

Peningkatan efisiensi sistem PLTS melalui optimasi susunan *array* panel surya

Muchlishah¹, Nuha Nadhiroh², Isdawimah³, Dimas Adi Nugroho⁴, Ashwin Imaduddin⁵

e-mail: nuha.nadhiroh@elektro.pnj.ac.id^{2*}

^{1,2,3,4}Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Jakarta, Indonesia (9 pt)

Informasi Artikel

Riwayat Artikel

Diterima 3 Januari 2023

Direvisi 15 April 2023

Diterbitkan 30 Oktober 2023

Kata kunci:

Array
Mutual Shading
Optimasi
Panel Surya
Topologi

Keywords:

Array
Mutual Shading
Optimization
Solar Panel
Topology

ABSTRAK

Letak geografis Indonesia sangat menguntungkan untuk pengembangan energi surya sebagai sumber energi listrik. Pembangkit listrik Tenaga Surya (PLTS) sangat cocok digunakan untuk mengatasi masalah pasokan listrik pada pulau-pulau di Indonesia. Beberapa faktor yang mempengaruhi daya luaran PLTS adalah iradiasi matahari, orientasi kemiringan modul surya, bayangan (*shading*), dan kenaikan temperatur. Bayangan merupakan masalah yang sangat penting karena dapat secara signifikan mempengaruhi efisiensi PLTS. Bayangan dapat ditimbulkan oleh pemasangan *array* modul surya dengan jarak yang tidak tepat (*mutual shading*) atau bangunan yang lebih tinggi disekitarnya. Penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan efisiensi PLTS dengan meminimalisir efek mutual shading. Metode penelitian menggunakan eksperimental dengan mengumpulkan data primer berupa peak sun hour, iradiasi matahari, dan titik lokasi pengujian untuk mendapatkan potensi daya PLTS. Data sekunder merupakan data yang diperoleh dari pustaka terkait. Tahapan selanjutnya adalah pembuatan modul PLTS off grid dengan beberapa array modul surya sebagai peralatan uji. Pengambilan data dilakukan dengan variable bebas berupa jarak antar array, posisi array, iradiasi matahari, kondisi lingkungan, sedangkan variable terikat pada penelitian ini adalah nilai efisiensi PLTS. Dari hasil pengujian variasi sudut kemiringan panel surya dan variasi jarak antar array panel surya dapat disimpulkan bahwa topologi optimal pemasangan panel surya dengan ketinggian 10 cm adalah dengan sudut kemiringan 15⁰ dan jarak antar array sebesar 20 cm.

ABSTRACT

Indonesia's geographical location is very favorable for the development of solar energy as a source of electrical energy. Solar power plants (PLTS) are very suitable to be used to overcome the problem of electricity supply on the islands in Indonesia. Several factors that affect the output power of PV mini-grid are solar irradiation, solar module tilt orientation, shading, and temperature rise. Shadow is a very important problem because it can significantly affect the efficiency of PV mini-grid. Shadows can be caused by installing an array of solar modules that are not properly spaced (*mutual shading*) or taller buildings in the vicinity. This study aims to increase the efficiency of PV mini-grid by minimizing the effect of mutual shading. The research method is experimental by collecting primary data in the form of peak sun hour, solar irradiation, and test location points to obtain the power potential of PLTS. Secondary data is data obtained from related libraries. The next stage is the manufacture of off-grid PLTS modules with several arrays of solar modules as test equipment. Data retrieval is carried out with

independent variables in the form of distance between arrays, array position, solar irradiation, environmental conditions, while the dependent variable in this study is the value of PLTS efficiency. From the results of testing variations in the angle of inclination of solar panels and variations in the distance between arrays of solar panels, it can be concluded that the optimal topology for installing solar panels with a height of 10 cm is with a slope angle of 150 and the distance between arrays is 20 cm.

Penulis Korespondensi:

Nuha Nadhiroh,
Jurusan Teknik Elektro,
Politeknik Negeri Jakarta,
Jl. Prof. Dr. G.A. Siwabessy, Kampus UI, Depok, Indonesia.
Email: nuha.nadhiroh@elektro.pnj.ac.id

1. PENDAHULUAN

Secara geografis Indonesia adalah negara dengan potensi energi matahari yang tersedia sepanjang tahun tentunya menjadi surga bagi penggunaan panel surya. Indonesia yang terletak di wilayah khatulistiwa memiliki potensi rata-rata energi surya sebesar 207 GW [1]. Namun pada kenyataannya penggunaan energi fosil masih menduduki peringkat pertama dari bauran energi di Indonesia. Berdasarkan data statistik tahun 2018 penggunaan bahan bakar fosil masih 91,45% dari total konsumsi energi di Indonesia [2]

Sesuai dengan potensi yang dimiliki Indonesia, pengembangan energi surya sebagai energi listrik sangat diperlukan. Panel surya merupakan salah satu komponen utama pada sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). Pada panel surya terjadi konversi energi surya ke energi listrik yang disebut efek fotolistrik [3]. PLTS dibangun dari koneksi seri dan paralel dari modul fotovoltaik individual untuk mencapai tegangan dan arus yang dikehendaki.

Topologi penempatan *array* yang baik sangat diperlukan, terutama jika rangkaian *array* tidak dipasang pada ketinggian yang sama. Jarak antar *array* yang berdekatan dapat menyebabkan bayangan, sementara pengaturan jarak antar rangkaian yang sangat jauh menyebabkan penggunaan lahan yang berlebihan. Bayangan yang menimpa modul surya dapat secara signifikan mempengaruhi efisiensi PLTS [4]. Bayangan dapat ditimbulkan oleh pemasangan *array* modul surya dengan jarak yang tidak tepat (*mutual shading*) atau bangunan yang lebih tinggi disekitarnya. Oleh karena itu, sangat penting dilakukan penelitian terkait desain topologi *array*.

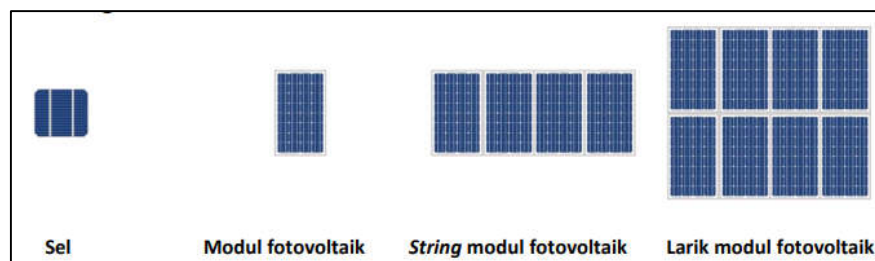
Jarak, posisi dan kondisi lingkungan dapat mempengaruhi terbentuknya bayangan pada array modul surya. Semakin besar bayangan yang terbentuk, maka daya luaran PLTS akan semakin kecil, begitu pun juga dengan nilai efisiensi PLTS yang akan menurun. Topologi array modul surya harus dirancang dengan cermat untuk menghindari terbentuknya *mutual shading* atau bayangan yang terbentuk dari bangunan yang lebih tinggi di sekitar PLTS. Kondisi lingkungan seperti percikan air, juga dapat mempengaruhi kinerja PLTS. Oleh karena itu dibutuhkan jarak ketinggian tertentu antara array surya dengan tanah/atap, sehingga nilai efisiensi PLTS dapat dioptimalkan.

Objek penelitian berupa sistem PLTS off grid yang tidak terhubung dengan sistem jala-jala. Panel surya yang diamati adalah jenis monocrystalline yang dipasang pada rangka sebagai dudukan panel, dan dapat diatur posisi serta jaraknya. Tujuan Penelitian ini untuk memperoleh efisiensi optimum panel surya dengan meminimalisir tingkat *shading* array modul surya. Pada penelitian ini akan dibuat model PLTS yang tersusun dari beberapa array modul surya.

Sel surya adalah unit *photovoltaic* (PV) kecil yang mengkonversi energi radiasi matahari menjadi listrik. Sel ini mampu mengubah sinar matahari menjadi efek fotolistrik. Efek fotolistrik terjadi ketika cahaya yang merupakan foton mengenai bahan semikonduktor dan menyebabkan elektron dari salah satu atom bahan tersebut melepaskan diri dari ikatan kimianya [5]–[7]. Oleh karena itu sel surya dinamakan juga sel fotovoltaic (*Photovoltaic cell* – disingkat PV).

Tegangan listrik yang dihasilkan oleh sebuah sel surya sangat kecil, sekitar 0,6V tanpa beban atau 0,45V dengan beban. Untuk mendapatkan tegangan listrik yang besar sesuai keinginan diperlukan beberapa sel surya yang tersusun secara seri. Jika 36 keping sel surya tersusun seri, akan menghasilkan tegangan sekitar 16V. Tegangan ini cukup untuk digunakan menyuplai aki 12V. Untuk mendapatkan tegangan keluaran yang lebih besar lagi maka diperlukan lebih banyak lagi sel surya [8]–[10].

Gabungan dari beberapa sel surya ini disebut Panel Surya atau modul surya. Susunan sekitar 10 - 20 atau lebih Panel Surya akan dapat menghasilkan arus dan tegangan tinggi yang cukup untuk kebutuhan sehari-hari [11]. Tenaga listrik yang dihasilkan oleh satu solar sel sangat kecil sehingga beberapa solar sel perlu digabungkan agar terbentuklah sebuah modul surya, susunan beberapa modul surya disebut juga dengan *array* atau larik [12], [13]. Gambar 1 menunjukkan ilustrasi sel, modul, string dan *array* modul surya.



Gambar 1. Konfigurasi Modul Surya

Kinerja sistem PLTS dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor, diantaranya: iradiasi matahari yang mudah berubah, perbedaan suhu, posisi (latitude dan longitude), konfigurasi modul, bayangan/*shading*, dan sebagainya. Sebagai salah satu ukuran performansi panel surya adalah efisiensi, yaitu rasio perubahan energi cahaya matahari menjadi energi listrik. Efisiensi dari panel surya yang sekarang diproduksi sangat bervariasi [14]. Oleh karena itu, untuk mencapai nilai efisiensi yang diharapkan, maka sangat dibutuhkan optimasi kinerja PLTS.

Produksi energi listrik PLTS sangat dipengaruhi oleh luasan modul surya dan iradiasi matahari [15]. Bayangan yang dihasilkan oleh jarak antar array yang kurang tepat atau bangunan yang lebih tinggi di sekitar PLTS dapat mempengaruhi efisiensi PLTS secara signifikan. Selain itu, pelepasan panas pada modul surya yang terkena bayangan cenderung meningkat dan dapat mengurangi umur modul surya.

2. METODE PENELITIAN

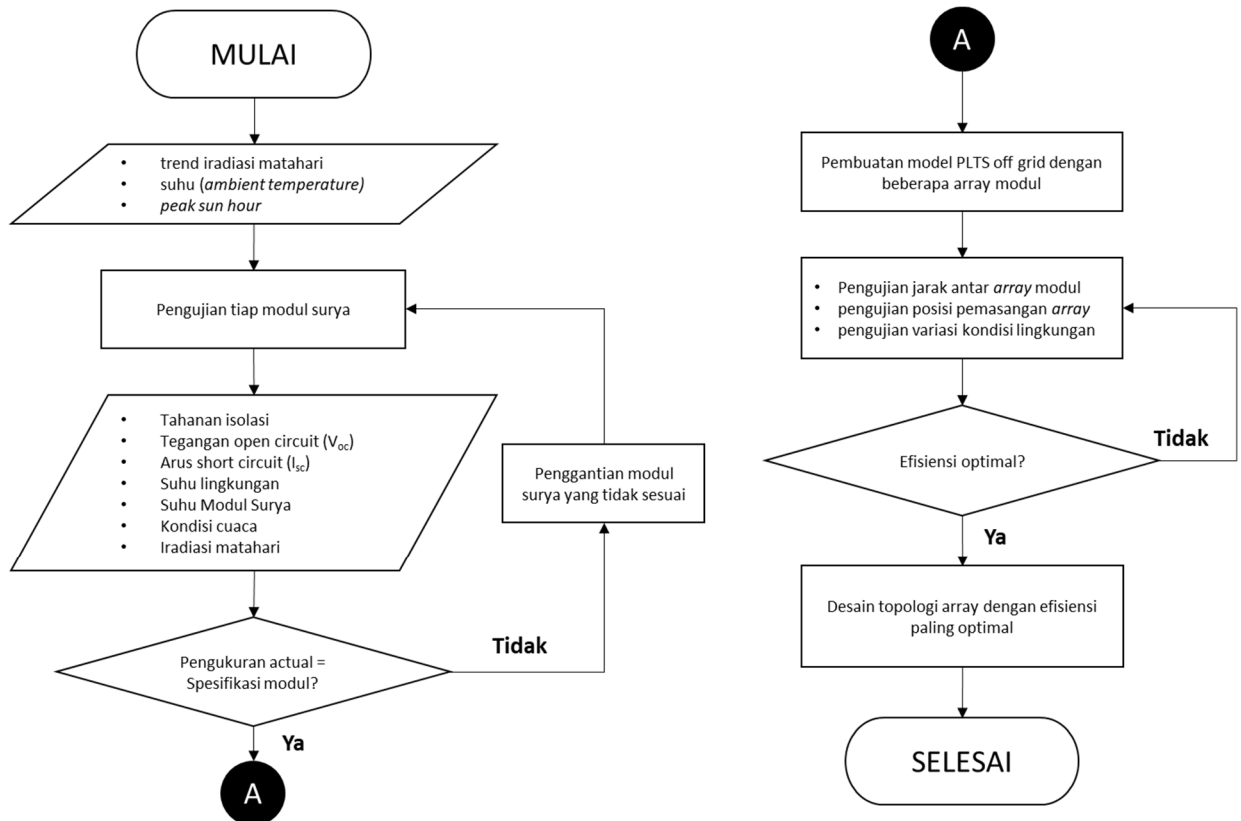
Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah metode eksperimental. Tahapan penelitian seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3, diawali dengan melakukan analisa potensi energi matahari di lokasi penelitian, yaitu lingkungan Politeknik Negeri Jakarta. Analisa potensi energi matahari dilakukan dengan pengambilan data iradiasi matahari pada pukul 09.00 – 15.00. Pengambilan data dilakukan sepanjang hari dalam periode 1 bulan untuk mengetahui potensi energi matahari pada berbagai kondisi dan cuaca. Beberapa parameter yang diamati adalah trend iradiasi matahari, suhu (*ambient temperature*), dan *peak sun hour*.

Tahap yang kedua yaitu melakukan pengujian tahanan isolasi panel surya untuk memastikan bahwa kondisi panel surya sudah baik dan siap disusun dalam bentuk *array*. Pengujian V_{oc} dan I_{sc} masing-masing panel surya juga dilakukan untuk memperoleh perbandingan antara spesifikasi dengan data aktual. Pengujian dilakukan dengan beberapa kondisi yang berbeda. Beberapa parameter lain yang diamati adalah suhu lingkungan, suhu panel surya, waktu pengukuran, cuaca, dan iradiasi matahari.

Tahap ketiga merupakan tahap pembuatan struktur modul PLTS yang tersusun dari 6x50Wp modul surya, *solar charge controller*, dan baterai. Modul surya dirangkai menjadi beberapa *array* sehingga dapat diatur topologinya.

Pada tahap selanjutnya dilakukan beberapa pengujian pada sistem PLTS yang sudah terpasang. Pengujian pertama adalah pengujian jarak antar *array* modul, pengujian kedua adalah pengujian posisi pemasangan *array*, dan pengujian ketiga adalah pengujian variasi kondisi lingkungan. Ketiga pengujian dilakukan untuk mengetahui topologi array modul surya yang dapat menghasilkan efisiensi PLTS paling optimal.

Lokasi penelitian dilakukan pada jurusan Teknik Elektro Politeknik Negeri Jakarta provinsi Jawa Barat. Lebih tepatnya pada Gedung Laboratorium dan Bengkel Teknik Listrik (Gedung I) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4. Pemilihan lokasi ini berdasarkan pengamatan, bahwa pada lapangan bulu tangkis di samping Gedung I, tidak tertutup oleh bayangan gedung maupun pohon, sehingga model PLTS yang dibuat, bebas dari bayangan yang dihasilkan bangunan di sekitarnya.



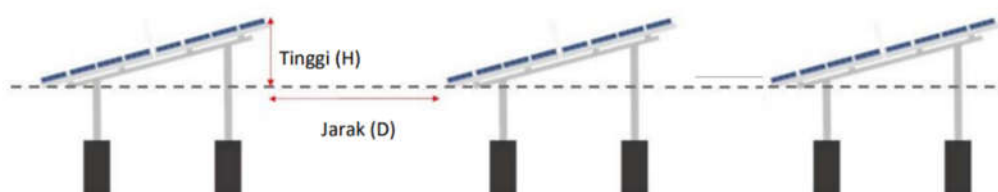
Gambar 3. Diagram Alir Tahapan Penelitian



Gambar 4. Denah tampak atas Lokasi Penelitian di Politeknik Negeri Jakarta

Model yang digunakan

Model PLTS yang digunakan pada penelitian ini adalah PLTS *off grid* dengan jenis panel berupa panel *monocrystalline*. Jenis panel ini dipilih karena memiliki efisiensi yang relatif lebih tinggi dibandingkan dengan jenis *polycrystalline*. Model PLTS tersusun dari 6x50Wp modul surya, *solar charge controller*, dan baterai. Modul surya dirangkai menjadi beberapa *array* sehingga dapat diatur topologinya. Gambar 5 menunjukkan salah satu susunan *array* modul surya. Variasi jarak (D) dan ketinggian (H) dapat dengan mudah divariasikan.



Gambar 5. Model PLTS dengan Beberapa *Array* Modul Surya

Dalam penelitian ini akan dititik beratkan pada optimasi efisiensi PLTS dengan desain topologi *array* yang paling baik dan tidak menimbulkan bayangan (*shading*). Dampak perubahan topologi dan bayangan yang ditimbulkan akan diteliti untuk mengetahui pengaruhnya terhadap nilai efisiensi PLTS. Hasil dari penelitian berupa desain topologi *array* modul surya yang menghasilkan efisiensi paling tinggi. Diagram mekanisme kerja PLTS ditunjukkan pada Gambar 6. Garis berwarna merah menunjukkan polaritas positif, sedangkan garis berwarna biru menunjukkan polaritas negatif.



Gambar 6. Mekanisme kerja Model PLTS yang dikembangkan

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

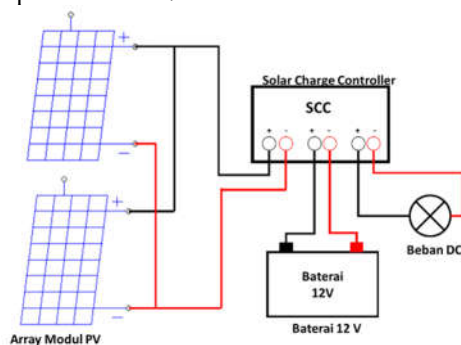
Bayangan adalah masalah yang sangat penting pada PLTS karena dapat secara signifikan mengurangi kinerja sistem. Terkena bayangan sebagian maupun secara penuh tidak hanya mengurangi produksi energi, namun juga berisiko mempengaruhi kondisi modul fotovoltaik. Ketika terkena bayangan sebagian, pelepasan panas pada sel yang terkena bayangan cenderung akan meningkat (diketahui sebagai titik panas atau hot spot) dan dapat mengurangi umur modul fotovoltaik.

Penting untuk menghitung secara akurat jarak antar rangkaian modul fotovoltaik, terutama jika rangkaian tidak dipasang pada ketinggian yang sama. Jarak yang berdekatan dapat menyebabkan bayangan, sementara pengaturan jarak antar rangkaian yang sangat jauh menyebabkan penggunaan lahan yang berlebihan. Jarak minimum antar rangkaian modul fotovoltaik yang diperlukan (D) sangat tergantung pada titik lintang lokasi, ketinggian permukaan rangkaian modul fotovoltaik (H), dan waktu, terutama di tempat dimana lintasan matahari berubah secara signifikan sepanjang tahun.

Terdapat beberapa pengujian yang dilakukan pada penelitian ini diantaranya:

- Pengujian variasi sudut kemiringan panel surya
- Pengujian variasi jarak antar array panel surya

Rangkaian pengujian ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Rangkaian Pengujian *Mutual Shading*

3.1. Hasil Pengujian variasi sudut kemiringan panel surya

Pengujian variasi sudut kemiringan panel surya bertujuan untuk mengetahui pengaruh sudut kemiringan terhadap daya luaran PLTS dan bayangan yang terbentuk. Variasi sudut kemiring dibuat pada sudut 10°, 15°, 20°, 25°, dan 30°. Jarak antar panel surya dibuat tetap pada 10 cm.

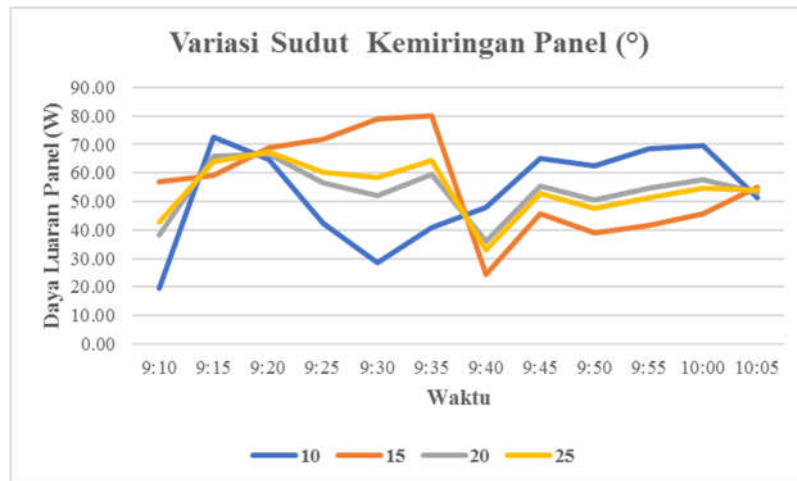
Hasil pengujian variasi sudut kemiringan panel surya ditunjukkan pada Tabel 1. dan Gambar 8.

Tabel 1. Hasil pengujian variasi sudut kemiringan panel surya

Waktu	Sudut Kemiringan Panel Surya (°)			
	10	15	20	25
9:10	19.46	56.85	38.19	42.86
9:15	72.50	59.01	65.67	63.98
9:20	64.80	68.68	66.73	67.21
9:25	42.30	71.69	56.40	60.11
9:30	28.53	78.76	52.18	58.55
9:35	40.95	79.92	59.52	64.45
9:40	47.81	24.32	35.86	32.94
9:45	65.28	45.72	55.23	52.80
9:50	62.56	39.06	50.44	47.52
9:55	68.30	41.73	54.74	51.43
10:00	69.67	45.85	57.53	54.57
10:05	51.41	55.10	53.26	53.72

Dari Tabel 1. dapat diketahui bahwa semakin tinggi nilai iradiasi matahari (W/m^2), maka akan semakin tinggi daya luaran yang dihasilkan oleh PLTS. Pada sudut 10° daya luaran tertinggi dihasilkan pada pukul 09.15, pada sudut 15° daya luaran tertinggi dihasilkan pada pukul 09.35, pada sudut 20° daya luaran tertinggi dihasilkan pada pukul 09.20, pada sudut 25° daya luaran tertinggi dihasilkan pada pukul 09.20.

Gambar 8. menunjukkan bahwa variasi sudut kemiringan panel surya mempengaruhi nilai daya luaran panel surya. Pada sudut kemiringan 15° daya luaran yang dihasilkan paling optimal dibandingkan sudut lainnya, sehingga dapat disimpulkan bahwa sudut kemiringan optimal panel surya adalah pada 15°.



Gambar 8. Grafik Variasi Sudut Kemiringan panel surya terhadap daya luaran panel

3.2. Hasil Pengujian variasi jarak antar array panel surya

Pengujian variasi jarak antar array panel surya bertujuan untuk mengetahui pengaruh jarak antar array terhadap daya luaran PLTS dan bayangan yang terbentuk. Variasi jarak kemiring dibuat pada jarak 10 cm, 15 cm, 20 cm, 25 cm, 30 cm. Sudut kemiringan panel surya dibuat tetap pada 15°.

Hasil pengujian variasi jarak antar array panel surya ditunjukkan pada Tabel 2. dan Gambar 9.

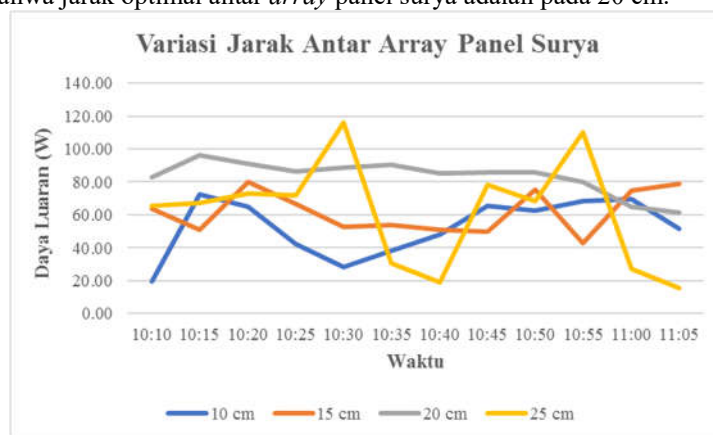
Tabel 2. Hasil jarak antar array panel surya

Waktu	Jarak antar array panel (cm)			
	10	15	20	25
10:10	19.46	63.87	82.88	65.65
10:15	72.50	51.15	96.36	67.41

Waktu	Jarak antar array panel (cm)			
	10	15	20	25
10:20	64.80	80.04	91.25	73.28
10:25	42.30	66.48	86.14	71.69
10:30	28.53	52.53	88.80	115.86
10:35	38.40	53.60	90.72	30.52
10:40	47.81	51.22	84.93	18.91
10:45	65.28	49.80	85.84	78.12
10:50	62.56	75.06	85.54	68.39
10:55	68.30	42.78	80.15	110.01
11:00	69.67	74.57	65.10	27.18
11:05	51.41	78.68	61.54	15.44

Dari Tabel 2. dapat diketahui bahwa semakin tinggi nilai iradiasi matahari (W/m^2), maka akan semakin tinggi daya luaran yang dihasilkan oleh PLTS. Pada jarak antar *array* panel surya daya luaran tertinggi dihasilkan pada pukul 10.15, pada jarak 15 cm daya luaran tertinggi dihasilkan pada pukul 10.20, pada jarak 20 cm daya luaran tertinggi dihasilkan pada pukul 10.15, pada jarak 25 cm daya luaran tertinggi dihasilkan pada pukul 10.30.

Gambar 9. menunjukkan bahwa jarak antar *array* panel surya mempengaruhi nilai daya luaran panel surya. Pada jarak 20 cm daya luaran yang dihasilkan paling optimal dibandingkan sudut lainnya, sehingga dapat disimpulkan bahwa jarak optimal antar *array* panel surya adalah pada 20 cm.



Gambar 9. Grafik Variasi Sudut Kemiringan panel surya terhadap daya luaran panel

Dari kedua pengujian yang dilakukan dapat disimpulkan bahwa pada ketinggian pemasangan panel surya 10 cm, maka sudut kemiringan optimal pada 15° dan jarak antar array panel surya yang paling optimal adalah 20 cm atau dua kali ketinggian pemasangan panel surya.

4. KESIMPULAN

Kesimpulan dari penelitian yang telah dilakukan bahwa Pengambilan data dilakukan dengan variable bebas berupa jarak antar array, posisi array, iradiasi matahari, kondisi lingkungan, sedangkan variable terikat pada penelitian ini adalah nilai efisiensi PLTS. Dari hasil pengujian variasi sudut kemiringan panel surya dan variasi jarak antar array panel surya dapat disimpulkan bahwa topologi optimal pemasangan panel surya dengan ketinggian 10 cm adalah dengan sudut kemiringan 15° dan jarak antar array sebesar 20 cm.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] IESR (2021), "Beyond 207 Gigawatts : Unleashing Indonesia's Solar Potential," *Inst. Essent. Serv. Reform*, p. 38, 2021.
- [2] M. E. dan S. D. M. R. I. ESDM, "Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 50 Tahun 2017 tentang Pemanfaatan Sumber Energi Terbarukan untuk Penyedia Tenaga Listrik." Jakarta, 2017.
- [3] M. H. Radhi, "Design and Performance Analysis of Solar PV System Size 2 . 56 kWp," *2019 4th Sci. Int. Conf. Najaf*, pp. 70–73, 2019.
- [4] F. Bayrak and H. F. Oztop, "Effects of static and dynamic shading on thermodynamic and electrical performance for photovoltaic panels," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 169, p. 114900, Mar. 2020.

- [5] H. P. Bambang, J. A. F. F. Muhammad, and F. H. Ilham, “Efisiensi Penggunaan Panel Surya Sebagai Sumber Energi Alternatif,” *J. Emit.*, vol. 18, no. 1, pp. 10–14, 2014.
- [6] A. Rahardjo, Herlina, and H. Safruddin, “Optimalisasi Pemanfaatan Sel Surya Pada Bangunan Komersial Secara Terintegrasi Sebagai Bangunan Hemat Energi,” in *Prosiding Seminar Nasional Sains dan Teknologi-II*, 2009, pp. 56–65.
- [7] A. Dobos, T. Neises, and M. Wagner, “Advances in CSP Simulation Technology in the System Advisor Model,” *Energy Procedia*, vol. 49, pp. 2482–2489, 2014.
- [8] H. Assiddiq S and M. Bastomi, “Analisis Pengaruh Perubahan Temperatur Panel Terhadap Daya dan Efisiensi Keluaran Sel Surya Polycrystalline,” *Din. J. Ilm. Tek. Mesin*, vol. 11, no. 1, pp. 33–39, Dec. 2019.
- [9] I. Isdawimah, Ismujiyanto, L. Oktariza, A. Frederik, and N. Loc, “Investigation of Photovoltaic System Parameters Using LabView in Solar Irradiance Peak Condition,” in *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1364, p. 12065.
- [10] M. Qais and U. Khaled, “Evaluation of V–t characteristics caused by lightning strokes at different locations along transmission lines,” *J. King Saud Univ. - Eng. Sci.*, vol. 30, no. 2, pp. 150–160, 2018.
- [11] X. Vallvé, A. Graillot, S. Gual, and H. Colin, “Micro storage and demand side management in distributed PV grid-connected installations,” in *2007 9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation, EPQU*, 2007.
- [12] X. Tong, M. Zhong, X. Zhang, J. Deng, and Z. Zhang, “Voltage regulation strategy of AC distribution network based on distributed PV grid-connected inverter,” *J. Eng.*, vol. 2019, no. 16, pp. 2525–2528, 2019.
- [13] B. Ketola and A. Norris, “Degradation Mechanism Investigation of Extended Damp Heat Aged PV Modules,” in *26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, 2011, pp. 3523–3528.
- [14] T. Kajisa, K. Mizuhara, and K. Hara, “Novel lighter weight crystalline silicon photovoltaic module using acrylic- film as a cover sheet,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 53, no. October 2015, 2014.
- [15] D. Topić, G. Knežević, and K. Fekete, “The mathematical model for finding an optimal PV system configuration for the given installation area providing a maximal lifetime profit,” *Sol. Energy*, vol. 144, pp. 750–757, Mar. 2017.