

Original Article

e-ISSN: 2581-0545 - <https://journal.itera.ac.id/index.php/jsat/>



Perancangan Sistem Pemanenan Energi Surya Terintegrasi Kaca Bangunan, Studi Kasus: Gedung Bandar Lampung ITERA

Received 30th July 2019
Accepted 18th November 2019
Published 31st December 2019

Open Access

DOI: 10.35472 /jsat.v3i2.209

Koko Friansa^{*a}, Rishal Asri^a, Monna Rozana^{a,b}, FX Nugroho Soelami^c

^a Program Studi Teknik Sistem Energi, Institut Teknologi Sumatera, Lampung Selatan, Indonesia

^b Loka Penelitian Teknologi Bersih, Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia, Bandung

^c Program Studi Teknik Fisika, Institut Teknologi Bandung

* Corresponding E-mail: koko.friansa@tse.itera.ac.id

Abstract: In this paper, design of solar energy harvesting system which integrated in building glass window was proposed. The location as the design reference is Bandar Lampung Building. Bandar Lampung Building uses 90% of the glass on the outside walls building with facing the sunrise and sunset. The design solar energy harvesting system was consisted of *Solar façade* and electronic power system. *Solar façade* using several mini PV affixed on the glass with space in between, so partially of sunlight pass into the room. The solar energy harvesting system used for DC house network and not connected to the grid system. The solar energy harvesting is also equipped with power electronic system such as MPPT, lead acid battery, and DC-DC converter. The design of solar energy harvesting system is using calculative method based on secondary data several references for this case. Area of the *Solar façade* reaches 16.32 m² for 1 office room scale. The ratio between PV and room glass about 0.35. The power average of the *Solar façade* on the glass building with facing to the sunrise is about 74.35 W with ideal power 146,13 W, and then the average power of the *Solar façade* with facing to the sunlight about 161.32 W with ideal power 396 W.

Keywords: *solar façade*, BIPV, building energy, DC house

Abstrak: Pada tulisan ini disajikan rancangan sistem pemanenan energi yang menggunakan PV terintegrasi pada kaca bangunan. Lokasi yang dijadikan sebagai acuan perancangan adalah Gedung Bandar Lampung. Gedung Bandar Lampung menggunakan 90% kaca pada dinding luar bangunan dengan menghadap matahari terbit dan matahari terbenam. Sistem pemanenan energi yang dirancang menggunakan *Solar façade* dan sistem elektronika daya. *Solar façade* menggunakan beberapa PV mini yang ditempel pada kaca dengan diberi jarak kosong antar PV sehingga sebagian cahaya masuk ke dalam ruangan. Sistem pemanenan energi surya menggunakan jaringan listrik DC dan tidak terhubung dengan sistem *grid*. Sistem pemanenan energi surya juga dilengkapi sistem elektronika daya yaitu MPPT, baterai lead acid, dan DC-DC converter. Metode yang digunakan untuk perancangan sistem pemanenan energi surya menggunakan metode kalkulatif yang berdasarkan data sekunder dari referensi-referensi yang sesuai dengan studi kasus. Luas *Solar façade* yang dirancang mencapai 16,32 m² untuk skala ruangan 1 kantor. Rasio luas antara PV dan kaca ruangan adalah 0,35. Daya rata-rata yang dihasilkan oleh *Solar façade* pada kaca bangunan menghadap matahari terbit yaitu 74,35 W dengan daya ideal adalah 146,13 W, sedangkan daya rata-rata pada *Solar façade* menghadap matahari terbenam yaitu 161,32 W dengan daya ideal 396 W.

Kata Kunci: *Solar façade*, BIPV, building energy, DC house

Pendahuluan

Bangunan saat ini dituntut untuk menjadi bangunan hemat energi. Para arsitektur, pelaku industri, dan ahli fisika bangunan bekerja sama untuk merancang bangunan yang hemat energi. Konsep bangunan hemat energi (*zero energy building*) dicetuskan karena ketersediaan energi belum mampu mengimbangi

kebutuhan energi yang semakin meningkat dan bertujuan mengurangi emisi CO₂ di lingkungan sekitar bangunan [1-2]. Sekarang ini beberapa ilmuwan memanfaatkan energi terbarukan untuk memenuhi kebutuhan energi bangunan, seperti energi angin, biomassa, dan energi surya [3]. Energi surya sangat ideal menjadi energi alternatif bangunan terutama pada





Gambar 1. Gedung Bandar Lampung menghadap matahari terbit dan terbenam

daerah khatulistiwa. Perangkat yang digunakan adalah menggunakan *photovoltaic* (PV) yang terintegrasi pada tubuh bangunan (*Building Integrated Photovoltaic* atau disingkat BIPV). BIPV cocok diterapkan sebagai alat penghasil energi alternatif pada bangunan karena tidak membahayakan manusia dan lingkungan. Selain itu BIPV juga menguntungkan karena tidak ada bagian mekanis yang bergerak, dan menggunakan sumber energi yang berkelanjutan. Selain sebagai penghasil energi, BIPV memiliki keunggulan dalam menghemat lahan instalasi karena menggunakan bagian tubuh bangunan [4].

Saat ini BIPV banyak diterapkan pada atap bangunan, karena pada atap menerima radiasi lebih besar dibandingkan dengan dinding. Jika bangunan berlantai banyak maka dinding bangunan menjadi lebih luas dibandingkan dengan atap bangunan [5]. Luasnya dinding bangunan menjadi potensi radiasi matahari yang diterima menjadi besar. Namun, banyak bangunan tinggi menggunakan dinding bangunan dilapiskan dengan kaca sehingga membuat sulit mengimplementasikan PV pada dinding bangunan. BIPV yang terpasang pada dinding kaca bangunan biasa disebut *solar façade* belum banyak diimplementasikan karena belum banyak penelitian yang dilakukan, belum ada standar yang berlaku, dan minimnya pengetahuan proses instalasi [6]. Pada dasarnya *solar façade* mengikuti kontur tubuh bangunan, sehingga *Solar façade* sangat dipengaruhi oleh sudut kemiringan, orientasi bangunan dan ventilasi [7]. Selain itu *Solar façade* sangat dipengaruhi oleh pengaruh bayangan, air hujan, debu, suhu dan kemungkinan gangguan mekanis seperti kaca pecah dan kesalahan *maintenance* pada kaca bangunan [4][8].

Bangunan yang berada pada posisi khatulistiwa menerima penceran sinar matahari yang tinggi setiap

tahunnya. Bangunan yang dirancang pada posisi khatulistiwa memiliki tantangan untuk mengurangi sinar radiasi yang masuk pada bangunan. Dinding bangunan yang menggunakan kaca bertujuan untuk mengurangi biaya energi listrik untuk pencahayaan dengan memaksimalkan cahaya matahari yang masuk. Banyaknya sinar matahari yang masuk menyebabkan kesilauan dan ruangan menjadi panas terutama pada dinding tepat menghadap matahari terbit dan matahari terbenam. Hal ini dapat diatasi menggunakan kaca film, kaca gelap, dan *solar shading*. Akan tetapi implementasi *solar façade* membuat bangunan menjadi nilai tambah sebagai penghasil energi. Selain itu *solar façade* juga mampu mengurangi kesilauan cahaya dan juga panas radiasi yang masuk ke dalam bangunan [9].

Penelitian terkait PV terintegrasi pada bangunan sudah dilakukan oleh beberapa peneliti. Seperti yang dilakukan oleh Young Tae Chae [10], beliau melakukan evaluasi kinerja pemasangan BIPV pada kaca jendela menggunakan PV transparan. Kinerja yang dievaluasi berupa daya yang dihasilkan beserta efek suhu dan pencahayaan. Namun teknologi PV transparan belum siap dikomersilkan. Penelitian yang dilakukan oleh Talal Saleem [11] berupa simulasi BIPV dengan jenis produk *solar façade* dan *solar façade*. Namun simulasi *solar façade* menggunakan PV yang ditempel penuh pada kaca. Penelitian yang dilakukan oleh N. Martin-Chivelet [12] yaitu retrofit untuk meningkatkan efisiensi energi menggunakan BIPV pada façade. PV yang digunakan adalah modul polycrystalline dan menggunakan mounting yang menempel pada dinding bangunan. Retrofit yang dilakukan yaitu produksi daya yang dihasilkan, efek suhu, dan shading. Begitu juga yang dilakukan oleh Susan [13], berupa analisis kinerja BIPV pada façade bangunan dengan membandingkan kinerja BIPV pada dinding datar dan dinding berlipat. Namun penelitian yang dilakukan oleh N. Martin-Chivelet dan Susan tidak terletak pada kaca bangunan.

Pada tulisan ini akan disajikan rancangan sistem pemanenan energi yang menggunakan PV terintegrasi pada kaca bangunan dan analisis daya maksimum yang yang mampu disalurkan dan jumlah energi yang dapat disimpan. Lokasi yang dijadikan sebagai acuan perancangan adalah Gedung Bandar Lampung (Lihat **Gambar 1**). Gedung Bandar Lampung menggunakan 90% kaca pada dinding luar bangunan. Sistem pemanenan energi yang dirancang menggunakan *Solar façade*, yaitu PV mini yang ditempel pada kaca dengan diberi jarak kosong antar PV sehingga sebagian cahaya masuk ke

dalam ruangan. Sistem pemanenan digunakan untuk peralatan listrik DC dan tidak terhubung dengan *grid*. Sistem pemanenan juga dilengkapi peralatan elektronika daya yang digunakan yaitu *maximum power point tracking* (MPPT), baterai lead acid, dan DC-DC converter. Metode yang digunakan untuk perancangan sistem pemanenan menggunakan metode kalkulatif yang berdasarkan data sekunder dari referensi-referensi yang sesuai dengan studi kasus.

Landasan Teori

a. Energi Surya

Matahari memancarkan radiasi elektromagnet yang terdiri sinar X-ray, inframerah, cahaya tampak, dan sinar ultraviolet. Sinar dari matahari terbentang pada panjang gelombang 0,275 – 4,95 μm. Radiasi matahari dapat merambat meskipun tanpa media seperti di luar angkasa. Besarnya daya yang dilepas per satuan luas dari radiasi cahaya matahari (W/m^2) diekspresikan pada persamaan Stefan-Boltzmann [14] di persamaan (1).

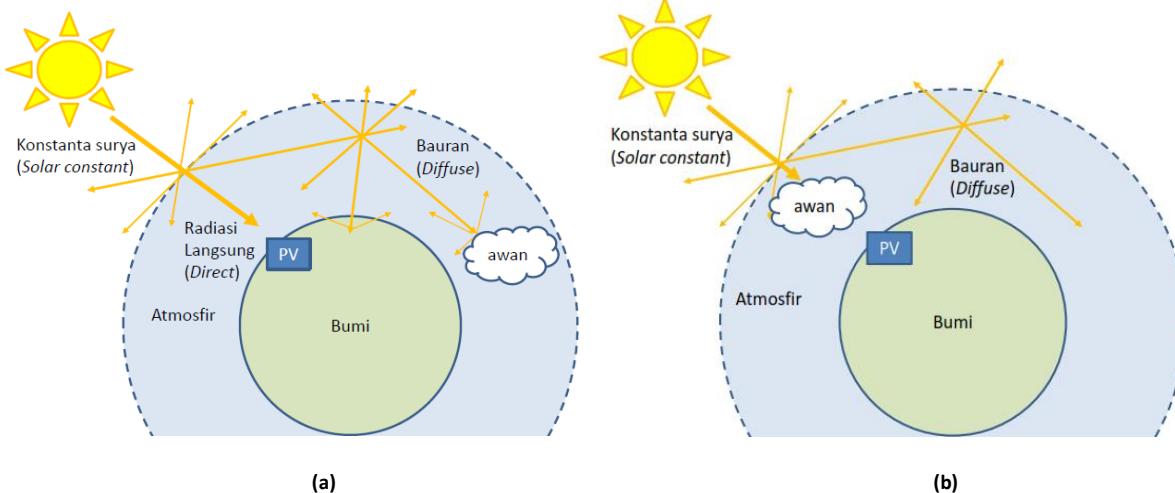
$$E = \sigma T^4 \quad (1)$$

σ adalah konstanta Stefan-Boltzmann $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ dan dengan T adalah suhu (K) permukaan permukaan matahari. Jika suhu pada permukaan matahari mencapai 5800 K, maka daya radiasi per satuan luas pada permukaan matahari mencapai $6,33 \times 10^7 \text{ W/m}^2$. Daya yang dilepas matahari per satuan luas tersebut jika objek yang diterima berada di luar atmosfir maka disebut konstanta surya (*solar constant*). Nilai konstanta surya tersebut cenderung konstan atau stabil, karena di luar atmosfir tidak ada material penghalang terhadap sinar

matahari yang lewat. Kemudian, secara fisis matahari berbentuk bola maka konstanta surya semakin berkurang jika jarak semakin jauh. Sejumlah penelitian terhadap konstanta surya pada permukaan luar atmosfir bumi didapatkan hasil mendekati 1353 W/m^2 [15]. Setelah memasuki atmosfir, radiasi matahari hanya 70% sampai ke permukaan bumi dan sebagian dipantulkan keluar atmosfir dan diserap oleh material-material yang ada di atmosfir. Hal ini disebabkan karena di dalam atmosfir bumi terdapat gas

gas atau material seperti oksigen, ozon, karbon dioksida, debu, dan uap air. Selain faktor material pada atmosfir, faktor cuaca, sudut dan inklinasi dari objek penerima radiasi matahari juga mengakibatkan daya radiasi yang diterima per satuan luas juga berubah. Banyaknya faktor yang mempengaruhi sinar radiasi matahari, maka diperlukan stasiun pengukuran daya radiasi matahari per satuan luas secara berkala.

Nilai radiasi per satuan luas yang diterima di dalam atmosfir bumi dilakukan dengan cara pengukuran radiasi global yang datang. Radiasi global merupakan gabungan dari radiasi matahari langsung (*solar direct*) dan radiasi matahari bauran (*solar diffuse*). Radiasi matahari bauran merupakan sinar pantulan-pantulan pada atmosfir bumi yang disebabkan oleh material atmosfir. Sedangkan radiasi langsung merupakan radiasi yang datang tanpa dipengaruhi oleh radiasi bauran (Lihat **Gambar 2.a**). Sehingga jika radiasi matahari langsung terhalang oleh awan, maka objek hanya menerima radiasi bauran (Lihat **Gambar 2.b**). Terdapat dua model anisotropik bauran langit, yang memodelkan radiasi yang diterima oleh panel dengan kemiringan tertentu [16,24]. Model tersebut ditampilkan pada persamaan (2). Hanya saja



Gambar 2. Proses radiasi masuk ke atmosfir bumi (a) PV mendapatkan sinar radiasi dari radiasi langsung dan bauran (b) Radiasi langsung dihalangi oleh awan dan PV hanya mendapatkan sinar bauran.

pada model Hay, terdapat kesulitan mengukur radiasi matahari langsung dan matahari bauran.

$$G_\beta = G_b R_B + 0.5\rho G(1 - \cos\beta) + G_d [R_B G_b / G_o + 0.5(1 - G_b/G_o)(1 + \cos\beta)] \quad (2)$$

Dimana, G_β adalah radiasi matahari total pada permukaan miring (W/m^2), G_b adalah radiasi langsung (*direct*) permukaan horizontal (W/m^2), R_B adalah rasio matahari langsung pada panel miring terhadap permukaan horizontal, G_d adalah radiasi bauran (*diffuse*) pada permukaan horizontal (W/m^2), β sudut miring dari panel terhadap permukaan tanah.

Banyaknya faktor yang disebabkan oleh bauran surya mengakibatkan sulitnya membuat model atau komputasi untuk memperhitungkan daya radiasi per satuan luas yang diterima di permukaan bumi [16]. Untuk menilai potensi radiasi matahari di daerah tertentu dapat juga dilakukan dengan pengukuran radiasi global sepanjang tahun dan dilakukan rata-rata hasil pengukuran. Pengukuran radiasi global dapat menggunakan solar power meter dengan satuan W/m^2 dan diukur selama satu tahun. Hasil rata-rata pengukuran radiasi per satuan luas sepanjang tahun diistilahkan faktor surya (*solar factor*). Di Indonesia, faktor surya telah ditetapkan pada Badan Standar Nasional Indonesia (Lihat **Tabel 1**). Pada **Tabel 1**, data yang ditampilkan hanya faktor surya pada bidang vertikal saja, karena topik penelitian pada makalah ini merupakan potensi radiasi matahari bidang vertikal.

b. Sel Surya

Sel surya merupakan material semikonduktor berupa material tipe p dan n yang akan mengubah energi surya menjadi energi listrik. Terkadang sel surya juga disebut *photovoltaic* (PV). Efisiensi energi yang diubah pada PV hanya berkisar 13-19% [13]. Jika beban listrik yang digunakan membutuhkan daya yang besar, maka PV dipasang seri dan parallel dan membutuhkan lahan tambahan untuk memenuhi daya listrik beban. Terbatasnya lahan untuk pemasangan PV, beberapa peneliti sedang mengintegrasikan PV pada tubuh bangunan untuk mengoptimalkan lahan sebagai penghasil listrik [18]. Sel surya biasanya menghasilkan tegangan 0,5-1 V, dan dapat dipasang secara seri untuk meningkatkan tegangan keluaran dan dipasang paralel untuk meningkatkan arus keluaran. Arus keluaran yang dihasilkan dari PV [19] ditampilkan pada persamaan (3).

$$I_o = n_p I_{ph} - n_p I_{rs} \left[\exp \left(\frac{qV_o}{kT A_n s} \right) - 1 \right] \quad (3)$$

Tabel 1. Faktor surya vertikal untuk berbagai orientasi [17]

Orientasi	Faktor Surya (W/m^2)
Utara	130
Timur Laut	113
Timur	112
Tenggara	97
Selatan	97
Barat Daya	176
Barat	243
Barat Laut	211

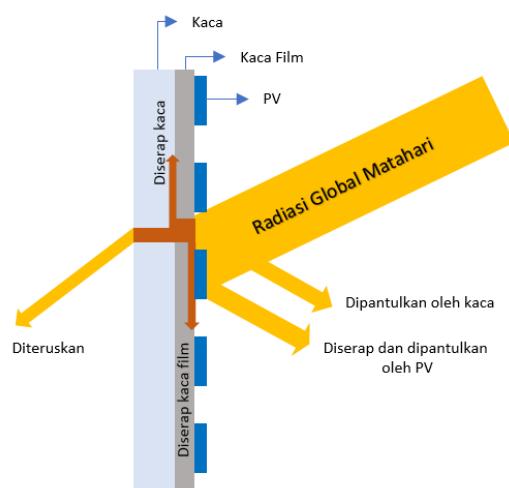
I_o merupakan arus keluaran dari jajaran PV (A). V_o merupakan tegangan keluaran dari jajaran PV (V). n_s adalah jumlah PV yang terhubung secara seri. n_p merupakan jumlah barisan PV yang terhubung parallel. q adalah charge sebuah electron. k adalah konstanta Boltzmann. A merupakan faktor ideal *p-n junction*. T adalah suhu PV (K). I_{rs} adalah arus saturasi balik sel. Arus keluaran PV dipengaruhi oleh arus photocurrent I_{ph} (A) yang dipengaruhi oleh daya radiasi matahari yang datang per satuan luas P_{cahaya} (W/m^2) seperti ditampilkan pada persamaan (4).

$$I_{ph} = [I_{scr} + k_i(T - T_r)] \frac{P_{cahaya}}{1000} \quad (4)$$

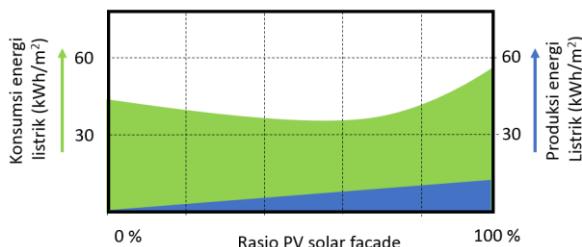
I_{scr} adalah arus hubungan pendek saat suhu referensi. k_i adalah koefisien arus hubungan pendek. T_r merupakan suhu referensi sel. Setelah didapatkan total arus keluaran dari PV, maka daya (W) yang dihasilkan oleh PV ditampilkan pada persamaan (5).

$$P = V_o I_o \quad (5)$$

Berdasarkan persamaan (5) tersebut arus dan tegangan keluaran bersifat berbanding terbalik. Jika arus yang dihasilkan PV adalah arus hubungan pendek maka tegangan PV menjadi nol. Sehingga apabila tegangan PV mendekati nol maka daya keluaran PV akan mendekati nol. Dalam hal ini dibutuhkan daya keluaran PV adalah maksimum. Untuk menghasilkan daya yang maksimum P_{max} diperlukan pengaturan arus optimum I_{mpp} , dan tegangan optimum V_{mpp} seperti ditampilkan pada persamaan (6). Sehingga efisiensi daya yang dihasilkan oleh PV direferensikan pada saat PV menghasilkan daya maksimum (lihat persamaan (7)). Dengan A_{pv} merupakan luas area PV dalam 1 m^2 .



Gambar 3. Ilustrasi solar façade pada kaca bangunan



Gambar 4. Ilustrasi hubungan rasio PV solar façade dengan konsumsi dan produksi energi listrik pada sudut kemiringan 90°.

$$P_{max} = V_{mpp} I_{mpp} \quad (6)$$

$$\eta_{pv} = \frac{P_{max}}{A_{pv} P_{cahaya}} \quad (7)$$

Selain faktor material PV, faktor lain yang mempengaruhi efisiensi daya pada PV yaitu faktor kualitas sistem PV η_{sistem_pv} yang meliputi kualitas modul, kesalahan instalasi, suhu, dan kotoran yang menempel pada PV. Nilai efisiensi yang dihasilkan berturut-turut 0,97; 0,99; 0,95; 0,98 [20].

c. Solar Façade

Solar façade merupakan sebuah sistem PV terintegrasi pada kaca bangunan dan memanfaatkan energi surya menjadi energi listrik. Selain dari menghasilkan listrik, solar façade juga melindungi tubuh bangunan dari silau dan panas matahari. Desain sistem PV terintegrasi pada kaca mengikuti dengan estetika dari bangunan. Terdapat banyak desain-desain solar façade yang sudah dilakukan oleh beberapa peneliti [18, 26].

Ilustrasi radiasi matahari yang masuk ke dalam ruangan ditampilkan pada **Gambar (3)**. Pada umumnya bangunan terdapat penghalang (*shading*) atau kaca film yang berfungsi sebagai mengurangi radiasi matahari yang masuk. Penghalang tersebut dapat digantikan oleh PV yang secara tidak langsung menghalangi radiasi matahari yang masuk ke dalam ruangan bangunan.

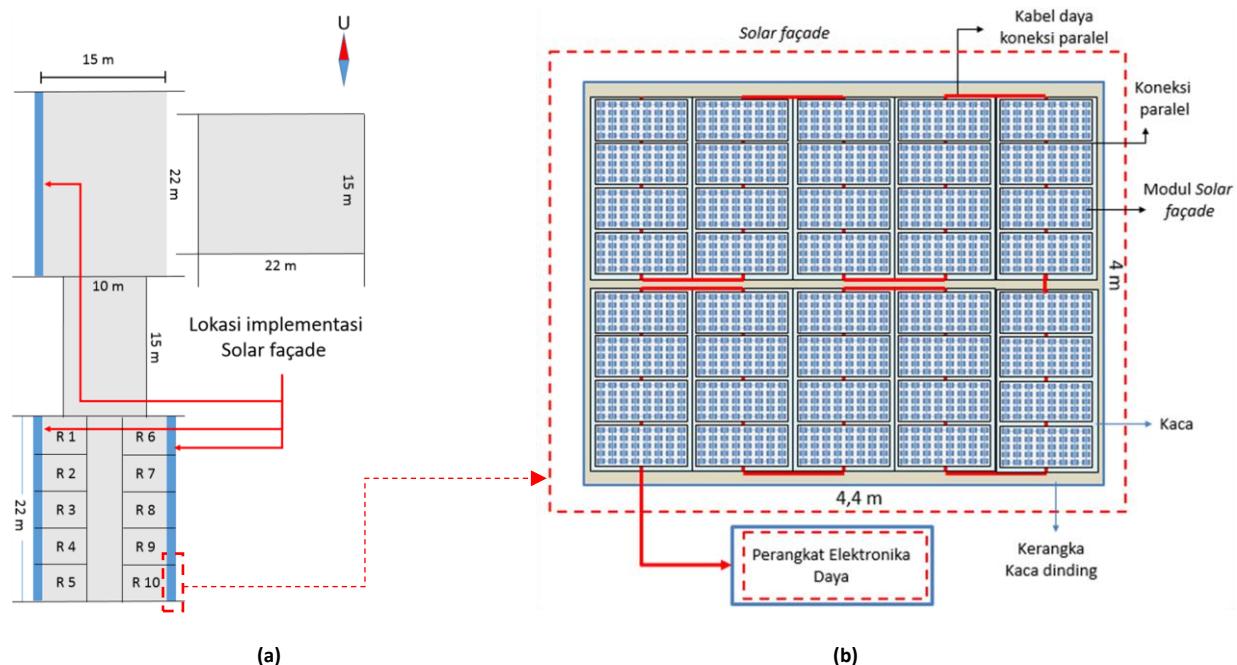
Jumlah radiasi matahari yang masuk ke dalam ruangan disebabkan oleh rasio solar PV-façade, faktor penghalang kaca film, dan faktor penghalang kaca. Rasio solar PV-façade (R_{pf}) merupakan perbandingan luas PV yang ditempel pada kaca bangunan (A_{pv}) dibandingkan dengan luas kaca bangunan (A_{kaca}) dan ditampilkan pada persamaan (8).

$$R_R = \frac{A_{pv}}{A_{kaca}} \quad (8)$$

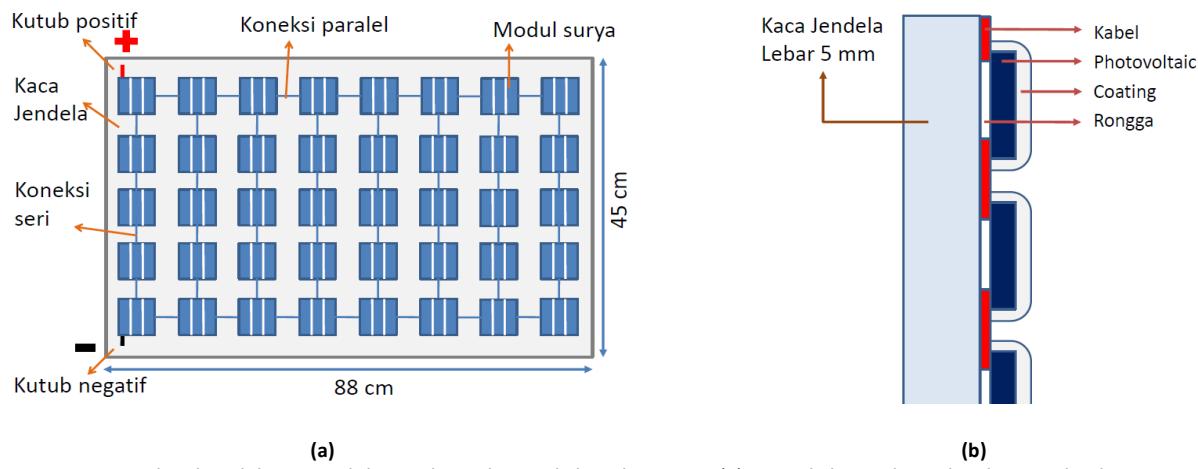
PV akan menghasilkan listrik berdasarkan jumlah total radiasi matahari yang menyentuh pada panelnya. Artinya, semakin luas PV yang terpasang, maka semakin besar energi listrik yang dihasilkan. Hanya saja cahaya matahari semakin sedikit yang masuk ke dalam ruangan dan menyebabkan kebutuhan energi listrik untuk pencahayaan menjadi meningkat. Jika luas PV yang terpasang pada kaca bangunan semakin kecil, dalam hal ini faktor penghalang radiasi matahari semakin kecil, mengakibatkan kebutuhan energi untuk mendinginkan ruangan menjadi meningkat. Ilustrasi grafik hubungan luas PV yang ditempel pada kaca bangunan (rasio PV solar façade) ditampilkan pada **Gambar 4**. Grafik tersebut merupakan modifikasi ulang dari hasil penelitian [18,25].

Metode Perancangan Sistem Pemanenan Energi Surya

Metode dalam makalah ini adalah berupa simulasi dengan model-model dan data-data yang didapatkan dari literatur. Sistem pemanenan energi surya yang dirancang, terdiri dari *Solar façade* dan perangkat elektronika daya dan kemudian daya tersebut disalurkan ke beban perangkat listrik yang ada di ruangan gedung Bandar Lampung (Lihat **Gambar 5**). Energi listrik yang dihasilkan dari *solar façade* belum bisa dipakai langsung untuk kebutuhan perlengkapan elektronik sehari-hari, sehingga dibutuhkan perangkat elektronika daya. Keluaran dari sistem pemanenan energi surya digunakan



Gambar 5. Rancangan sistem pemanenan energi surya (a) tampak atas gedung Bandar Lampung yang dijadikan lokasi implementasi solar façade (b) tampak samping kaca bangunan terintegrasi dengan PV (solar façade)



Gambar 6. Rancangan solar glass dalam 1 modul yang digunakan pada kaca bangunan (a) tampak depan dari solar glass, terdiri dari PV mini dipasang secara seri 5 buah dan parallel 8 baris (b) tampak samping solar glass yang ditempel pada bagian luar kaca.

untuk beban DC dalam satu ruangan dengan profil beban ditampilkan di **Tabel 2**.

Tabel 2. Profil beban pada satu ruangan Gedung Bandar Lampung.

No	Nama Perangkat	Daya (watt)	Unit	Waktu (h)	Energi (Wh)
1	Telepon Genggam	10	5	8	400
2	Laptop	90	5	8	3600
3	Kipas DC	80	1	4	320
	Total	180			4320

a. Perancangan Solar façade

Sistem pemanenan energi surya yang dirancang merupakan konsep berdiri sendiri dan tidak bergabung dengan sistem *grid* atau *stand alone*. Sistem pemanenan energi surya menggunakan solar façade. Sistem *Solar façade* yaitu terdiri dari PV mini yang disusun secara seri dan paralel dan ditempel pada kaca jendela bangunan dengan diberi jarak kosong antar PV. Jenis PV yang digunakan adalah berjenis polycrystalline yang sudah

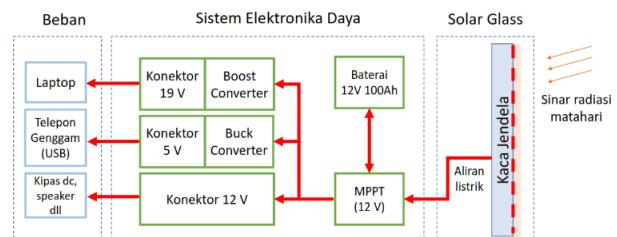
diberi *coating* di atasnya. Kaca dinding bangunan yang akan digunakan dibatasi dalam skala 1 ruangan kantor pada Gedung Bandar Lampung yaitu seluas 17,6 m². Dalam 1 modul *Solar façade* terdiri dari 40 buah PV dengan luas 1 modul adalah 0,396 m² (Lihat **Gambar 6**). Sehingga dalam 1 kaca jendela dapat dipasang sekitar 40 modul. Luas 1 PV adalah 0,00385 m², sehingga luas PV secara keseluruhan dalam 1 kaca dinding ruang kantor gedung Bandar Lampung adalah 6,16 m². Jika dibandingkan dengan luas kaca dinding adalah 17,6 m², rasio perbandingan luas kaca dinding 1 ruangan dengan luas PV total adalah 0,35. Rasio optimal yang menghasilkan energi listrik dan konsumsi energi listrik pada ruangan optimal perlu dilakukan kajian yang lebih lanjut [10,27].

Dalam makalah ini, 1 modul *Solar façade* dipasang secara seri PV 5 buah dan paralel 8 baris. 1 PV terdiri dari 4,5 V dan 0,6 W sehingga dalam 1 modul dapat menghasilkan 22,5 V dan 4,8 W. Sistem pemanenan energi surya berencana mengikuti kaca bangunan Gedung Bandar Lampung dan diilustrasikan pemasangan secara keseluruhan pada 1 ruangan seperti pada **Gambar 6**. *Solar façade* dipasang secara berjajar di kaca, kemudian dihubungkan kabel secara paralel sebagai penghantar arus listrik. Setelah itu *Solar façade* dihubungkan ke perangkat sistem elektronika daya sebagai pengatur daya sehingga dapat digunakan oleh pengguna.

b. Perancangan Sistem Elektronika Daya

Sistem pemanenan energi surya secara keseluruhan ditampilkan pada **Gambar 7**. *Solar façade* terhubung secara paralel dengan perangkat elektronika daya untuk menyesuaikan tegangan dengan pada beban. Jenis beban yang digunakan adalah beban DC. Beban DC memiliki kriteria tegangan suplai yang berbeda-beda. Tegangan suplai untuk laptop sebesar 19 V, untuk telepon genggam sebesar 5 V, dan beberapa perangkat elektronika memiliki tegangan 12 V. Sistem elektronika daya terdiri dari MPPT, sistem baterai, DC-DC converter dan juga terdapat konektor penghubung beban.

MPPT berfungsi untuk menghasilkan daya maksimum dari PV. Tegangan keluaran dari MPPT merupakan tegangan konstan sebesar 12 V. MPPT dihubungkan secara paralel dengan baterai dan konektor. Konektor tersebut memiliki kriteria tegangan suplai yang berbeda-beda. Dalam hal ini terdapat 3 jenis kriteria tegangan suplai pada konektor yaitu 5 V, 12 V, dan 19 V. Karena tegangan keluaran dari MPPT hanya tegangan 12 V, maka untuk memenuhi tegangan suplai beban yang berbeda seperti tegangan 5 V dan 19 V dilengkapi



Gambar 7. Rancangan rangkaian elektronika daya sistem pemanenan energi surya.

Tabel 3. Nilai efisiensi *Solar façade* dan perangkat elektronika daya.

Nama Perangkat	Efisiensi
PV (Polycrystalline) [14] (η_{pv})	0,13
Kualitas modul	0,97
Sistem PV [20] (η_{sistem_pv})	0,99
Kesalahan instalasi	0,99
Suhu	0,95
Debu dan kotoran	0,98
MPPT [21] (η_{mppt})	0,89
Baterai [22] (η_{batt})	0,85
DC-DC converter [23] (η_{conv})	0,75
Total	0,06

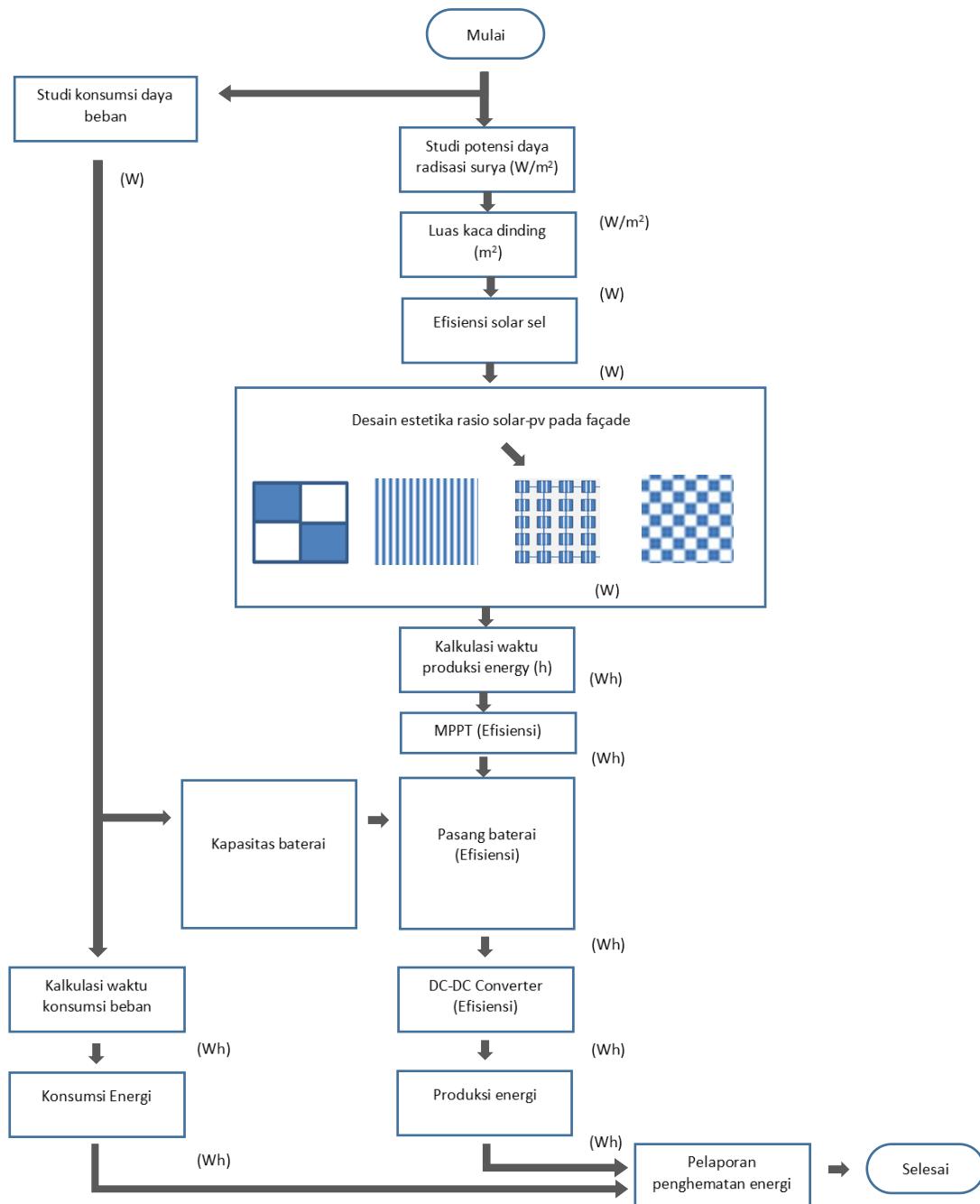
dengan DC-DC converter. DC-DC converter terdiri dari *buck converter* yang berfungsi menurunkan tegangan sumber menjadi 5 V dan *boost converter* yang berfungsi untuk menaikkan tegangan sumber menjadi 19 V. Untuk Beban yang menggunakan tegangan suplai 12 V, konektor tidak menggunakan DC-DC converter karena tegangan 12 V sudah terdapat pada MPPT.

Sistem elektronika daya juga dilengkapi dengan baterai. Baterai berfungsi untuk menyimpan energi listrik ketika energi listrik dari PV tidak terpakai oleh pengguna. Apabila PV tidak mampu memberikan energi maka energi listrik dapat diambil dari baterai. Hal yang perlu diperhatikan untuk pemasangan baterai adalah jumlah kapasitas. Pemasangan jumlah kapasitas energi baterai ditampilkan pada persamaan (9).

$$C = \frac{N_C E_L}{DOD \eta_{ed}} \quad (9)$$

Dengan C adalah kapasitas penyimpanan energi baterai (VAh), N_C adalah jumlah hari dalam keadaan mendung berturut-turut pada saat keadaan mendung/berawan di lokasi panel surya. DOD adalah persentase kedalaman pengosongan baterai (%). E_L adalah daya beban (W). η_{ed} adalah efisiensi total dari elektronika daya. η_{ed} ditampilkan pada persamaan (10).

$$\eta_{ed} = \eta_{batt} * \eta_{mppt} * \eta_{conv} \quad (10)$$



Gambar 8. Flowchart perancangan pemanenan energy surya terintegrasi kaca bangunan

Efisiensi masing-masing perangkat elektronika ditampilkan pada **Tabel 3**. Sehingga total efisiensi dari perangkat elektronika adalah 0,56.

Pada makalah ini jumlah N_C yang digunakan adalah 5 hari. DOD yang digunakan adalah 0,8. Jika mengacu pada

Tabel 2, jumlah daya beban E_L pada satu ruangan adalah 180 W dan η_{ed} sebesar 0,56. Sehingga kapasitas baterai yang didapatkan adalah 2009 VAh. Kapasitas baterai identik pada satuan Ah, sehingga jumlah Ah yang digunakan ditampilkan pada persamaan (11).

$$Ah = \frac{C}{\text{Tegangan Nominal DC}} \quad (11)$$

Tegangan nominal baterai adalah tegangan yang tertera pada baterai. Jika tegangan nominal baterai yang digunakan adalah 12 V. Maka total Ah yang digunakan pada penyimpanan energi pada sistem ini adalah 167 Ah.

Sedangkan total η_{total} efisiensi dari sistem pemanenan energi surya ditampilkan pada persamaan (12) dan **Tabel 3** dengan efisiensi total yaitu 0,06. Alur total perancangan sistem pemanenan energi surya terintegrasi kaca bangunan ditampilkan pada **Gambar 8**.

$$\eta_{total} = \eta_{pv} * \eta_{sistem_pv} * \eta_{ed} \quad (12)$$

Hasil dan Pembahasan

Berdasarkan pada rancangan sistem pemanenan energi surya pada **Gambar 7**, ada 2 kemungkinan sistem yang dihasilkan. Pertama sistem pemanenan energi surya tidak menggunakan baterai dan kedua menggunakan baterai. Sistem pemanenan energi surya tidak menggunakan baterai ketika daya beban sama dengan daya yang dihasilkan *Solar façade* atau baterai dalam keadaan kosong. Sedangkan, sistem pemanenan energi surya menggunakan baterai maka jumlah total daya yang dihasilkan oleh *Solar façade* lebih besar daripada jumlah total daya beban. Sehingga kelebihan daya tersebut disimpan ke dalam baterai. Apabila jumlah daya beban yang digunakan lebih besar dari daya *Solar façade*, maka beban akan mengambil daya dari baterai.

Dua hal yang dibatasi dalam pembahasan pada makalah ini yaitu pertama sistem pemanenan energi surya tidak menggunakan baterai dengan asumsi daya yang digunakan beban sama dengan daya yang dihasilkan oleh *Solar façade*. Jika beban tidak menggunakan sebagian daya dari *Solar façade*, maka daya tersebut tidak disimpan ke dalam baterai atau daya tersebut terbuang. Kedua sistem menggunakan baterai, dengan daya beban sama dengan daya *Solar façade* maka daya tersebut tidak disimpan ke dalam baterai. Jika daya tidak digunakan seperti hari libur, maka daya akan disimpan ke dalam baterai.

Pengujian dalam makalah ini, dilakukan di dua orientasi ruangan yaitu ruangan menghadap barat atau matahari terbenam dan ruangan menghadap timur atau matahari terbit. Daya yang dihasilkan oleh *Solar façade* ditampilkan pada **Tabel 4**. Terlihat daya yang dihasilkan oleh ruangan menghadap sisi barat 2 kali lebih besar dibandingkan dengan ruangan sisi timur. Hal ini disebabkan ruangan di sisi timur, *Solar façade* hanya

mendapatkan sinar matahari mulai pukul 6.00-12.00 yaitu ketika pagi menjelang siang. Pada waktu tersebut kabut atau uap air di udara masih banyak sehingga sinar matahari terhalangi oleh kabut. Sedangkan di sisi barat, *Solar façade* mendapatkan sinar matahari mulai pukul 12.00 – 17.00. Di waktu tersebut uap air di udara sudah menghilang karena panas matahari cukup menghilangkan uap air. Efisiensi daya yang dihasilkan dari *Solar façade* secara total 11,6% dari faktor surya yang didapatkan. Efisiensi tersebut mencakup efisiensi PV, efisiensi kualitas modul, efisiensi kesalahan jajaran modul, efisiensi suhu, dan efisiensi kotoran/debu. Sedangkan efisiensi sistem pemanenan energi surya yang mencakup *Solar façade* dan perangkat elektronika daya sebesar 6%. Efisiensi sistem pemanenan energi surya mencakup efisiensi *Solar façade*, efisiensi MPPT, efisiensi baterai, efisiensi DC-DC converter.

Setelah mendapatkan nilai daya yang dihasilkan oleh *Solar façade*, langkah selanjutnya adalah mendapatkan estimasi energi yang dihasilkan oleh sistem pemanenan energi. Estimasi energi yang berasal sistem pemanenan energi surya tanpa menggunakan baterai ditampilkan pada **Tabel 5**. Waktu optimal *Solar façade* mendapatkan sinar matahari dalam sehari adalah 3 jam, yaitu pukul 8.00-11.00 di bagian sisi timur dan pukul 13.00-16.00 di bagian sisi barat. Jika estimasi energi pada sistem pemanenan energi digunakan seluruhnya, maka estimasi pemanenan energi dalam 1 minggu hanya efektif dalam 5 hari. Hal ini dikarenakan penggunaan energi listrik sangat kecil pada hari Sabtu dan Minggu. Berbeda dengan estimasi pemanenan energi menggunakan baterai seperti yang ditampilkan pada **Tabel 6**. Energi yang terbuang pada hari Sabtu dan Minggu disimpan dalam baterai. Sehingga, estimasi energi yang dikumpulkan efektif dalam 7 hari dalam seminggu. Perancangan sistem pemanenan energi surya yang telah dirancang dapat menggunakan *double Solar façade*. *Double Solar façade* yaitu PV yang diapit oleh dua kaca sehingga pengkabelan tidak terdampak langsung oleh faktor eksternal seperti hujan dan air pembersih kaca.

Efisiensi total dari sistem pemanenan energi pada makalah ini adalah 0,06 atau 6%. Artinya adalah energi matahari yang kemudian diubah ke dalam energi listrik hanya dapat dapat digunakan ke beban sebesar 6%. Efisiensi tersebut disebabkan karena efisiensi PV,

Tabel 4. Daya yang dihasilkan oleh *solar glass*

	Faktor surya (W/m ²)	Luas Kaca Jendela (m ²)	Rasio PV dan Kaca	Efisiensi Total <i>Solar façade</i>	Daya yang Dihasilkan <i>Solar façade</i> (W)
Sisi Barat	243	16,32	0,35	0,116	161,32
Sisi Timur	112	16,32	0,35	0,116	74,35

Tabel 5. Estimasi pemanenan energi tanpa menggunakan baterai

	Daya yang Dihasilkan <i>Solar façade</i> (W)	Efisiensi Total Perangkat Elektronika Daya (tanpa baterai)	Estimasi Pemanenan Energi Dalam Sehari (Wh) (Optimal 3 Jam)	Estimasi Pemanenan Energi Dalam Seminggu (Wh) (5 Hari)
Sisi Barat	161.32	0.66	323.05	1615
Sisi Timur	74.35	0.66	148.89	744

Tabel 6. Estimasi pemanenan energi menggunakan baterai

	Daya yang Dihasilkan <i>Solar façade</i> (W)	Efisiensi Total Perangkat Elektronika Daya (Serta Baterai)	Estimasi Pemanenan Energi Dalam Sehari (Wh) (Optimal 3 Jam)	Estimasi Pemanenan Energi Dalam Seminggu (Wh) (7 Hari)
Sisi Barat	161.32	0.56	274.60	1992
Sisi Timur	74.35	0.56	126.56	886

efisiensi sistem PV, dan efisiensi perangkat elektronika. Jika efisiensi ditingkatkan, efisiensi PV berdasarkan penelitian hanya mampu sampai 30% menggunakan tipe PV monocrystalline, efisiensi sistem PV dapat ditingkatkan menjadi 0,95%, dan efisiensi perangkat elektronika menjadi 0,8 %.

Jika dilihat dari **tabel 4** efisiensi total *solar façade* adalah 0,116 dengan daya keluaran di sisi Barat adalah 161,32 W dan sisi Timur adalah 74,35 W. Jika efisiensi sistem ditingkatkan dapat menghasilkan efisiensi 0,285 dengan daya keluaran di sisi Barat adalah 396 W dan di sisi Timur 146,13 W. Jika dilihat dari **tabel 3** efisiensi total dari sistem pemanenan energi adalah 0,06, dapat menghasilkan energi dalam 7 hari sebesar 1992 Wh di sisi Barat dan 886 Wh di sisi Timur. Jika efisiensi sistem pemanenan energi ditingkatkan menjadi 0,228, maka jumlah ideal energi yang dihasilkan dalam 7 hari adalah 7,5 kW di sisi Barat dan 3,36 kW di sisi Timur.

Kesimpulan

Perancangan sistem pemanenan energi surya yang terintegrasi pada kaca bangunan telah dirancang dan disesuaikan dengan kondisi pada Gedung Bandar Lampung. Sistem pemanenan energi surya terintegrasi kaca disebut *Solar façade*. *Solar façade* terdiri dari PV mini yang ditempel pada kaca bangunan dan diberi jarak kosong antar PV sehingga cahaya matahari dapat masuk

ke dalam ruangan. Rasio luas PV yang ditempel pada kaca bangunan sebesar 35%. PV yang digunakan adalah jenis polycrystalline. Total daya maksimum *Solar façade* yang terintegrasi pada 1 kaca ruangan dengan luas 16,32 m² sebesar 161,32 W di sisi barat dan 74,35 W di sisi timur. Efisiensi total dari sistem pemanenan energi surya terintegrasi kaca bangunan sebesar 6 % mencakup efisiensi modul *Solar façade* dan efisiensi perangkat elektronika. Estimasi pemanenan energi tanpa menggunakan baterai menghasilkan sebesar 1615 Wh di sisi barat dan 744 Wh di sisi timur dalam satu minggu. Jika sistem pemanenan energi menggunakan baterai maka estimasi pemanenan energi menghasilkan 1,23 kali lebih besar dibandingkan tanpa menggunakan baterai. Perancangan sistem pemanenan energi surya ke depannya diharapkan dapat mempertimbangkan *double Solar façade*, dan faktor suhu pada udara yang terperangkap.

Penghargaan

Terima kasih kepada Institut Teknologi Sumatera atas hibah Penelitian 134ai/IT9.C1/PP/2018 sehingga penelitian ini bisa terlaksana dengan baik. Dalam penelitian ini tidak memiliki konflik terhadap kegiatan penelitian lainnya.

Daftar Pustaka

- [1] I. Ceron, E. Caamano-Martin, F. J. Neila, 'State-of-the-art' of building integrated photovoltaic products, *Renewable Energy* 58 (2013) 127-133.
- [2] A. Pitts, Planning and design strategies for sustainability and profit, UK: Architectural Press, 2004.
- [3] A. J. Marszal, P. Heiselberg, J.S. Bourelle, E. Musall, K. Voss, I. Sartori, A. Napolitano, Zero Energy Building – A review of definitions and calculation methodologies, *Energy and Buildings* 43 (2011) 971-979.
- [4] M. Riten, Z. Vroon, and C. Geurts, *Building Integrated Photovoltaics: From Fundamentals to Applications*, First Edition, John Wiley & Sons, Ltd, 2017.
- [5] M. Tripathy, P. K. Sadhu, Building Integrated Photovoltaic Market Trend and Its Applications, *Telkomnika Indonesian Journal of Electrical Engineering*, Vol. 14 No. 2, 2015.
- [6] Ingo Hagemann, Architectural Considerations for Building-integrated Photovoltaics, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, Vol. 4, 247-258 (1996).
- [7] A. Chatzipanagi, F. Frontini, A. Virtuani, BIPV-temp: A demonstrative Building Integrated Photovoltaic Installation, *Applied Energy* 173 (2016) 1 – 12.
- [8] Monto Mani, Rohit Pillai, Impact of dust on solar photovoltaic (PV) performance: Research status, challenges and recommendations, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14 (2010) 3124-3131.
- [9] A. K. Shukla, K. Sudhakar, P. Baredar, Recent advancement in BIPV product technologies: A review.
- [10] Y. Tae Chae, Jeehwan Kim, Hongsik Park, Byungha Shin, Building energy performance evaluation of building integrated photovoltaic (BIPV) window with semi-transparent solar cells, *Applied Energy* 129 (2014) 217-227.
- [11] Talal Salem, Elias Kinab, Analysis of Building-Integrated Photovoltaic Systems: A Case Study of Commercial Buildings under Mediterranean Climate, *Procedia Engineering* 118 (2015) 538-545.
- [12] N. Martin-Chivelet, J. C. Gutierrez, M. Alonso-Abella, F. Chenlo, J. Cuenca, Building Retrofit with Photovoltaics: Construction and Performance of a BIPV Ventilated Façade, *Energies* 2018, 11, 1719.
- [13] Susan, Integrated configuration of folding wall-BIPV at office building in surabaya as low carbon building design, *Humaniora* vol. 8 No. 1, January 2017:31-44.
- [14] S. R. Wenhan, M. A. Green, M. E. Watt, R. Corkish, A. Sproul, *Applied Photovoltaics* Third Edition, Earthscan, 2011.
- [15] M. P. Thekaekara, A. J. Drummond, Standard Values for the Solar Constant and its Spectral Components, *Nature Physical Science* vol. 229 January 4, 1971.
- [16] Benjamin Y. H. Liu, Richard C. Jordan, The Interrelationship and Characteristic Distribution of Direct, Diffuse, and Total Solar Radiation, Thesis.
- [17] SNI 6389:2011, Konservasi energi selubung bangunan pada bangunan Gedung
- [18] Bjørn Petter Jelle, Christer Breivik, state of the art building integrated photovoltaics, *Energy Procedia* 20 (2012) 68-77.
- [19] G. J. Yu, Y. S. Jung, J. Y. Choi, G. S. Kim, A novel two-mode MPPT control algorithm based on comparative study of existing algorithms, *Solar Energy* 76 (2004) 455-463.
- [20] Sami Ekici, Mehmet Ali Kopru, Investigation of PV System Cable Losses, *International Journal Of Renewable Energy Research*, Vol.7, No.2, 2017.
- [21] Tamer T.N. Khatib, A. Mohamed, N. Amin, An Efficient Maximum Power Point Tracking Controller for Photovoltaic Systems Using New Boost Converter Design and Improved Control Algorithm, *Wseas Transactions on Power Systems*, Issue 2, Volume 5, April 2010.
- [22] P. S. Kumar, S. V. Kumar Ball, Improving Formation Efficiency of Lead Acid Battery using Hydrogen Peroxide as an Additive, *International Journal of Science and Research (IJSR)*, 2319-7064, 2017.
- [23] Application Note 3166, Source Resistance: The Efficiency Killer in DC-DC Converter Circuits, 2004.
- [24] Khaled Bataineh, Doraid Dalalah, Optimal Configuration for Design of Stand-Alone PV System, Smart Grid and Renewable Energy, 2012, 3, 139-147.
- [25] T. Miyazaki, A. Akisawa, T. Kashiwagi, Energy savings of office buildings by the use of semi-transparent solar cells for windows, *Renewable Energy* 30 (2005) 281-304.
- [26] Mohammad Bayoumi, Dietrich Fink, Maximizing the performance of an energy generating façade in terms of energy saving strategies, *Renewable Energy* (2014) 294-305.
- [27] G.M. Tina, A. Gagliano, F. Nocera, F. Patania, Photovoltaic glazing: analysis of thermal behavior and indoor comfort, *The Mediterranean Green Energy Forum 2013, MGEF – 13, Energy Procedia* 42 (2013) 367-376.