

Peningkatan Kinerja Modul PV Kanopi dengan Optimasi Pembayangan pada Area Terbatas

Koko Friansa^{1,5} Justin Pradipta², Irsyad Nashirul Haq³, Edi Leksono⁴, Kristiawan Ariwibawa⁶

[Submission: 11-10-2021, Accepted: 03-02-2022]

Abstract—In this paper, the contribution for finding the tilt and azimuth angle, location, and shift optimum with shading analysis method using PVSyst software has been done. The PV module capacity is 20 kWp that and integrated as canopy in the crosswalk between LABTEK V and LABTEK VI, ITB campus, Bandung. Coodinate from the location of PV modules is 6,89 LS dan 107,61 LT (- 6,89 °S, 107,61 °E). Fixed tilt was used for the PV modules orientation. The buildings and trees around the PV module cause shading effect in the PV modules, therefore, to maximize PV performance additional optimization and shading analysis have to be carried out. Performance achieved tilt angle 11° and azimuth 0° with effective global irradiation 1160,1 kWh/m²/year and energy array 21,75 MWh/tahun. After tilt optimization, shift and array optimization was added for improve the PV modul performance. In the added the shift and array optimization scenarios, the effective global irradiation has improved 72 kWh/m²/year and 14,9 kWh/m²/year respectively and the energy array has improved 1,26 MWh/year and 0,25 MWh/year.

Intisari— Pada penelitian ini, berkontribusi untuk mencari sudut, lokasi, dan susunan modul PV kanopi optimum dengan metode analisis pembayangan menggunakan simulasi perangkat lunak PVSyst. Kapasitas modul PV yang digunakan sebesar 20 kWp yang diintegrasikan sebagai kanopi di jalan penyeberangan LABTEK V dan LABTEK VI kampus ITB, Bandung. Koordinat dari lokasi modul PV yang digunakan yaitu 6,89 LS dan 107,61 LT (- 6,89 °S, 107,61 °E). Tipe pemasangan PV yang digunakan yaitu tipe kemiringan tetap atau *fixed tilt*. Objek bangunan dan pohon di sekitar modul PV menyebabkan efek pembayangan di modul PV dan perlu dilakukan optimasi dan analisis pembayangan untuk menghasilkan kinerja maksimum. Optimasi pertama dilakukan yaitu optimasi sudut dengan mencari sudut kemiringan dan *azimuth* optimum untuk menghasilkan kinerja yang maksimum. Hasil yang didapat yaitu kinerja maksimum terjadi pada sudut kemiringan PV 11° dan *azimuth* 0° dengan iradiansi global efektif sebesar 1160,1 kWh/m²/tahun dan energi susunan PV sebesar 21,75 MWh/tahun. Setelah dilakukan optimasi sudut, dilakukan penambahan skenario optimasi yaitu

optimasi pergeseran dan susunan PV untuk meningkatkan kinerja modul PV. Pada penambahan skenario optimasi pergeseran dan susunan, terjadi peningkatan iradiansi global efektif yaitu berturut-turut sebesar 72 kWh/m²/tahun dan 14,9 kWh/m²/tahun dan peningkatan energi susunan PV yaitu berturut-turut sebesar 1,26 MWh/tahun dan 0,25 MWh/tahun.

Kata Kunci— PV kanopi, iradiansi global efektif, energi susunan modul PV, analisis pembayangan

I. PENDAHULUAN

Kebutuhan energi listrik di sektor bangunan meningkat secara signifikan selama beberapa dekade terakhir seiring meningkatnya jumlah populasi manusia [1]. Seiring dengan meningkatnya kebutuhan energi listrik di sektor bangunan, saat ini ilmuwan memanfaatkan energi surya dengan menggunakan perangkat panel surya atau *photovoltaic* (PV) untuk menghasilkan energi listrik [2]. PV memiliki keunggulan yaitu dapat menyesuaikan berbagai bentuk lahan, dapat diintegrasikan ke tubuh bangunan, tidak memiliki bagian mekanis bergerak dan tidak membahayakan manusia [3].

Beberapa penelitian telah dilakukan penerapan panel surya untuk kebutuhan bangunan seperti PV terpasang pada atap (*rooftop*) [4-5], dinding (*façade*) [6], terpasang pada tanah (*ground-mounted*) [7], dan PV kanopi [8-9]. PV kanopi merupakan panel surya yang fungsinya sebagai penghasil energi, dan juga sebagai pelindung manusia ketika hujan atau terik matahari saat menyeberang jalan. Penerapan panel surya sebagai kanopi membutuhkan aspek estetika pada saat pemasangannya. Aspek estetika pada panel surya tersebut dipengaruhi beberapa hal yaitu sudut kemiringan panel surya (*tilt angle*), susunan panel surya, sudut arah mata angin (*azimuth*), dan lokasi pemasangannya. Dengan adanya aspek estetika tersebut, hal ini menjadi tantangan dalam pemasangan panel surya dan menjadi pertimbangan antara aspek estetika dan kinerja energi panel surya. Untuk memudahkan pertimbangan, dapat dilakukan simulasi terlebih dahulu sebelum dilakukan implementasi sehingga terdapat beberapa opsi dan tindak lanjut.

Terdapat persamaan penentuan sudut kemiringan PV dan *azimuth* optimum [4-5], namun persamaan tersebut belum mempertimbangkan aspek pembayangan. Perangkat lunak yang dapat mensimulasikan sudut kemiringan PV dan *azimuth* optimum terhadap aspek pembayangan adalah PVSyst [10]. PVSyst memiliki basis data yang lengkap yang memiliki data-data karakteristik oleh panel surya, baterai, dan inverter yang diproduksi di dunia, bahkan dilengkapi dengan basis data cuaca yang terintegrasi dengan NASA atau Meteorologi. Terdapat penelitian untuk mencari sudut optimum *kemiringan PV* dan *azimuth* dengan PVSyst. Seperti yang dilakukan oleh

^{1, 6}, Mahasiswa, Jurusan Teknik Fisika Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesha No. 10, Bandung, 40116, INDONESIA (e-mail: koko.friansa@tse.itera.ac.id, ariwibawa@gmail.com,

^{2,3,4} Dosen, Jurusan Teknik Fisika Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesha No. 10, Bandung, 40116, INDONESIA (email: jpradipta@tf.itb.ac.id, irsyad@tf.itb.ac.id, edi@tf.itb.ac.id)

⁵ Dosen, Jurusan Teknik Sistem Energi Fakultas Teknologi Produksi dan Industri, Institut Teknologi Sumatera, Jl. Terusan Ryacudu, Lampung Selatan, 35365, Indonesia (telp: (0721) 8030188; fax: 0361-4321982; e-mail: koko.friansa@tse.itera.ac.id).



[11], penelitian yang dilakukan adalah mencari sudut optimum kemiringan PV dan *azimuth* di kawasan Alkhums-Libya. Hanya saja penelitian yang beliau lakukan menggunakan satu modul panel surya sebesar 340 W dengan rentang data kemiringan per 10°. Rentang data per 10° untuk sudut kemiringan PV memiliki rentang perbedaan daya keluaran yang besar, sehingga belum akurat. Penelitian yang dilakukan oleh [12], mencari sudut kemiringan PV dan *azimuth* optimum dengan berdasarkan pengelompokan waktu atau musim seperti waktu dalam 1 bulan, dalam 3 bulan, dalam 6 bulan dan dalam 1 tahun. Di tiap kelompok waktu tersebut memiliki sudut optimum tersendiri dan dijadikan dasar untuk penentuan sudut yang dapat dirubah di kelompok waktu tersebut. Penelitian yang dilakukan oleh [13], mencari sudut kemiringan PV optimal untuk dua musim di Maroko yaitu musim dingin dan musim panas. Penelitian yang dilakukan oleh [14], mencari daya maksimum panel surya berdasarkan kriteria sudut, efek pembayangan beserta efek multi skenario susunan seri dan paralel. Penelitian yang dilakukan oleh [15], yaitu menganalisis pengaruh sudut kemiringan PV beserta juga mencari sudut optimasi berdasarkan 3 musim. Beliau juga menganalisis terhadap pengaruh debu yang menempel pada panel surya.

Berdasarkan penelitian dari [11-15], optimasi sudut belum dilakukan dengan optimasi pembayangan seperti optimasi berdasarkan pergeseran atau perubahan susunan. Pada makalah ini, dilakukan penelitian optimasi sudut berdasarkan sudut kemiringan PV dan *azimuth*, untuk mencari energi yang dihasilkan maksimum. Penelitian ini juga dilakukan simulasi dengan berbagai skenario optimasi seperti optimasi lokasi dan optimasi susunan PV dengan menggunakan analisis pembayangan untuk meminimalkan pembayangan yang mengenai modul PV. Hasil penelitian ini dijadikan dasar pertimbangan dan keputusan untuk pemasangan PV kanopi di jalan penyeberangan Labtek V-VI kampus ITB.

II. METODE

Permasalahan yang dicari pada penelitian ini yaitu mencari sudut kemiringan PV dan sudut *azimuth* optimum serta lokasi dan susunan optimum sehingga kinerja yang dihasilkan maksimum. Metode optimasi dilakukan dengan simulasi perangkat lunak PVSyst. Alur penelitian yang dilakukan pada simulasi PVSyst ditampilkan pada Gambar 1 dan disederhanakan sebagai berikut:

1. Menentukan lokasi dan orientasi modul PV: Definisikan lokasi dan masukkan data meteorologi. Definisikan tipe pemasangan, sudut *azimuth*, dan sudut *kemiringan PV*.
2. Menentukan sistem Modul PV: Definisikan jenis panel surya, desain kelistrikan, baterai yang digunakan, jumlah beban listrik dengan mencakup waktu yang digunakan.
3. Desain model pembayangan dalam bentuk tiga dimensi (3D).
4. Lakukan simulasi dan lihat hasil kinerja PV dalam bentuk grafik dan tabel.

5. Lakukan optimasi dengan mengubah parameter-parameter untuk mencari nilai sudut optimum dan memiliki pembayangan minimum.

A. Kinerja Modul PV

Kinerja yang dihasilkan oleh modul PV [14] ditampilkan pada (1-9). Hasil keluaran susunan PV (Y_a) didefinisikan sebagai keluaran energi susunan PV (E_{DC}) berdasarkan periode tertentu (hari, bulan, tahun) dan dibagi dengan daya PV (P_{PV}) dan ditampilkan pada (1).

$$Y_a = \frac{E_{DC}}{P_{PV}} \quad (1)$$

Hasil keluaran susunan PV harian ($Y_{a,h}$) maka keluaran energi keluaran energi susunan PV harian ($E_{DC,h}$) dibagi dengan daya PV rata-rata dan ditampilkan pada (2).

$$Y_{a,h} = \frac{E_{DC,h}}{P_{PV}} \quad (2)$$

Hasil keluaran susunan PV bulanan ($Y_{a,b}$) merupakan rata-rata dari jumlah keluaran susunan PV harian dalam satu bulan dan ditampilkan pada (3).

$$Y_{a,b} = \frac{1}{N} \sum_{h=1}^N Y_{a,h} \quad (3)$$

Keluaran final susunan PV (Y_F) merupakan jumlah dari keluaran energi sistem PV dalam AC (E_{AC}) dibagi dengan daya PV pada saat kondisi tes standar (STC) dan ditampilkan pada (4). Kondisi tes standar yaitu kondisi pengujian standar PV pada saat iradiansi matahari 1000 W/m² dan suhu 25°C. Hal ini merupakan bentuk sebagai perbandingan keluaran susunan PV di berbagai kondisi dan lokasi pemasangan PV seperti lokasi pada atap, lokasi spesifik di bumi, atau berbagai kondisi musim seperti musim dingin maupun musim panas.

$$Y_F = \frac{E_{AC}}{P_{PV}} \quad (4)$$

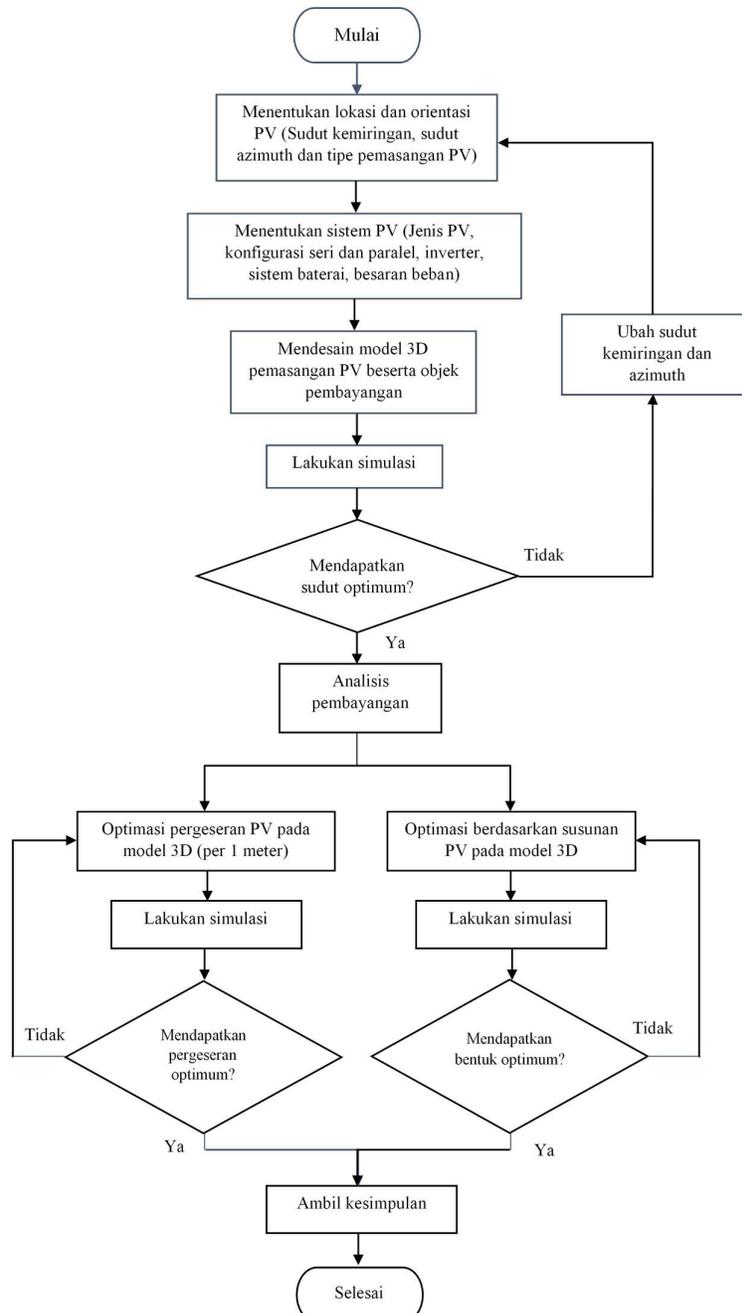
Referensi keluaran (Y_R) yaitu total iradiansi yang diterima pada panel PV (H_t) dibagi dengan iradiansi susunan panel PV referensi (1 kWh/m²) yang menyatakan sebagai puncak iradiansi pada saat terik dan ditampilkan pada (5).

$$Y_R = \frac{H_t(kWh/m^2)}{1kW/m^2} \quad (5)$$

Indeks kinerja PV yang dijadikan sebagai acuan utama berbagai referensi yaitu rasio kinerja (PR). Rasio kinerja mengindikasikan sebagai rasio jumlah total daya susunan PV dengan mempertimbangkan berbagai kehilangan daya PV berdasarkan suhu, iradiansi matahari, dan kegagalan-kegagalan sistem yang terjadi. Rasio kinerja menunjukkan seberapa dekat efisiensi sistem pembangkit PV pada kondisi ideal (η_{STC}) dengan efisiensi sistem pembangkit PV di kondisi tertentu (η_{sistem}) seperti kondisi sudut kemiringan PV, orientasi, dan kapasitas daya PV. Rasio kinerja ditampilkan pada (6).

$$PR = \frac{Y_F}{Y_R} = \frac{\eta_{sistem}}{\eta_{STC}} \quad (6)$$

Rasio kinerja PV juga dipengaruhi oleh pembayangan yang terjadi pada modul PV. Pembayangan yang terjadi pada modul



Gambar 1. Diagram alir penelitian

PV disebabkan karena insiden radiasi matahari pada modul PV terhalang oleh objek bangunan yang di sekitar modul PV [16-18]. Besar pembayangan dipengaruhi oleh sudut kemiringan PV, sudut ketinggian matahari, dan sudut deklinasi.

Ilustrasi sudut ketinggian dan deklinasi ditampilkan pada Gambar 2. Sudut ketinggian matahari merupakan sudut matahari dibandingkan dengan posisi PV ketika matahari terik atau puncak. Sudut deklinasi merupakan sudut matahari dibandingkan dengan garis ekuator bumi, Sudut deklinasi

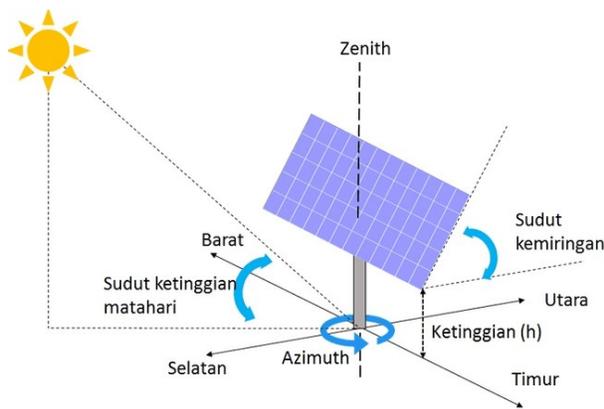


bervariasi antara $-23,45^\circ$ sampai dengan $23,45^\circ$. Sudut deklinasi 0° disebut ekuinoks (*equinox*) dan menunjukkan posisi matahari pada saat terik berada pada posisi tepat tegak lurus di bumi bagian ekuator. Ekuinoks terjadi pada tanggal 22 Maret dan 22 September. Sudut deklinasi $+23,45^\circ$ menunjukkan posisi matahari pada saat terik tepat tegak lurus di belahan bumi utara, sehingga matahari berada posisi terendah bagi yang berada di belahan bumi Selatan. Hal ini terjadi pada tanggal 22 Juni. Begitu juga sebaliknya, Sudut deklinasi $-23,45^\circ$ menunjukkan posisi matahari pada saat terik tepat tegak lurus di belahan bumi Selatan, sehingga matahari berada posisi terendah bagi yang berada di belahan bumi Utara. Hal ini terjadi pada tanggal 22 Desember.

B. Lokasi dan Orientasi Modul PV

Tahapan pertama pada simulasi sistem panel surya yaitu mendefinisikan lokasi dan memasukkan data meteorologi. Lokasi pada penelitian ini yaitu berlokasi pada jalan penyeberangan LABTEK V dan LABTEK VI ITB dengan koordinat 6,89 LS dan 107,61 LT ($-6,89^\circ\text{S}$; $107,61^\circ\text{E}$). Data meteorologi atau cuaca sangat dibutuhkan untuk mensimulasikan sistem panel surya. PVSyst memiliki data yang terintegrasi dengan meteonorm untuk mendapatkan data-data cuaca di lingkungan LABTEK VI.

Penempatan modul PV yang akan dirancang sebagai PV kanopi secara detail ditampilkan Gambar 3. Di lingkungan modul PV yang dirancang terdapat objek bangunan dan pohon, sehingga sinar matahari ke modul PV kanopi terhalangi oleh objek bangunan dan pohon tersebut. Objek bangunan dan pohon, dijadikan model untuk analisis pembayangan. Total area yang dibutuhkan modul PV untuk menghasilkan 20 kWp adalah sebesar 120 m^2 . Tipe pemasangan pada penelitian ini difokuskan pada tipe pemasangan tetap atau *fixed tilt*. Tipe *fixed tilt* merupakan tipe pemasangan dengan kemiringan tetap dengan seluruh panel surya tersusun di satu plat. Orientasi sudut kemiringan dan *azimuth* awal yang dimasukkan ke dalam simulasi yaitu 0° . Pada tahapan selanjutnya, dicari sudut optimum dengan perbedaan 1° untuk sudut kemiringan PV dan perbedaan 90° untuk sudut *azimuth*.



Gambar 2. Ilustrasi sudut ketinggian matahari, sudut kemiringan PV, dan titik balik matahari.

C. Sistem Modul PV

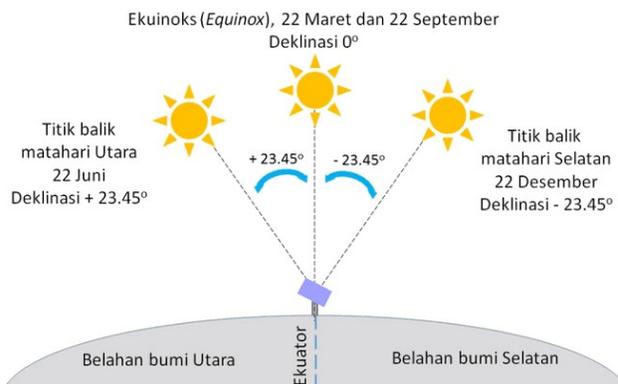
Skema sistem modul PV yang dirancang terdapat modul PV kanopi dengan kapasitas terpasang 20 kWp dengan tipe pemasangan tetap (*fixed tilt PV*). Jenis panel surya yang digunakan yaitu berjenis *polychristalline* dan karakteristiknya ditampilkan pada Tabel 1. Sistem modul PV dirancang terintegrasi pada jaringan listrik PLN (*grid connected*) untuk memberikan daya alternatif ke beban ketika listrik PLN padam. Beban yang digunakan yaitu beban listrik AC dengan total daya sebesar 500W. Beban listrik tersebut tidak boleh terputus ketika listrik PLN padam, sehingga dipasangkan baterai dengan kapasitas 80,6 kWh dan perangkat konverter cerdas yang mampu memilih daya dari PLTS atau daya dari baterai. Baterai yang digunakan merupakan berjenis Lead Acid dengan tegangan nominal 12 V dengan kapasitas 950 Ah yang terdiri dari 3 rak baterai dan setiap rak memiliki 4 buah baterai disusun seri dan disusun paralel 6 baris (Lihat Tabel 2).

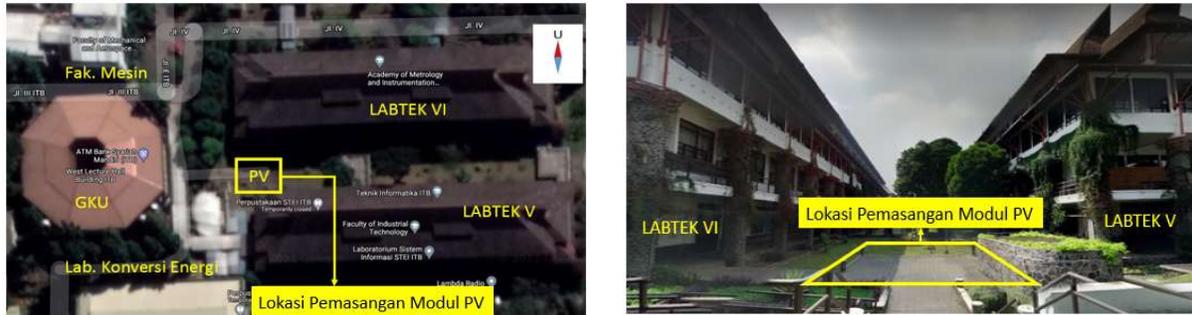
TABEL 1
SPESIFIKASI MODUL PV

Nama	Nilai
Tipe PV	Polycrystalline
Manufaktur PV	Canadian Solar
Daya maksimum	350 Wp
Tegangan operasional Optimum (Vmp)	33,8 V
Tegangan terbuka sirkuit (Voc)	51,6 V
Efisiensi modul	16,72%
Dimensi	960 x 992 x 35 mm

TABEL 2
SPESIFIKASI SISTEM PV

Nama	Nilai
Daya total modul PV	20 kWp
Jumlah modul PV	60 buah (seri 10, paralel 6)
Total area modul PV	120 m ²
Inverter	6 kW
Jumlah Inverter	3 buah
Kapasitas baterai	86,4 kWh
Tegangan nominal baterai	12 V
Jenis baterai	Lead acid
Beban sistem	500 W





Gambar 3. Lokasi pemasangan modul PV pada jalan penyebarangan gedung LABTEK V-VI ITB

D. Model Pembayangan Panel Surya

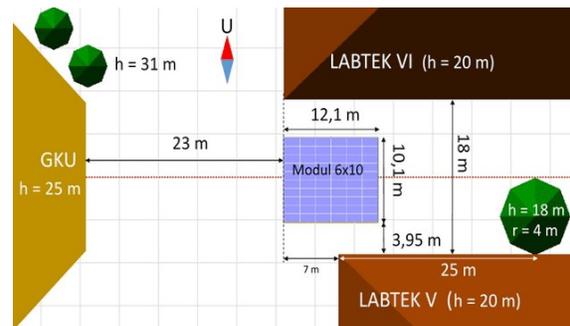
Di lingkungan sekitar PV, terdapat beberapa objek yang dapat menghalangi iradiansi matahari datang atau membuat efek pembayangan di PV. Objek tersebut berupa Bangunan LABTEK V, LABTEK VI, LAB Konversi Energi, Gedung Kuliah Umum (GKU), Gedung Fakultas Mesin, dan beberapa pohon yang membuat efek pembayangan. Objek objek tersebut harus dibuat modelnya dalam bentuk 3D (tiga dimensi) di dalam PVSyst karena sangat berpengaruh terhadap kehilangan daya PV. Keakuratan posisi, ukuran bangunan, beserta bentuk pohon menjadi tantangan dalam pembuatan model. Posisi beserta ukuran bangunan dan pohon dapat diukur melalui google maps. Model 3D yang dimasukkan pada PVSyst ditampilkan pada Gambar 4 dan 5.

E. Optimasi

Dalam penelitian ini, dilakukan optimasi untuk mencari energi keluaran maksimum. Optimasi yang dilakukan yaitu optimasi sudut kemiringan dan *azimuth* PV, serta optimasi pembayangan dengan optimasi pergeseran dan susunan modul PV.

1) *Skenario 1 (optimasi sudut)*: Pada skenario pertama yaitu dilakukan mencari sudut kemiringan dan *azimuth* PV optimum. Mencari sudut optimum tersebut dilakukan dengan memasukkan nilai sudut tertentu, kemudian disimulasikan dan dicatat hasilnya. Setelah itu dimasukkan dengan sudut berbeda dengan rentang 1° untuk sudut kemiringan PV dan rentang 90° sudut *azimuth*. Dari masing-masing nilai tersebut disimulasikan dan dicatat hasilnya. Dari hasil simulasi tersebut ditentukan sudut optimumnya dan dijadikan dasar untuk mencari optimasi selanjutnya yaitu optimasi pergeseran dan optimasi susunan PV. Sebelum melakukan simulasi optimasi sudut, pembuatan model 3D harus disesuaikan agar tidak terjadi pergeseran pada model.

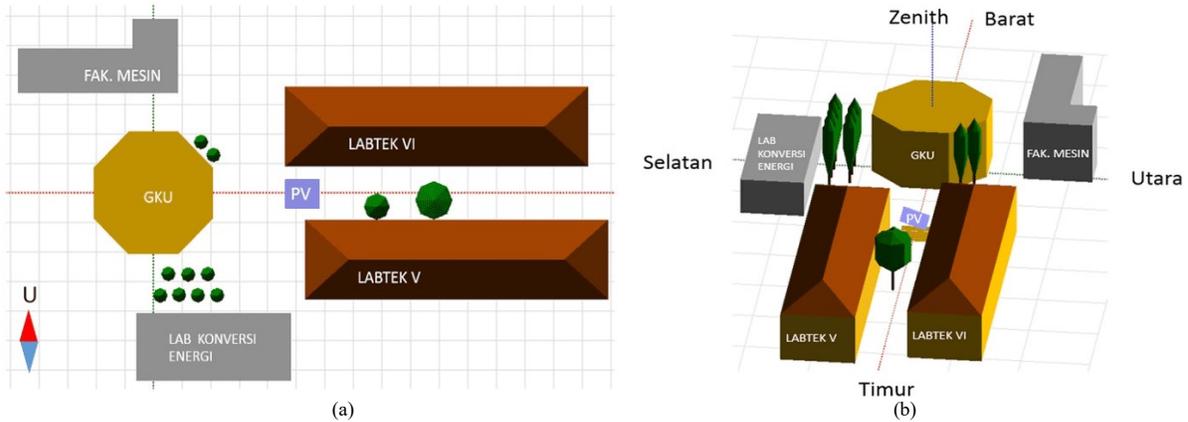
Seperti yang ditampilkan pada Tabel 2, modul PV yang digunakan sebanyak 60 buah dengan luas yang dibutuhkan yaitu 120 m^2 . Susunan PV awal yang digunakan yaitu 6×10 , yaitu modul PV dipasang sebanyak 6 kolom dan 10 baris PV. Di sekitar PV terdapat objek bangunan dan pohon yang dapat menyebabkan pembayangan. Posisi modul PV dibangun yaitu berjarak 3,95 meter dari bangunan LABTEK V dan LABTEK VI dan berjarak 23 meter dari gedung GKU. Tinggi bangunan (h) LABTEK V dan LABTEK VI yaitu sekitar 20 meter dan tinggi gedung GKU sekitar 25 meter. Selain bangunan, terdapat pohon yang dapat menyebabkan pembayangan dengan tinggi (h) sekitar 18 meter dan radius (r) sekitar 4 meter.



Gambar 4. Model pemasangan PV

2) *Skenario 2 (optimasi sudut dan pergeseran)*: Optimasi pergeseran merupakan yang dilakukan setelah ditentukan sudut optimum ditentukan seperti yang ditampilkan pada alur penelitian pada Gambar 1. Optimasi pergeseran dilakukan dengan cara modul PV dipindahkan posisinya dari posisi awal ke posisi yang optimum seperti yang ditampilkan pada Gambar 6 a. Optimasi pergeseran dilakukan untuk menghindari efek pembayangan sehingga pembayangan di posisi tertentu memiliki efek pembayangan yang minimum. Pada optimasi





Gambar 5. Lokasi pemasangan PV pada jalan penghubung Labtek V dan Labtek VI (a) tampak atas, (b) tampak penuh

pergeseran, terdapat batasan untuk melakukan pergeseran yaitu sejauh 3 meter dari posisi awal. Hal ini dikarenakan terdapat objek seperti bangunan di bagian Utara dan Selatan modul PV yaitu sejauh 3,95 meter, sedangkan di bagian Timur dan Barat terdapat taman yang tidak bisa ditutupi oleh modul PV seperti yang ditampilkan pada Gambar 3.

Skenario 3 (optimasi sudut dan susunan): Optimasi susunan merupakan perubahan susunan modul PV yang susunan awalnya adalah 6x10 menjadi 15x4, yaitu terdapat 15 kolom dan 4 baris susunan PV seperti yang ditampilkan pada Gambar 6 b. Perubahan susunan juga mengikuti batasan yaitu maksimum 3 meter dari susunan PV awal. Skenario optimasi susunan dilakukan karena mengurangi efek pembayangan dengan memperhatikan aspek estetika. Optimasi pergeseran membuat lokasi modul PV menjadi tidak simetris antara jarak modul PV dengan bangunan.

VI. HASIL DAN PEMBAHASAN

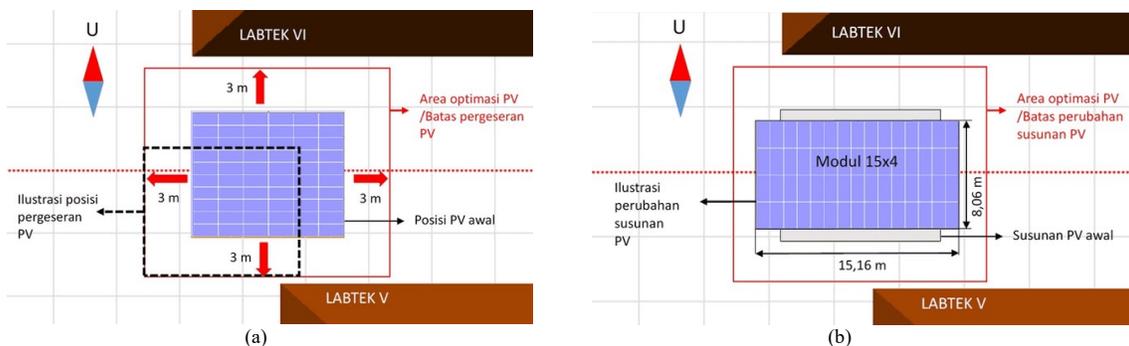
A. Optimasi Sudut

PVSyst sudah dilengkapi dengan fitur optimasi sudut dalam perangkat lunaknya [19], sehingga tidak perlu mensimulasikan

di tiap rentang tertentu. Hanya saja cara tersebut kurang akurat untuk memodelkan efek pembayangan, dikarenakan posisi modul PV yang kurang akurat. Dalam memodelkan efek pembayangan, pergeseran sedikit dari posisi PV modul membuat perubahan yang besar dari energi yang dihasilkan [20].

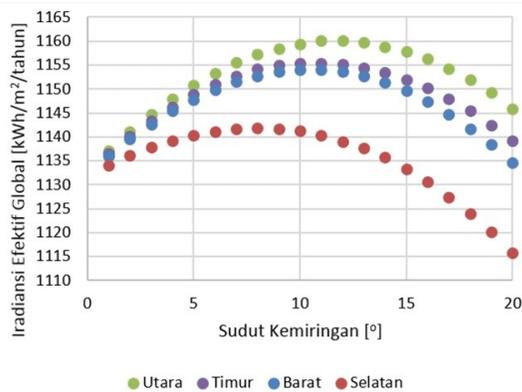
Optimasi dalam penelitian ini dilakukan dengan variasi sudut kemiringan dan *azimuth* PV, kemudian dicatat hasilnya dan ditentukan sudut optimumnya. Parameter yang dijadikan kinerja dari optimasi sudut yaitu iradiansi global efektif, seperti yang dilakukan oleh [21]. Iradiansi global efektif (*global effective irradiation*) yaitu Iradiansi matahari yang mengenai modul PV per area 1 m² setelah dikurangi dengan efek rugi-rugi optik seperti pembayangan, rugi-rugi IAM (*incident angle modifier*), dan faktor debu [22-23]. Hasil simulasi keluaran iradiansi global efektif yang diterima modul PV dari variasi sudut kemiringan dan *azimuth* PV ditampilkan pada Gambar 7.

Variasi sudut kemiringan PV yang dilakukan di antara rentang 0°-20° dengan dengan variasi 1°, sedangkan variasi sudut *azimuth* dilakukan pada rentang 90° yaitu sudut 0° sebagai utara, sudut 90° sebagai barat, sudut 180° sebagai selatan, dan sudut -90° sebagai timur. Didapatkan hasil keluaran iradiansi global efektif tertinggi pada *azimuth* 0° yaitu panel surya menghadap Utara. Hal ini disebabkan LABTEK VI berada di bawah garis khatulistiwa. Pada sudut *azimuth* 0° tersebut, telah



Gambar 6. Model detail pemasangan PV (a) optimasi pergeseran, (b) optimasi susunan

dilakukan variasi sudut kemiringan PV dan didapatkan hasil keluaran iradiansi global efektif maksimum terletak pada sudut kemiringan PV 11° yaitu sebesar 1160,1 kWh/m²/tahun.



Gambar 7. Iradiansi global efektif pada variasi sudut tilt (0° sebagai utara, sudut 90° sebagai barat, sudut 180° sebagai selatan, dan sudut -90° sebagai timur).

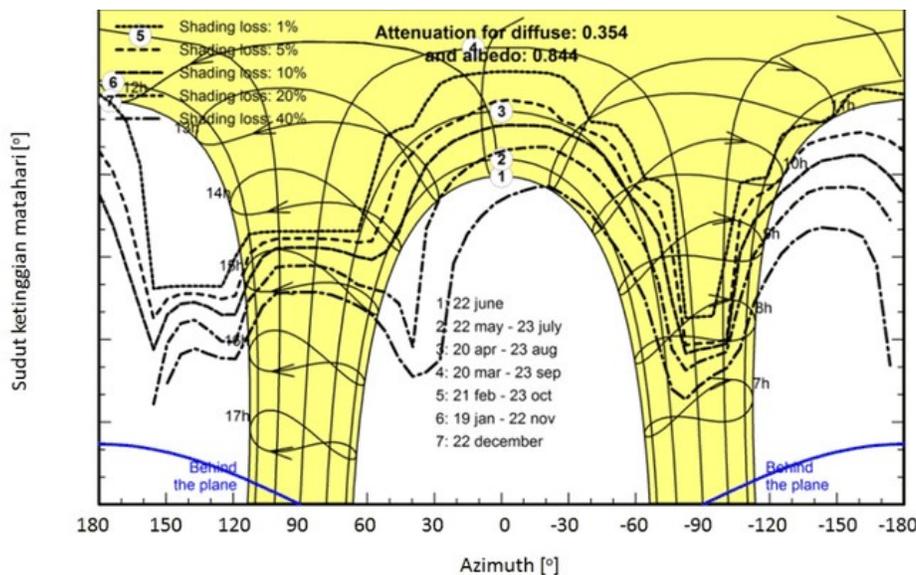
Hasil keluaran iradiansi global efektif di bawah sudut kemiringan PV 11° cenderung menurun. Sehingga keluaran iradiansi global efektif pada sudut 180° atau panel surya menghadap ke Selatan lebih cenderung menurun dan hanya memiliki sudut kemiringan PV optimum pada sudut 0°. Disebabkan karena panel surya yang menghadap ke Selatan dengan membelakangi posisi dominan matahari di lokasi modul PV dipasang.

Untuk melihat posisi dominan matahari dapat dilihat pada grafik posisi matahari seperti pada Gambar 8. Grafik posisi matahari tersebut difasilitasi oleh perangkat lunak PVsyst setelah menentukan lokasi pemasangan modul PV. Pada grafik tersebut terdapat posisi matahari ditampilkan dengan warna kuning dengan cakupan lebih banyak atau lebih lama di sekitar bagian sudut *azimuth* 0° dibandingkan dengan sudut lainnya di saat waktu terik atau di pukul jam 12:00. Di waktu terik tersebut merupakan iradiansi paling tinggi dibandingkan iradiansi di jam lainnya. Jika lokasi pemasangan modul PV berada di Utara garis khatulistiwa maka posisi optimum *azimuth* PV berada menghadap Selatan seperti yang dilakukan oleh [24].

B. Analisis Pembayaran

Dalam mendesain pembangkit listrik tenaga surya (PV), analisis pembayaran penting dilakukan untuk optimasi modul PV. Hal yang penting dalam analisis pembayaran dilakukan dengan menentukan tanggal saat sudut ketinggian matahari minimum saat terik di lokasi PV yang digunakan [16]. Sudut ketinggian matahari minimum yang digunakan sebagai acuan analisis pembayaran di Kota Bandung terletak pada tanggal 22 Juni (lihat Gambar 8). Akan tetapi pengukuran kinerja PV dilakukan kumulatif selama setahun setelah mendapatkan posisi paling minim pembayaran di tanggal 22 Juni.

Di setiap tahunnya pada tanggal 22 Juni di Kota Bandung, matahari memiliki sudut ketinggian minimum saat terik dan menciptakan pembayaran yang panjang. Pembayaran yang panjang yang diterima PV di tanggal tersebut menjadi ukuran kinerja PV. Jika dapat menghindari pembayaran di tanggal tersebut, maka PV tersebut menerima pembayaran minimum.



Gambar 8. Grafik posisi matahari berdasarkan waktu dan *azimuth* di LABTEK VI



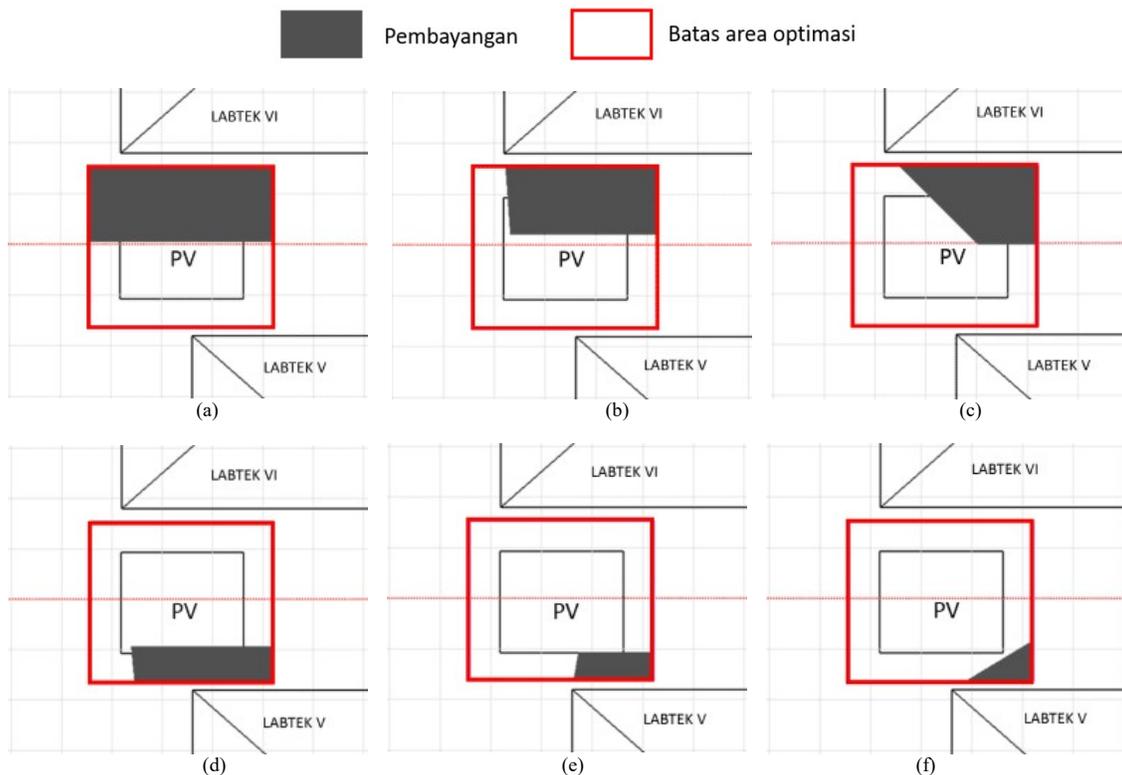
Pada perangkat lunak PVSyst, terdapat analisis pembayangan seperti yang ditampilkan pada Gambar 9. Analisis pembayangan yang dilakukan adalah mengetahui posisi pembayangan pada area PV yang ditandai dengan area warna hitam. Penentuan pengambilan waktu pembayangan yaitu pukul 10:00-14:00 Waktu Indonesia Barat (WIB) dikarenakan di waktu tersebut merupakan waktu matahari puncak (*peak hour*) [25]. Dalam penelitian ini diambil waktu per tiap 2 jam untuk analisis pembayangan yaitu pada jam 10:00, 12:00, dan 14:00 WIB. Area yang ditandai dengan PV yaitu area yang dibutuhkan modul PV, sedangkan kotak merah menunjukkan batas area PV untuk melakukan optimasi pergeseran atau perubahan susunan PV.

Pada Gambar 9 a-c, menunjukkan pembayangan yang terjadi pada saat tanggal 22 Juni. Pada Gambar 9 a, pembayangan terjadi pada jam 10:00 dan mengenai setengah luas area PV yang terpasang. Pembayangan pada tanggal 22 Juni tersebut disebabkan cahaya matahari datang terhalang oleh bangunan LABTEK VI. Pembayangan yang mengenai area PV semakin berkurang di jam selanjutnya yaitu pada pukul 12:00 dan pukul 14:00. Hal ini menunjukkan, posisi matahari yang masih rendah pada pukul 10:00 dibandingkan pada pukul 12:00. Pada pukul 12:00, sudut ketinggian matahari semakin tinggi sehingga efek pembayangan semakin mengecil (Lihat Gambar 8). Hanya saja pada pukul 14:00 pembayangan juga semakin berkurang, meskipun sudut ketinggian matahari di waktu tersebut merendah dibandingkan pada pukul 12:00.

Hal ini disebabkan karena lokasi area modul PV yang terpasang berada di ujung Gedung LABTEK VI, sehingga cahaya matahari datang dapat mengenai modul PV. Setelah pukul 14:00, sudut ketinggian matahari semakin merendah, dan menciptakan pembayangan lebih banyak dikarenakan objek di lingkungan bagian Barat modul PV seperti Gedung GKU, pohon, dan Gedung Fak. Mesin (lihat Gambar 5).

Pada Gambar 9 d-f menunjukkan pembayangan yang terjadi pada saat tanggal 22 Desember. Meskipun sudut ketinggian matahari pada tanggal 22 Desember merupakan yang tidak paling rendah, akan tetapi posisi matahari pada tanggal tersebut berada pada bagian bumi Selatan (lihat Gambar 2 dan 8). Pada bagian Selatan modul PV terdapat bangunan yang dekat dengan area PV yaitu LABTEK V. Pada tanggal tersebut, cahaya matahari datang terhalangi oleh Gedung LABTEK V dan menciptakan pembayangan panjang di modul PV. Hanya saja pembayangan yang terjadi pada tanggal 22 Desember tidak lebih panjang dibandingkan dengan pembayangan pada tanggal 22 Juni.

Mengetahui posisi pembayangan panjang yang terjadi menyebabkan dengan mudah untuk melakukan optimasi pergeseran. Meletakkan posisi area modul PV selain di wilayah pembayangan panjang terjadi mengakibatkan kinerja PV semakin meningkat. Dapat dilihat pada Gambar 9 a-c, pembayangan dominan mengenai area optimasi PV pada bagian Utara. Pada Gambar 9 d-f, pembayangan dominan di bagian Selatan, namun hanya sedikit pembayangan yang



Gambar 9. Posisi pembayangan yang terjadi pada area PV beserta area optimasi yang disimulasikan pada tanggal 22 Juni pada pukul (a) 10:00 WIB, (b) 12:00 WIB, (c) 14:00 WIB, dan pada tanggal 22 Desember pada pukul (d) 10:00 WIB, (e) 12:00 WIB, (f) 14:00 WIB.

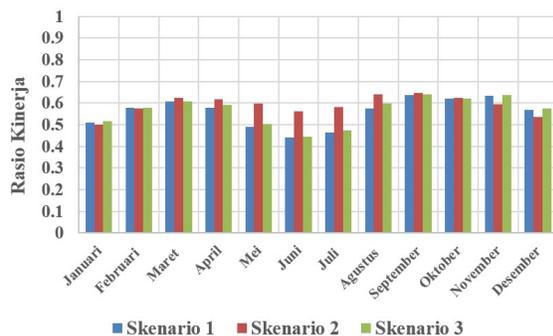
TABEL 3
KINERJA MODUL PV SETELAH DILAKUKAN OPTIMASI

Skenario Optimasi	Iradiansi global efektif (kWh/m ² /tahun)	Energi susunan PV (MWh/tahun)	Rasio Kinerja	Rugi-rugi pembayangan (%)	Iradiansi insiden (kWh/m ² /tahun)
Skenario 1 (Optimasi sudut)	1160,1	21,75	0,558	27,50	1616,2
Skenario 2 (Optimasi sudut dan pergeseran)	1232,2	23,01	0,595	23,00	1616,2
Skenario 3 (Optimasi sudut dan susunan)	1175,0	22,00	0,565	26,58	1616,2

Gedung LABTEK V dan LABTEK VI. Perubahan ini membuat peningkatan cahaya iradiansi global efektif yang diterima menjadi 1175 kWh/m²/tahun (Lihat Tabel 3) dan terjadi peningkatan sebesar 14,9 kWh/m²/tahun. Hal ini sesuai dengan analisis pembayangan bahwa dengan menghindari area dominan pembayangan yaitu area Utara modul PV membuat kinerja PV meningkat. Lain halnya optimasi susunan membuat kinerja yang dihasilkan tidak lebih tinggi dibandingkan dengan optimasi pergeseran. Hal ini disebabkan karena optimasi susunan justru menjauh ke area sedikit pembayangan.

Tabel 3 juga menampilkan hasil perbandingan kinerja modul PV setelah dilakukan skenario 1, 2, dan 3. Pada tabel tersebut, hasil menunjukkan keluaran energi susunan PV pada penambahan optimasi pergeseran dan susunan menjadi 21,75 MWh/tahun dan 22,00 MWh/tahun. Dalam hal ini terjadi peningkatan energi susunan PV pada penambahan optimasi pergeseran dan susunan berturut turut menjadi 1,26 MWh/tahun dan 0,25 MWh/tahun. Rasio kinerja yang diukur selama satu tahun dengan penambahan skenario optimasi pergeseran dan susunan terjadi peningkatan yaitu berturut turut 0,0370 dan 0,007. Rasio kinerja bulanan ditampilkan pada Gambar 11, dengan menunjukkan pada titik balik atau bulan Juni dan Desember merupakan rasio kinerja yang terendah dibandingkan rasio kinerja di bulan lainnya.

Perubahan rugi-rugi pembayangan menyebabkan perubahan iradiansi global efektif, energi susunan, dan rasio kinerja modul PV. Akan tetapi nilai iradiansi insiden bernilai sama besarnya pada ketiga skenario optimasi. Nilai iradiansi insiden sama besarnya dikarenakan setiap modul PV menerima sama besarnya Iradiansi horizontal global dengan kondisi cuaca dan kemiringan PV yang sama tanpa melibatkan aspek pembayangan [26].



Gambar 11. Rasio kinerja dalam bulanan

V. KESIMPULAN

Penelitian ini telah dilakukan optimasi sudut PV kanopi menggunakan simulasi PVSyst berdasarkan sudut kemiringan PV dan *azimuth*, untuk mencari energi maksimum. Modul PV terdiri dari 60 buah modul PV dengan total daya maksimum yaitu 20 kWp dan tipe pemasangan yang digunakan yaitu metode kemiringan tetap (*fixed tilt*). Di lingkungan sekitar modul PV terdapat objek bangunan dan pohon yang dapat menghalangi sinar matahari datang dan menghasilkan efek pembayangan pada modul PV. Pembayangan pada modul PV mengakibatkan penurunan kinerja yang dihasilkan yaitu penurunan iradiansi global efektif sebesar 456,1 kWh/m². Analisis pembayangan perlu dilakukan agar dapat meningkatkan kinerja modul PV. Optimasi tambahan juga dilakukan seperti optimasi pergeseran lokasi dan optimasi susunan modul PV setelah dilakukan optimasi sudut dan analisis pembayangan. Hasil yang didapat yaitu kinerja maksimum terjadi pada sudut kemiringan PV 11° dan *azimuth* 0° dengan iradiansi global efektif sebesar 1160,1 kWh/m²/tahun dan energi susunan PV sebesar 21,75 MWh/tahun. Pada penambahan skenario optimasi pergeseran dan susunan, terjadi peningkatan iradiansi global efektif yaitu berturut-turut sebesar 72 kWh/m²/tahun dan 14,9 kWh/m²/tahun dan terjadi peningkatan energi susunan PV yaitu berturut-turut sebesar 1,26 MWh/tahun dan 0,25 MWh/tahun. Riset selanjutnya yaitu meneliti tentang optimalisasi susunan seri dan paralel modul PV dan optimalisasi susunan inverter terhadap modul PV yang terdampak akibat pembayangan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada Institut Teknologi Bandung (ITB), Laboratorium Manajemen Energi ITB, Pusat Penelitian Energi Baru dan Terbarukan (PP EBT) ITB, dan Pusat Inovasi Kota dan Komunitas Cerdas (PIKCC) ITB yang telah mendukung penelitian ini sehingga bisa terlaksana dengan baik. Dalam penelitian ini tidak memiliki konflik terhadap kegiatan penelitian lainnya.

REFERENSI

- [1] K. Amasyali, N. M. El-Gohary, "A review of data-driven building energy consumption prediction studies," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 81, Part 1, 2018.
- [2] X. Cao, X. Dai, J. Liu, "Building energy-consumption status worldwide and the state-of-the-art technologies for zero-energy buildings during the past decade," *Energy and Buildings*, Volume 128, 2016.

- [3] E. Saretta, P. Caputo, F. Frontini, "A review study about energy renovation of building facades with BIPV in urban environment," *Sustainable Cities and Society*, Volume 44, 2019.
- [4] K. H. Merta, I. N. S. Kumara, W. G. Ariastina, "Rancangan Penempatan Modul Surya dan Simulasi PLTS Fotovoltaik Atap Gedung RSPTN Rumah Sakit Universitas Udayana." *Majalah Ilmiah Teknologi Elektro*, [S.l.], v. 18, n. 3, p. 329-336, dec. 2019.
- [5] G. Pradika, I. A. D. Giriantari, I. N. Setiawan, "Potensi Pemanfaatan Atap Tribun Stadion Kapten I Wayan Dipta Gianyar sebagai PLTS Rooftop." *Majalah Ilmiah Teknologi Elektro*, [S.l.], v. 19, n. 2, p. 225-234, dec. 2020.
- [6] R. A. Agathokleous, S. A. Kalogirou, "Status, barriers and perspectives of building integrated photovoltaic systems," *Energy*, Volume 191, 2020.
- [7] A. B. Awan, M. Alghassab, M. Zubair, A.R. Bhatti, M. Uzair, G. Abbas, "Comparative Analysis of Ground-Mounted vs. Rooftop Photovoltaic Systems Optimized for Interrow Distance between Parallel Arrays," *Energies*, 2020.
- [8] Haq, I., Pradipta, J., Sheba, M., Persada, A., Soelami, F., & Leksono, E. "Simulasi Energi dan Keekonomian Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) untuk Fungsi Peak Load Shaving pada Bangunan di Lingkungan Kampus ITB." *Journal of Science and Applicative Technology*, 2021.
- [9] S. S. Alrwashdeh, "Assessment of the energy production from PV racks based on using different Solar canopy form factors in Amman-Jordan," *International Journal of Engineering Research and Technology*, Vol. 11, 2018.
- [10] Available: www.PVSyst.com [Accessed: Mar. 3rd, 2021]
- [11] M. Jumaa, S. Adbar, "Effect of tilt Angle and Azimuth Angle on The Global Irradiance Using The PVSyst Software for Alkhums-Libya," *Alhabib Journal of Applied Sciences*, Vol. 1, Issue 1, 2020.
- [12] I B K Sugiaranta, I G M M Sunaya, I G N A D Saputra, "Optimization of tilt PV angle on-grid 300 Wp PV plant model at Bukit Jimbaran Bali." *Journal of Physics: Conference Series*. 2020.
- [13] B. Belmahdi, A. El Bouardi, "Solar Potential Assessment using PVsyst Software in the Northern Zone of Morocco," *Procedia Manufacturing*, Volume 46, 2020.
- [14] A. Mermoud, "Optimization of row-arrangement in pv systems, shading loss evaluations according to module positioning and connexions," *27th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, 2012.
- [15] A.A. Babatunde, S. Abbasoglu, M. Senol, "Analysis of the impact of dust, tilt angle and orientation on performance of PV Plants," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 90, 2018.
- [16] R. Rachchh, M. Kumar, B. Tripathi, "Solar photovoltaic system design optimization by shading analysis to maximize energy generation from limited urban area," *Energy Conversion and Management*, Volume 115, 2016.
- [17] M. H. Babikir, D. Njomo, M. Barka, M. Y. Khayal, D. Goron, V. S. Chara-Dackou, T. T. Martial, K. L. D. Romeo, Gram-shou J. P., N. S. Elie, "Modeling the Incident Solar Radiation of the City of N'Djamena (Chad) by the Capderou Method," *International Journal of Photoenergy*, 2020.
- [18] Handoko R.l., Zul Fakhri, "Optimum tilt angle and near shading analysis for 1000 watt peak photovoltaic application system," *Seminar Nasional Sains dan Teknologi*, 2018.
- [19] Y. Muñoz, O. Vargas, G. Pinilla, J. Vasquez, "Sizing and Study of the Energy Production of a Grid-tied Photovoltaic System Using PVsyst Software," *TECCIENCIA*, 2016.
- [20] A. Kaddour, L. Benmebrouk, S. A. Bekkouche, B. Benyoucef, S. Bezari and R. Khenniche, "Improvement of the Stand-Alone PV System Performance by PVSYST Software," 7th International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), 2019
- [21] J. Ranalli, R. Vitagliano, M. Notaro, D. J. Starling, "Sensitivity of shading calculations to horizon uncertainty," *Solar Energy*, Volume 144, 2017.
- [22] Simulation variables: meteo, irradiance and PV array [Online] Available: https://www.pvsyst.com/help/simulation_variables_meteo.htm. [Accessed: May. 23rd, 2021]
- [23] A. Nilsson, "Transparent solar cell techniques, from a solar Irradiance and environmental perspective," ISSN: 1654-7616, *UPTEC E17014*, 2017.
- [24] T. M. A. Pandria, Muzakir, E. Mawardi, Samsudin, Munawir, Mukhlizar, "Penentuan Sudut Kemiringan Optimum Berdasarkan Energi Keluaran Panel Surya," *Serambi Engineering*, Volume VI, No. 1, Januari 2021.
- [25] A. D. Afriyani, S. Prasetya, R. Filzi, "Analisis pengaruh posisi panel surya terhadap daya yang dihasilkan di PT Letera Bumi Nusantara," *Prosiding Seminar Nasional Teknik Mesin Politeknik Negeri Jakarta*, 2019.
- [26] M. Z. Jacobson, V. Jadhav, "World estimates of PV optimal tilt angles and ratios of sunlight incident upon tilted and tracked PV panels relative to horizontal panels," *Solar Energy*, Volume 169, 2018.



{ Halaman ini sengaja di kosongkan }