implikasi praktikal dari hasil penelitian ini dapat diterapkan dalam penentuan tata letak dan luas panel surya yang tetap di atap rumah, pemilihan kapasitas sistem hibrid yang sesuai dengan kebutuhan energi, serta pemeliharaan sistem agar efisien dalam jangka panjang. Selain itu, temuan ini memiliki kontribusi teoritis karena dapat menambah literatur tentang optimasi sistem energi terbarukan melalui integrasi aspek teknis, ekonomi dalam pemodelan jangka panjang. Penelitian ini menawarkan pendekatan sistematis penentuan kapasitas sistem hibrid panel surya PLN dengan berbasis simulasi. Secara empiris, hasil simulasi selama 20 tahun memberikan bukti kuantitatif mengenai dampak degradasi panel surya, biaya tetap PLN, dan konfigurasi sistem terhadap total biaya energi. Oleh karena itu, penelitian ini dapat dijadikan sebagai referensi berbasis data dalam pengambilan keputusan tergantung dengan wilayah, intensitas, dan perilaku konsumen.

4. Kesimpulan

Sistem hibrid panel surya-PLN memberikan keuntungan bagi konsumen untuk memilih jumlah panel yang paling optimal dan ekonomis. Untuk penggunaan listrik sebesar 5.000 kWh/tahun per rumah, kapasitas 4 KWp atau setara dengan luas panel sebesar ±26,7 m^2 adalah yang paling optimal dalam jangka waktu 20 tahun pemakaian. Luas panel yang dibutuhkan masih dalam batas wajar untuk rumah satu lantai. Model ini dapat dijadikan acuan bagi rumah tangga, pengembang perumahan, dan regulator energi (pemerintah) dalam perencanaan sistem energi rumah tangga berbasis energi terbarukan. Ke depan, model dapat dikembangkan lebih lanjut dengan memperhitungkan pola konsumsi dinamis, integrasi baterai, serta harga pasar energi yang fluktuatif untuk mendukung kebijakan transisi energi nasional.

Kapasitas ini pada dasarnya dapat memenuhi 100% kebutuhan energi listrik per tahun sehingga energi listrik dari PLN berfungsi sebagai cadangan apabila ada peningkatan kebutuhan pada tahun-tahun tertentu atau fluktuasi cuaca yang membuat energi yang dihasilkan tidak mencukupi. Sistem hibrid memberikan fleksibilitas terhadap penggunaan listrik rumah tangga agar tetap optimal dan paling ekonomis untuk pemakaian panel surya dalam jangka waktu yang lama.

Analisis sensitivitas model menunjukkan perubahan dua parameter yang mempengaruhi model adalah perubahan nilai biaya instalasi panel surya dan degradasi per tahun. Nilai optimal model berubah ketika biaya panel surya > ±Rp 24.060.000,- per KWp. Dari parameter efisiensi, nilai optimal berubah ketika pengurangan efisiensi sebesar > ±2,4%. Sedangkan peningkatan biaya listrik tidak mempengaruhi nilai optimal pada model.

5. Daftar Pustaka

Alnavis, N. B., Wirawan, R. R., Solihah, K. I., & Nugroho, V. H. (2024). Energi Listrik Berkelanjutan: Potensi dan Tantangan Penyediaan Energi Listrik di Indonesia. *Journal of Innovation Materials, Energy, and Sustainable Engineering*, *1*(2), 119–139.

Amin, I., Harun, N., & Suyuti, A. (2018). Studi Potensi Energi Terbarukan di Kawasan Timur Indonesia Berbasis Analisis RETScreen International. *INSYPRO: Information System and Processing*, *2*(2), 1–14.

Dei, T., & Batjargal, N. (2022). Technical and Economical Evaluation of Micro-Solar PV/Diesel Hybrid Generation System for Small Demand. *International Journal of Renewable Energy Development*, *11*(4), 1101–1112.

Desai, A., Ray, A., & Mukhopadhyay, I. (2019). Theoretical Analysis of a Solar PV-Wind Hybrid Power System for Energy Generation in Kutch Region. *In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 322*, 1–8. Melbourne, Australia: Deakin University.

Dwisari, V., Sudarti, & Yushardi. (2023). Pemanfaatan Energi Matahari: Masa Depan Energi Terbarukan. *OPTIKA: Jurnal Pendidikan Fisika*, *7*(2), 376–384.

Hamoodi, S. A., Hamoodi, A. N., & Mohammed, R. A. N. (2024). Design and Simulation of Smart Grid Based on Solar Photovoltaic and Wind Turbine Plants. *Journal Europeen des Systemes Automatises*, *57*(4), 953–961.

Jordan, D. C., & Kurtz, S. R. (2013). Photovoltaic degradation rates - An Analytical Review. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, *21*(1), 12–29.

Kartikasari, V., Asmoro, A. Y., Putra, A. F. P., Putri, D. O., & Anggraeni K.K, I. (2024). Penentuan Harga Tenaga Listrik pada Pembangkit Listrik Tenaga Surya dengan Metode Life Cycle Cost dan LCOE. *Journal of Industrial View*, *6*(1), 65–76.

Pasaribu, S. E., Fadhilah, N. H. K., & Kusumah, I. H. (2023). Analisis Biaya Dan Kelayakan Pembangkit Listrik Tenaga Surya Pada Perumahan Taman Lestari Nagrak. *JTEV (Jurnal Teknik Elektro dan Vokasional)*, *9*(1), 129–138.

Quek, A., Abbas, A. R., Zaman, N. Z. I. S., Ata, W. N. S. W., Zainal, M. F., Yapandi, F. K. M., … Suhardi, A. (2024). Life Cycle Assessment of

Large-Scale Solar Photovoltaic Plant based in Malaysia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 1372*, 1–9. Ho Chi Minh, Vietnam.

Sanjaya, R. E., Gianto, R., & Junaidi. (2024). Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Sistem Hybrid Pada Jaringan Kelistrikan di Rumah Sakit Umum Yarsi Pontianak. *Journal of Comprehensive Science*, *3*(9), 4382–4397.

Setyono, A. E., & Kiono, B. F. T. (2021). Dari Energi Fosil Menuju Energi Terbarukan: Potret Kondisi Minyak dan Gas Bumi Indonesia Tahun 2020 – 2050. *Jurnal Energi Baru dan Terbarukan*, *2*(3), 154–162.

Suwitno, Sandhyavitri, A., Sukma, D. Y., Tampubolon, A., Kuliz, M. F. Al, Ramadhan, M. Z. F., & Julianto, R. (2024). Perancangan dan Implementasi Sistem Energi Mandiri Hibrid Sel Surya-PLN untuk Mendukung Server Sekolah di Pondok Pesantren Khairul Ummah 2 Pekanbaru. *Unri Conference Series: Community Engagement*, 758–765. Pekanbaru: Universitas Riau.

Syarif, M. I., & Yunus, Muh. Y. (2012). Rancang Bangun Hybrid Sistem Sel Surya dan Turbin Angin sebagai Sumber Energi Listrik Alternatif. *Jurnal Teknik Mesin Sinergi*, *10*(1), 61–68.

Villa-Ávila, E., Arévalo, P., Ochoa-Correa, D., Villa-Ávila, M., Sempértegui-Moscoso, E., & Jurado, F. (2024). A New Methodology for Estimating the Potential for Photovoltaic Electricity Generation on Urban Building Rooftops for Self-Consumption Applications. *Smart Cities*, *7*(6), 3798–3822.

Yin, Q., Li, A., & Han, C. (2024). The Role of Solar Photovoltaic Roofs in Energy-Saving Buildings: Research Progress and Future Development Trends. *Buildings*, *14*(10), 1–25.

Yuwono, S., Diharto, D., & Pratama, N. W. (2021). Manfaat Pengadaan Panel Surya dengan Menggunakan Metode On Grid. *Energi dan Kelistrikan: Jurnal Ilmiah*, *13*(2), 161–171.

Zaini, Z., Laksono, H. D., Kurnia, R., Darwison, D., Darmawan, D., Muharram, M., … Rusydi, M. I. (2022). Penerapan Sel Surya sebagai Energi Listrik Alternatif di Alfi Hidroponik Padang. *Jurnal Andalas: Rekayasa Dan Penerapan Teknologi*, *1*(2), 71–75.