

Studi Tekno-Ekonomi Sistem Fotovoltaik On-Grid Pada Bangunan Industri Kontrol Satelit

Techno-Economic Study of Photovoltaic On-Grid System in The Satellite Control Industry

**Aji Nur Widyanto^{1,2}, Muhammad Gaviarsha², Faiz Husnayain^{1,2}, Agus R Utomo^{1,2},
I Made Ardita^{1,2}**

¹Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

²Electric Power and Energy Studies, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

aji.nurwidiyanto@ui.ac.id

ABSTRAK

Abstrak. Penggunaan energi fosil di Indonesia masih tinggi. Pemerintah Indonesia berkomitmen dengan menargetkan penggunaan energi terbarukan sebesar 23% pada tahun 2025. Komitmen ini diikuti oleh PLN (Perusahaan Listrik Negara) dengan menargetkan pembangunan pembangkit energi terbarukan sebesar 10,6 GW guna mencapai target pemerintah tersebut. Salah satu potensi energi terbarukan yang cukup menjanjikan di Indonesia adalah pembangkit listrik tenaga surya. Penelitian ini difokuskan pada perancangan sistem fotovoltaik (PV) on-grid di salah satu industri satelit di Indonesia. Beban listrik harian pada PT. RST adalah 1850 kWh. Berdasarkan beban listrik tersebut, maka kapasitas optimum untuk mendesain sistem PV on-grid yang dibutuhkan sebesar 230,8 kW, dengan total luas area yang digunakan adalah 1329,21 meter persegi. Untuk mendapatkan hasil yang optimal, sudut kemiringan PV harus sebesar 9 derajat dan menghadap ke utara. Setelah menjalankan simulasi, dapat diketahui bahwa rata-rata total daya yang dihasilkan per hari adalah 987,38 kWh dengan LCOE sebesar Rp.868,29. LCOE sistem PV ini lebih murah dari standar BPP nasional sehingga sistem ini layak untuk dibangun. Aspek ekonomi lainnya dari hasil simulasi menunjukkan bahwa tingkat ROI adalah 7,1% dan tingkat IRR sebesar 10,3% - serta *payback period* akan membutuhkan waktu sekitar sepuluh tahun.

Kata kunci: Fotovoltaik, sistem on-grid, beban industri

ABSTRACT

Abstract. In Indonesia, the use of fossil energy is still high. Government commitment targets renewable energy use in Indonesia by 23% in 2025. PLN (Perusahaan Listrik Negara) also aims to build a new renewable energy plant of 10.6 GW to achieve the government target. One of the potentially promising renewable energies in Indonesia is solar power (Photovoltaic). This study is focused on designing a photovoltaic on-grid system at one of the industries in Indonesia. The daily energy consumption of PT. RST is 1850 kWh. Based on the electrical load, the optimum capacity to design PV on-grid system needed is 230,8 kW, with the total area used being 1329,21 m². In order to get the optimal result, the PV inclination angle must be 9 degrees and facing north. After running the simulation, it can be found that the average total power produced per day is 987,38 kWh with the LCOE Rp.868,29. LCOE PV system is cheaper than standard national BPP, which makes the system worthy. Another economic aspect from the simulation result shows that the return on investment is 7,1% and the internal rate of return is 10,3%—also, the *payback period* will take approximately ten years.

Keywords: Photovoltaic, on-grid system, industrial load

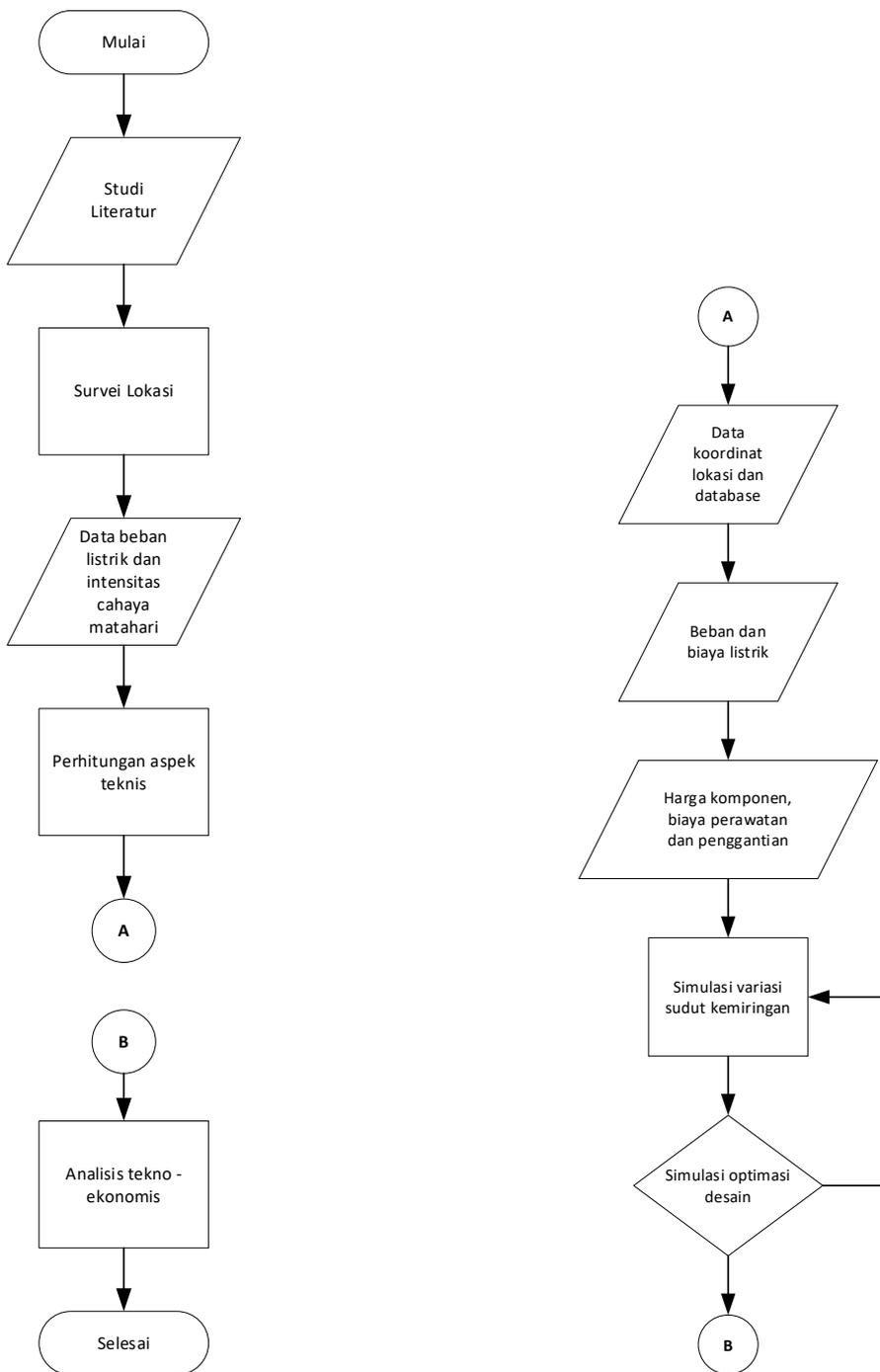
1. PENDAHULUAN

Pemerintah Indonesia berkomitmen dengan menargetkan penggunaan energi terbarukan sebesar 23% pada tahun 2025. Komitmen ini sejalan dengan target SDG (*Sustainable Development Goals*) pada poin ketujuh yaitu energi yang terjangkau dan bersih, dengan meningkatkan secara substansial pangsa energi terbarukan dalam bauran energi global. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) merilis bahwa potensi energi baru dan terbarukan yang sangat besar di Indonesia adalah energi surya sebesar 207,80 GW [1]. Indonesia diuntungkan dengan letak geografisnya yang memiliki dua musim dan sinar matahari yang melimpah. Namun demikian, pemanfaatan energi surya di Indonesia masih jauh dari maksimal potensi yang ada. Saat ini, energi surya yang dimanfaatkan hanya sekitar 150 MW, atau setara dengan sekitar 0,08% dari total 207,80 GW potensinya [2-4]. Saat ini, teknologi panel surya telah mengalami kemajuan yang signifikan dengan menyediakan berbagai pilihan jenis dan kemampuan [5]. Akibatnya, para pemangku kepentingan didorong untuk meningkatkan pemanfaatan energi surya guna memanfaatkan potensinya dan mencapai emisi nol bersih sepenuhnya. Upaya ini diharapkan dapat mendukung transisi energi berbasis bahan bakar fosil ke sumber energi yang bersih dan berkelanjutan.

Sektor bangunan dan konstruksi berkontribusi terhadap sekitar sepertiga emisi gas rumah kaca (GRK) dan lebih dari empat puluh persen total konsumsi energi global [6]. Di seluruh dunia, terutama di negara-negara maju, bangunan-bangunan bertransformasi secara luar biasa untuk meningkatkan efisiensi energi dan mengurangi dampak lingkungan. Energi terbarukan memainkan peran penting dalam upaya ini, dengan sistem fotovoltaik (PV) yang muncul sebagai salah satu sumber energi terbarukan yang paling banyak diadopsi dalam industri bangunan di seluruh dunia [7]. Teknologi PV telah mencapai kesuksesan yang luar biasa dalam konstruksi bangunan sehingga menarik perhatian para peneliti dan memicu investigasi yang sangat luas [8-9]. Pembangkitan listrik dari sistem PV bergantung pada berbagai faktor, salah satu yang cukup penting adalah jumlah radiasi yang diterima oleh panel PV. Jumlah radiasi yang diserap oleh modul PV dipengaruhi oleh sudut datang radiasi dengan modul PV tersebut [10]. Sejumlah penelitian telah dilakukan di berbagai belahan bumi untuk mengidentifikasi sudut kemiringan dan sudut azimuth yang ideal bagi panel surya [11-15]. Penelitian dan pengembangan yang terus menerus dalam teknologi PV telah merevolusi bidang energi terbarukan. Penelitian sebelumnya telah menunjukkan bahwa menggali lebih dalam tentang implementasi, penyempurnaan, dan evaluasi sistem PV di lokasi tertentu di Indonesia sangat menarik [16-17]. Selain itu, mengeksplorasi optimasi biaya untuk sistem PV pada bangunan non-perumahan dengan karakteristik yang beragam telah muncul sebagai salah satu hal yang menarik untuk penelitian lebih lanjut [18-20]. Salah satu sektor non-perumahan yang perlu dieksplorasi adalah sektor industri. Bangunan industri satelit kontrol biasanya terletak pada lahan yang cukup luas dan di wilayah yang hampir tidak ada bangunan tinggi. Hal ini menyebabkan paparan sinar matahari yang dapat diterima di wilayah tersebut, hampir tidak ada penghalang. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis, baik secara teknis maupun ekonomis, penerapan sistem PV on-grid pada bangunan industri kontrol satelit. Dalam studi ini dilakukan optimasi sudut kemiringan dari panel surya agar didapat daya keluaran yang terbaik. Dengan demikian studi ini berkontribusi pada desain sistem PV on-grid pada industri kontrol satelit dengan optimasi sudut kemiringan.

2. METODE PENELITIAN

Panel surya merupakan perangkat yang dapat mengubah sinar matahari menjadi listrik dengan efek fotovoltaik. Bahan utama yang biasa digunakan untuk perangkat fotovoltaik adalah silikon. Silikon murni merupakan isolator pada suhu rendah karena tidak ada elektron yang bergerak bebas [21]. Sistem tenaga surya on-grid yang terhubung ke jaringan listrik sangat populer dan sering digunakan oleh rumah tangga dan bisnis. Sistem ini tidak memerlukan baterai dan terdapat inverter yang terhubung ke jaringan listrik. Penelitian yang dilakukan mengenai perancangan sistem fotovoltaik on-grid dengan optimasi sudut kemiringan seperti yang dijelaskan pada gambar 1.



a. Diagram alir penelitian
 b. Diagram alir simulasi
 Gambar 1. Diagram alir penelitian dan simulasi

Survei yang dilakukan pada penelitian ini berfokus pada berbagai aspek, diantaranya konsumsi listrik harian, tagihan listrik bulanan, dan luas area. Profil beban harian dan intensitas matahari didapatkan dari survei tersebut, kemudian dilakukan perhitungan guna menentukan aspek teknis terkait desain PV seperti luas area yang dibutuhkan, jumlah unit PV yang dibutuhkan, dan konfigurasi string yang optimal untuk setiap inverter. Hasil yang didapat dari perhitungan tersebut kemudian disimulasikan. Diagram alir simulasi ditunjukkan pada Gambar 1b. Data radiasi matahari dan temperatur diambil dari database NASA Surface meteorology and solar Energy yang merepresentasikan kondisi aktual di kota Bogor. Data yang diperoleh nantinya akan

diklasifikasikan per bulan. Selanjutnya simulasi dilakukan dengan memvariasikan sudut kemiringan untuk mengoptimasi output daya yang dihasilkan dari sistem PV on-grid yang dirancang.

Pada simulasi yang dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak HOMER, variasi sudut kemiringan akan mempengaruhi besarnya intensitas radiasi yang diterima oleh solar panel. Hal tersebut dapat dilihat pada persamaan (1).

$$\bar{G}_T = (\bar{G}_b + \bar{G}_d A_i) R_b + \bar{G}_d (1 - A_i) \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \left[1 + f \sin^3 \left(\frac{\beta}{2} \right) \right] + \bar{G} \rho g \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (1)$$

dimana,

- \bar{G}_T : Intensitas Radiasi (kW/m²)
- \bar{G}_b : Radiasi Sinar (kW/m²)
- \bar{G}_d : Radiasi yang menyebar (kW/m²)
- A_i : Indeks anisotropi
- R_b : Radiasi sinar pada permukaan horizontal
- f : Faktor pencerahan cakrawala
- $\bar{G} \rho g$: Tingkat pantulan tanah (%)
- β : Sudut kemiringan (°)

Nilai intensitas radiasi tersebut kemudian digabungkan dengan data lainnya seperti faktor penurunan kemampuan PV dan temperatur panel guna menentukan besarnya daya yang dapat dihasilkan oleh sistem PV tersebut. Proses ini dapat dijabarkan pada persamaan (2).

$$P_{PV} = Y_{PV} f_{PV} \left(\frac{\bar{G}_T}{\bar{G}_{T,STC}} \right) [1 + \alpha_p (T_c - T_{c,STC})] \quad (2)$$

dimana,

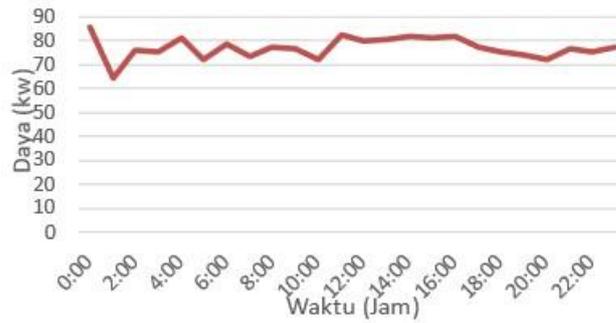
- P_{PV} : Daya keluaran PV (kW)
- Y_{PV} : Kapasitas nominal dari susunan PV (kW)
- f_{PV} : Faktor Penurunan PV (%)
- \bar{G}_T : Intensitas radiasi matahari yang mengenai susunan PV pada waktu tertentu (kW/m²)
- $\bar{G}_{T,STC}$: Intensitas radiasi matahari pada kondisi pengujian standar (1kW/m²)
- α_p : Koefisien temperatur terhadap daya (%/C°)
- T_c : Temperatur panel PV (C°)
- $T_{c,STC}$: Temperatur panel PV pada kondisi pengujian standar (25C°)

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

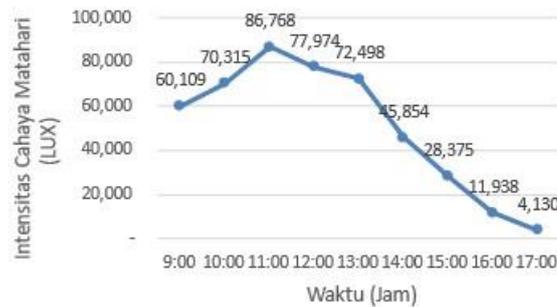
Dari hasil perhitungan dan simulasi yang didapatkan, akan dianalisa terkait aspek teknis yang berupa pemilihan komponen PV dan optimasi sudut kemiringan, serta aspek ekonomis yang berupa biaya modal dan penghematan yang didapat dengan pemasangan sistem PV on-grid. Selanjutnya kedua aspek tersebut digabungkan guna melakukan Analisa tekno – ekonomi untuk mendapatkan nilai LCOE, NPV, IRR, dan lain sebagainya.

A. Pemilihan Komponen PV

Pada penelitian ini, kapasitas PV yang akan dipasang ditetapkan sedekat mungkin dengan langganan listrik dari PLN, atau setara dengan 230 KWp. Untuk menentukan ukuran komponen PV yang optimal dibutuhkan beberapa data, seperti profil beban dan intensitas cahaya matahari harian. Data pengukuran diambil selama beberapa hari kerja kemudian dihitung nilai rata-ratanya. Pengukuran profil beban dilakukan dalam waktu 24 jam, dengan pengambilan sampel data dilakukan setiap jam. Sedangkan pengukuran intensitas cahaya matahari dilakukan secara spesifik pada jam kerja (09.00-17.00) dengan pengambilan sampel per jam. Data pengukuran profil beban dan intensitas cahaya matahari harian dapat dilihat pada Gambar 2 dan 3.



Gambar 2. Data profil beban harian



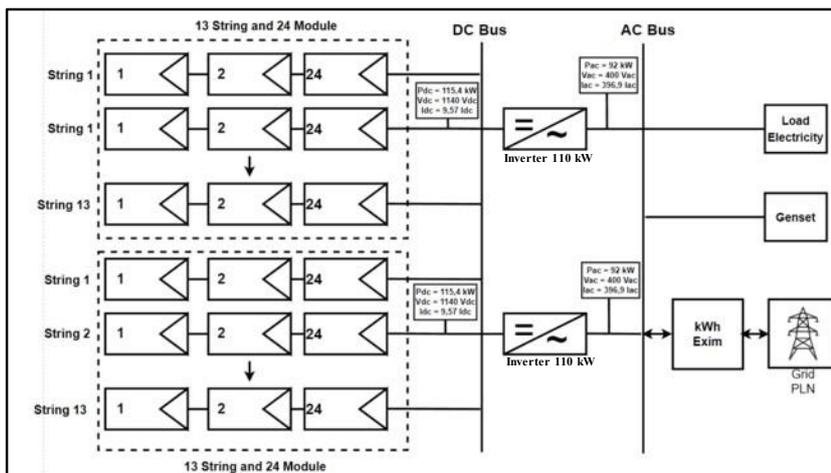
Gambar 3. Data intensitas cahaya matahari

Data pengukuran tersebut dikombinasikan dengan spesifikasi teknis modul PV dan inverter yang terdapat dipasaran kemudian dimasukkan ke simulasi. Modul PV yang dipilih dalam penelitian ini memiliki spesifikasi maksimal daya yang mampu dibangkitkan sebesar 370 W dengan efisiensi 19 %. Sedangkan inverter yang dipilih berkapasitas 92 kW. Berdasarkan simulasi yang dilakukan maka jumlah modul PV dan inverter yang diperlukan terlihat pada tabel 1.

Tabel 1. Komponen pada sistem PV on-grid

Inverter	Jumlah String	Jumlah Modul pada setiap String	Total Jumlah Modul	Rasio DC/AC	Daya [kWp]
Inverter 1 (110 kW)	13	24 (370 Wp)	312	1,25	115,4
Inverter 2 (110 kW)	13	24 (370 Wp)	312	1,25	115,4

Hasil pada tabel 1 digunakan untuk menghitung besarnya lahan yang dibutuhkan. Dengan mempertimbangkan kebutuhan akses perawatan, maka didapatkan kebutuhan lahan seluas 1329,21 m². Selanjutnya susunan komponen sistem PV pada tabel 1 juga digunakan pada simulasi sistem PV on-grid. Diagram skematik yang digunakan untuk mensimulasikan sistem PV on-grid yang diusulkan dapat dilihat pada gambar 4.

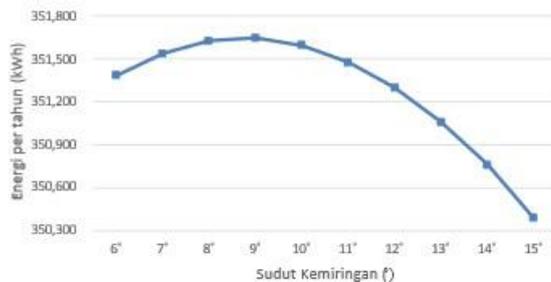


Gambar 4. Diagram skematik sistem PV on-grid yang disimulasikan

Pada gambar 4 terlihat sistem PV *on-grid* yang akan disimulasikan. Sistem ini terdiri dari 2 buah inverter dengan kapasitas 110 kW, dan terhubung dengan jaringan grid (PLN) serta suplai daya darurat (Genset). Masing – masing inverter terhubung dengan 13 string yang terdiri dari 24 modul PV dengan kapasitas satuan 370 WP.

B. Optimasi Sudut Kemiringan

Objek pada penelitian ini terletak di belahan bumi selatan, oleh karena itu, PV akan menghadap ke utara, dan sudut azimuth berada pada 180° . Berdasarkan beberapa literatur yang ada, rekomendasi sudut kemiringan modul surya di Indonesia berada pada kisaran antara 6° - 11° derajat. Meskipun demikian, pada penelitian ini akan dilakukan simulasi dengan pengaturan sudut antara 6 - 15 derajat. Simulasi dilakukan untuk mengamati pengaruh sudut kemiringan terhadap energi yang dihasilkan selama setahun. Hasil simulasi dapat dilihat pada gambar 5.



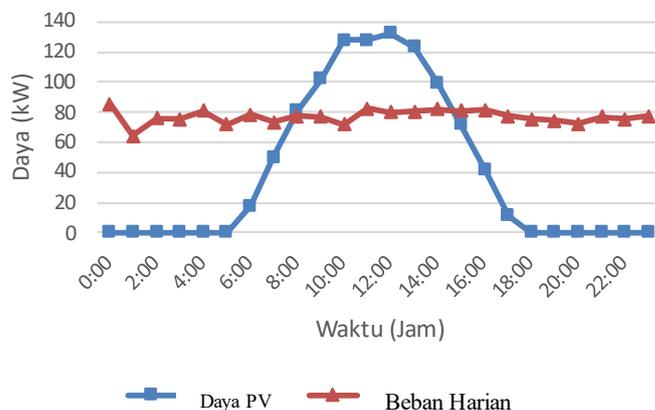
Gambar 5. Energi pertahun terhadap sudut kemiringan modul PV

Pada Gambar 5 terlihat energi yang dihasilkan oleh PV terus meningkat pada awal sudut kemiringan 6° hingga 9° . Namun demikian, setelah sudut kemiringan 9° , energi yang dihasilkan oleh PV menurun. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa sudut kemiringan optimal pada objek penelitian ini adalah 9° .

Daya yang dihasilkan PV dalam satu tahun dapat diperoleh dengan memasukkan sudut kemiringan 9 derajat pada parameter simulasi, seperti yang ditunjukkan pada gambar 6.

Hour	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Average
0-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2-3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3-4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4-5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5-6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2,49	2,53	0	0,42
6-7	13,22	10,72	13,49	17,96	19,82	18,27	15,04	17,73	23,99	23,98	25,71	20,68	18,38
7-8	38,02	36,02	43,60	50,19	56,29	49,21	47,78	54,30	57,71	58,62	52,42	44,18	49,03
8-9	63,12	56,77	76,24	80,84	81,92	77,56	84,98	86,01	96,26	87,64	76,46	69,08	78,07
9-10	86,01	81,94	109,07	102,14	106,68	105,52	108,70	114,31	121,83	124,16	98,68	90,62	104,14
10-11	105,21	97,78	118,59	127,97	122,31	126,55	131,46	132,13	138,28	128,15	111,05	109,34	120,73
11-12	107,18	111,48	118,51	128,17	127,31	135,07	137,65	137,50	135,73	130,30	110,06	113,57	124,38
12-13	110,42	113,77	119,19	132,50	130,28	138,18	140,35	142,71	139,73	131,02	107,96	110,49	126,38
13-14	100,92	100,05	121,39	123,21	116,22	119,63	128,24	135,27	130,88	121,50	102,95	99,21	116,62
14-15	84,75	92,33	100,15	99,38	103,55	99,23	110,14	116,04	110,33	97,02	91,93	87,18	99,34
15-16	59,44	67,61	68,94	72,13	80,05	73,66	76,75	85,52	82,08	74,82	67,62	66,64	72,94
16-17	37,62	41,82	41,52	41,89	40,19	40,62	42,74	49,34	47,07	37,76	33,94	36,25	40,90
17-18	13,54	15,75	13,73	11,02	9,76	11,78	14,27	15,90	10,89	6,29	5,30	9,36	11,47
18-19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19-20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20-21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21-22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22-23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23-24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	819,43	826,03	944,40	987,39	994,39	995,29	1038,09	1086,78	1094,78	1023,75	886,62	856,60	962,80
Average	34,14	34,42	39,35	41,14	41,43	41,47	43,25	45,28	45,62	42,66	36,94	35,69	40,12

Gambar 6. Daya yang dihasilkan PV dalam setahun (per jam)



Gambar 7. Daya yang dihasilkan PV dan Beban Harian

Pada Gambar 6, terlihat besarnya rata – rata daya yang dibangkitkan setiap jamnya dalam setahun. Nilai ini kemudian dibandingkan dengan beban harian PT. RST, seperti terlihat pada Gambar 7. Gambar 7 menunjukkan bahwa daya yang dihasilkan PV dapat memenuhi kebutuhan beban dari jam 8 pagi hingga jam 3 sore. Setelah jam 3 sore, PV tidak lagi memiliki daya keluaran yang cukup untuk memenuhi kebutuhan beban. Hal ini mengindikasikan bahwa sebelum jam 8 pagi dan setelah jam 3 sore, kebutuhan beban akan dipasok oleh PLN. Pada rentang waktu sekitar jam 8 pagi hingga jam 3 sore ada kelebihan daya yang dihasilkan. Kelebihan daya ini dapat diekspor ke PLN. Perkiraan rata-rata energi yang dapat dihasilkan oleh PV sebesar 987,38 kWh/hari, sedangkan total energi yang dibutuhkan sebesar 1850 kWh/hari. Hal ini menunjukkan bahwa PV dapat memenuhi 40-50% kebutuhan beban per hari.

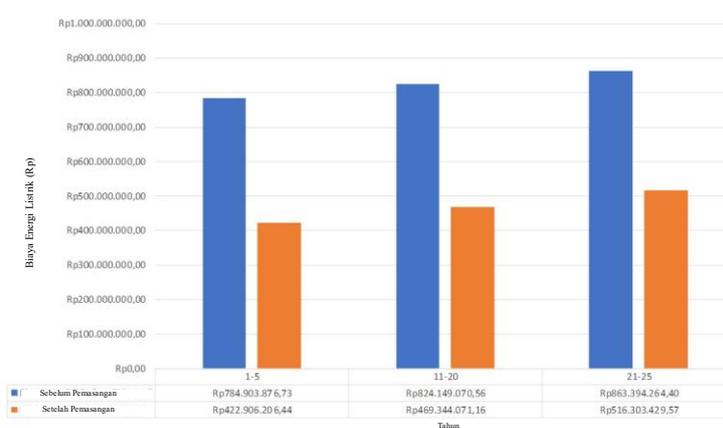
C. Analisis aspek ekonomi

Terdapat dua komponen utama yang digunakan pada sistem PV on-grid ini, yaitu modul PV dan inverter. Biaya satuan modul PV yang digunakan dalam penelitian ini adalah Rp. 3.674.565 dengan masa pakai selama 25 tahun. Selain itu, setiap tahunnya dibutuhkan biaya perawatan sebesar Rp. 42.955.398. Sedangkan untuk inverter, biaya satuannya adalah Rp. 97.322.326 dengan masa pakai 15 tahun. Dengan demikian, biaya modal sistem PV on-grid yang diusulkan dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Biaya Modal Sistem PV

Komponen	Harga Satuan	Jumlah	Total Biaya
Modul PV	Rp.3.674.565	624	Rp.2.292.928.560
Inverter	Rp. 97.322.326	2	Rp.194.644.652
Total Biaya Komponen Utama			Rp.2.487.573.212
Biaya Tambahan			
Biaya Jasa Instalasi			Rp.9.987.130
Mounting Bracket			Rp.205.888.020
Total Biaya Investasi			Rp. 2.703.448.362

Besarnya penghematan biaya energi listrik dilakukan dengan membandingkan biaya energi sebelum dan setelah pemasangan sistem PV on-grid pada objek penelitian. Perhitungan biaya energi didasarkan pada tarif listrik PLN untuk Golongan Tarif B3/240 kVA, yaitu sebesar Rp.1035,78 untuk LWBP dan Rp.1556,78 untuk WBP. Perbandingan biaya energi listrik akan dianalisa selama 25 tahun, dengan asumsi kenaikan biaya listrik sebesar 5% setiap sepuluh tahun. Perbandingan biaya energi sebelum dan setelah pemasangan sistem PV on-grid dapat dilihat pada gambar 8.



Gambar 8. Perbandingan biaya energi sebelum dan setelah pemasangan sistem PV on-grid

Tabel 3. Penghematan dari pemasangan sistem PV on-grid

Tahun ke-	Penghematan [Rp./year]	Penghematan [%]
1-10	Rp.361.997.670,29	46,12
11-20	Rp.354.804.999,40	43,05
21-25	Rp.347.090.834,83	40,20

Tabel 3 menunjukkan bahwa dalam sepuluh tahun pertama, biaya energi listrik dapat menurun sekitar 46,12% dari Rp.784.903.876,73 menjadi Rp.422.906.206,44. Namun demikian, terlihat pula pada setiap periode sepuluh tahun terdapat sedikit penurunan penghematan sekitar 3%. Hal ini terjadi karena tingkat degradasi PV yang menurun sebesar 0,6% setiap tahunnya. Alasan lain dari penurunan tersebut adalah peningkatan biaya listrik sebesar 5% setiap sepuluh tahun seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya. Meskipun begitu, dengan umur proyek selama 25 tahun, total penghematan biaya energi listrik yang didapatkan masih berkisar 40%.

D. Analisis tekno – ekonomi

Desain PV on-grid akan dianalisis dengan melihat desain teknis dan ekonomis dari sistem yang diusulkan. Rekapitulasi hasil analisis teknis dan ekonomis dapat dilihat pada tabel 4 dan 5.

Tabel 4. Hasil analisis teknis

Parameter Teknis	Nilai
Kapasitas sistem PV on-grid [kWp]	230,8
Area yang dibutuhkan [m ²]	1329,21
Jumlah Modul PV [Unit]	624
Jumlah Inverter [Unit]	2
Jumlah modul tiap String [Unit]	13
Sudut kemiringan modul PV [°]	9°
Jumlah energi yang dihasilkan oleh sistem PV on-grid per tahun [kWh]	351.648
Jumlah energi yang dihasilkan oleh sistem PV on-grid per hari [kWh]	987,38

Berdasarkan tabel 4 terlihat bahwa untuk menerapkan sistem PV on-grid dengan kapasitas 230,8 kWp, dibutuhkan lahan seluas 1329,21 m². Kemudian dengan kapasitas tiap modul PV sebesar 370 WP, jumlah modul yang dibutuhkan sebanyak 624 unit. Inverter yang dibutuhkan sebanyak dua unit dengan kapasitas masing – masing sebesar 110 kW. Setiap inverter akan terhubung dengan 13 string yang terdiri dari 24 modul PV per-string. Tiap modul PV akan dipasang dengan sudut kemiringan sebesar 9° menghadap ke utara. Dari desain yang diusulkan, diketahui potensi energi harian yang dihasilkan oleh sistem PV on-grid ini sebesar 987,38 kWh/hari.

Tabel 5. Hasil analisis ekonomi

Parameter Ekonomi	Nilai
Biaya Investasi Awal (Rp)	2.702.448.362,00
NPV (<i>Net Present Value</i>) (Rp)	11.431.028.110,46
LCOE (Rp)	868,29
<i>Present Worth</i> (Rp)	2.461.180.000
<i>Annual Worth</i> (Rp/tahun)	143.570.121
<i>Return on investment</i> (%)	7,1
<i>Internal rate of return</i> (%)	10,3
<i>Simple Payback</i> (tahun)	8,68
<i>Discounted Payback</i> (tahun)	10,32

Dari tabel 5 dapat dilihat bahwa biaya investasi awal sebesar Rp. 2.702.448.362.362,00, dan total NPV sebesar Rp. 11.431.028.110,46. Hasil dari LCOE PV yang didapatkan adalah sebesar Rp. 868.29. Apabila nilai ini dibandingkan dengan LCOE dari BPP, yaitu Rp. 1.207,70, maka investasi ini layak untuk dibangun, karena LCOE PV lebih rendah dari LCOE BPP. Nilai *present* dan *annual worth* yang didapat menunjukkan nilai positif. Kemudian untuk ROI dengan umur proyek 25 tahun, maka aman untuk 7,1% dari investasi awal. Selanjutnya parameter IRR yang didapat sebesar 10,3%, lebih tinggi dari *discount rate* 3,14%. Parameter ekonomi lainnya yang menunjukkan bahwa proyek ini layak adalah simple payback period sebesar 8,68 tahun dan discounted payback period sebesar 10,32 tahun. Hal ini menunjukkan bahwa biaya investasi awal dapat kembali sebelum 25 tahun.

4. SIMPULAN

Berdasarkan hasil pembahasan dan analisis, baik dari aspek teknis maupun aspek ekonomis, desain sistem PV on-grid di PT. RST, maka dapat disimpulkan bahwa sudut kemiringan pemasangan modul PV yang optimal di lahan PT.RST adalah 9° menghadap ke utara. Secara teknis, sistem PV on-grid yang dirancang membutuhkan 624 modul PV dengan kapasitas 370 Wp dan 2 unit inverter dengan total kapasitas 220 kW. Dari perhitungan yang telah dilakukan juga diketahui bahwa untuk membangun sistem ini dibutuhkan lahan

seluas 1329,21 m², dengan potensi energi yang dibangkitkan sebesar 351,648 kWh/tahun atau setara dengan 44,6% kebutuhan energi PT. RST.

Biaya investasi awal yang dibutuhkan untuk mengimplementasikan rancangan sistem PV on-grid sebesar Rp. 2.702.448.362,00 dengan LCOE Rp. 868,29. Dengan nilai parameter ekonomi yang didapatkan seperti *present worth* sebesar Rp. 2.461.180.000, *annual worth* sebesar Rp. 143.570.121, *ROI* bernilai 7,1% dan *IRR* 10,3%, maka sistem ini layak untuk diterapkan. Parameter ekonomi lainnya yang mendukung bahwa rancangan ini layak untuk diterapkan adalah *simple payback period* sebesar 8,68 tahun dan *discounted payback period* sebesar 10,32 tahun.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Kementerian ESDM, "Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik PT. PLN (Persero), tahun 2021 – 2030", Jakarta, 2021
- [2] IESR, "Indonesia Energy Transition Outlook 2021 ", Jakarta, 2021
- [3] Presidential Regulation of The Republic of Indonesia Number 98 of 2021, 2021
- [4] B. D. Siregar, B. Sudiarto and R. Setiabudy, "Economic Analysis of Renewable Energy Power Plant in Sumatra, Indonesia," 2019 IEEE International Conference on Innovative Research and Development (ICIRD), Jakarta, Indonesia, 2019, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICIRD47319.2019.9074768.
- [5] Askari Mohammad Bagher, Mirzaei Mahmoud Abadi Vahid, Mirhabibi Mohsen, "Types of solar cells and application", American Journal of optics and Photonics, vol. 3, pp. 94-113, 2015, doi: 10.11648/j.ajop.20150305.17
- [6] Rami Alawneh, Farid E. Mohamed Ghazali, Hikmat Ali, Muhammad Asif, "Assessing the contribution of water and energy efficiency in green buildings to achieve United Nations Sustainable Development Goals," Building and Environment, Vol. 146, pp. 119-132, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.09.043>.
- [7] Abdul Muhaimin Ismail, Roberto Ramirez-Iniguez, Muhammad Asif, Abu Bakar Munir, Firdaus Muhammad-Sukki, "Progress of solar photovoltaic in ASEAN countries: A review", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 48, pp. 399-412, 2015, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.010>
- [8] George Ban-Weiss, Craig Wray, Woody Delp, Peter Ly, Hashem Akbari, Ronnen Levinson, "Electricity production and cooling energy savings from installation of a building integrated photovoltaic roof on an office building", Energy Build, vol.56, pp. 210-220, 2013, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.06.032>.
- [9] Weilong Zhang, Lin Lu, Jinqing Peng, "Evaluation of potential benefits of solar photovoltaic shadings in Hong Kong", Energy, vol. 137, pp. 1152-1158, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.04.166>.
- [10] A. Kumar Behura, A. Kumar, D. Kumar Rajak, C. I. Pruncu, and L. Lamberti, "Towards better performances for a novel rooftop solar PV system," Sol. Energy, vol. 216, pp. 518-529, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.solener.2021.01.045.
- [11] Ayodele, T. R., Ogunjuyigbe, A. S. O., & Oladeji, S. "Determination of optimal tilt angles in some selected cities of Nigeria for maximum extractable solar energy". International Journal of Renewable Energy Technology, 9(4), 453-483. 2018. <https://doi.org/10.1504/IJRET.2018.095800>
- [12] Benganem, M. "Optimization of tilt angle for solar panel: Case study for Madinah. Saudi Arabia". Applied Energy, 88(4), 1427-1433, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.10.001>
- [13] Jacobson, M. Z., & Jadhav, V. "World estimates of PV optimal tilt angles and ratios of sunlight incident upon tilted and tracked PV panels relative to horizontal panels". Solar Energy, 169, 55-66, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.04.030>
- [14] Ahmad Afandi, M. Danang Birowosuto and Kiky Corneliasari Sembiring, "Energy-yield Assessment Based on the Orientations and the Inclinations of the Solar Photovoltaic Rooftop Mounted in Jakarta, Indonesia," International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology, vol. 12, no. 2, pp. 470-476, 2022. <http://dx.doi.org/10.18517/ijaseit.12.2.14812>.

- [15] Gunawan, Hero, and Budi Sudiarto. "Simulasi Perbandingan Perubahan Tilt Terhadap Energi Array Pada 34 Unit PLTS Rooftop 100 Kwp Di Indonesia." *Citizen: Jurnal Ilmiah Multidisiplin Indonesia*, vol. 2, no. 1, pp. 46-55, 2022, <https://doi.org/10.53866/jimi.v2i1.27>
- [16] A. F. Madsuha, E. A. Setiawan, N. Wibowo, M. Habiburrahman, R. Nurcahyo, and S. Sumaedi, "Mapping 30 Years of Sustainability of Solar Energy Research in Developing Countries: Indonesia Case," *Sustainability*, vol. 13, no. 20, p. 11415, Oct. 2021, doi: 10.3390/su132011415.
- [17] M. D. E. Hakim et al., "Optimum Location for PV Implementation Based on Load-flow Analysis Using Newton-Raphson Method for Lombok Electrical Network," 2019 IEEE International Conference on Innovative Research and Development (ICIRD), Jakarta, Indonesia, 2019, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICIRD47319.2019.9074728.
- [18] F. Husnayain, D. Luthfy "Analisis rancang bangun PLTS ON-Grid hibrid baterai dengan PVSYST pada kantin teknik FTUI," *ELECTRICES*, vol. 2, no. 1, pp. 21–29, Apr. 2020, doi: 10.32722/ees.v2i1.2846.
- [19] F. Miftahurrahman, Farizal and M. Dachyar, "Optimization Model of Power Generation and Load Equipment Selection for near Zero Energy Building with Rooftop PV Integrated," 2019 IEEE 6th International Conference on Engineering Technologies and Applied Sciences (ICETAS), Kuala Lumpur, Malaysia, 2019, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICETAS48360.2019.9117344.
- [20] A. N. Widyanto, M. A. K. . Adhi, F. Husnayain, A. R. Utomo, and I. M. Ardita, "Techno – Economic Analysis of Rooftop Solar Panel Uprating on Commercial Building (Casestudy on Karawang Branch Office of XYZ Company)", *Buletin Ilmiah Sarjana Teknik Elektro*, vol. 5, no. 1, pp. 86–97, Feb. 2023, <https://doi.org/10.12928/biste.v5i1.7579>
- [21] Syukri Himran, "Energi Surya : Konversi Termal & Fotovoltaik", Penerbit Andi, 2021, ISBN 978-623-01-1168-6,2019