

Analisis Pemanfaatan Material Berubah Fasa Sebagai Pengatur Temperatur Sistem *Building Integrated Photovoltaics (BIPV)*

Razali Thaib^{1*}, Samsul Bahri Widodo² dan Fazri Amir³

¹Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik,
Universitas Syiah Kuala, Banda Aceh, 23111
razalithaib@unsyiah.ac.id

^{2,3}Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik,
Universitas Samudra, Kota Langsa, 24416

Abstrak— *Building Integrated Photovoltaic (BIPV)* merupakan satu kombinasi antara teknologi elektrikal dari panel surya fotovoltaik (PV) dengan konstruksi bangunan gedung. Panel fotovoltaik diletakkan di kulit terluar bangunan dengan konstruksi yang menopang kepada struktur utama bangunan. Energi radiasi matahari yang tiba pada permukaan PV, sebagian dipantulkan kembali dari permukaan PV sementara sebagian besar diserap dalam panel PV. Sebagian energi yang diserap dikonversi menjadi listrik sedangkan sisanya diubah menjadi energi panas yang dapat meningkatkan temperatur permukaan PV yang memiliki dampak negatif pada output listrik dan efisiensi termal panel PV. Pada penelitian ini telah dilakukan analisis penggunaan material berubah fasa (*Phase Change Material, PCM*) untuk pengaturan temperatur permukaan panel PV. Dari hasil analisis perpindahan panas dengan menggunakan lilin lebah sebagai PCM memperlihatkan peningkatan 1-3% dari total energi yang dihasilkan panel PV, dibandingkan PV tanpa PCM.

Kata kunci— Material Berubah Fasa, Photovoltaic, BIPV, Lilin Lebah, Efisiensi

I. PENDAHULUAN

Fotovoltaik adalah sistem aktif solar yang menghasilkan energi listrik. Efek fotovoltaik merupakan proses dasar dimana fotovoltaik mengkonversi sinar matahari menjadi listrik. Dalam hal ini sel fotovoltaik lebih spesifik mengambil energi dari sinar matahari sebagai sumber energi utama yang dapat diambil secara bebas, bersih dan tidak bersuara. Bangunan gedung dengan fotovoltaik terintegrasi atau *building integrated photovoltaics (BIPV)* merupakan satu kombinasi antara teknologi elektrikal dari solar panel fotovoltaik dengan konstruksi bangunan gedung. Panel fotovoltaik diletakkan di kulit terluar bangunan dengan konstruksi yang menopang kepada struktur utama bangunan. Beberapa prinsip yang mempengaruhi fotovoltaik terintegrasi antara lain: tata ruang dan orientasi, massa dan bentuk, dan struktur bangunan BIPV [1].

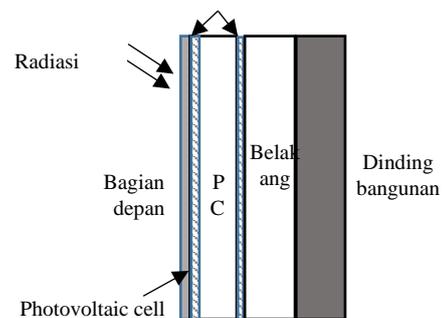
Efisiensi konversi energi surya dari panel PV tergantung pada tiga faktor : intensitas radiasi matahari, bahan sel surya dan temperatur operasi. Secara umum, ketersediaan radiasi matahari, sebagai sumber daya alam tidak berada dalam kontrol manusia. Operasi sel surya didasarkan pada kemampuan semikonduktor untuk mengkonversi sinar matahari (foton) menjadi listrik dengan memanfaatkan efek fotovoltaik [3]. Hanya sebagian kecil dari radiasi matahari yang diserap diubah menjadi radiasi energi listrik, sedangkan sisanya hilang sebagai panas.

Saat ini, bagaimanapun, hanya 15-20% dari energi surya yang diterima pada panel PV dapat dikonversi ke listrik, dengan sisa energi yang diubah menjadi panas. Panas ini akan diserap oleh perangkat PV itu sendiri, menyebabkan temperatur kerja dapat mencapai 80°C. Disisi lain efisiensi konversi panel PV menurun 0,4-0,65% untuk setiap derajat kenaikan temperatur permukaan PV [4]. Hal ini menunjukkan perlu adanya kebutuhan pengaturan temperatur permukaan PV yang dipasang terintegrasi dengan bangunan, guna memperoleh efisiensi listrik yang optimal.

Tujuan utama dari regulasi termal adalah untuk menjaga temperatur permukaan PV pada kondisi rancangannya. PV/thermal (PV/T) teknologi dikembangkan untuk tujuan

peningkatan daya keluaran panel PV. Dalam sistem PV/T, panel PV dan komponen ekstraksi panas diintegrasikan ke dalam satu modul PV [5]. Konsep ini awalnya diusulkan oleh Kern dan Russell, dan dalam tiga dekade yang lalu dan telah-telah dibahas dalam banyak studi [6] dan [7]. Secara umum, teknologi pendingin dapat diklasifikasikan ke dalam pendekatan pasif dan aktif.

Baru-baru ini sebuah metode berbasis PCM untuk pendinginan panel PV telah menarik banyak perhatian dari para peneliti. Sistem PV-PCM adalah teknologi hybrid mengintegrasikan panel PV dan PCM ke panel PV tunggal untuk meningkatkan efisiensi konversi energi surya yang lebih tinggi [14]. PCM mampu menyerap panas dalam bentuk panas laten yang diikuti dengan perubahan fasa padat-cair pada rentang temperatur



yang hamper konstan, dan kemudian membuang panas sesuai yang diinginkan. Gambar 1 memperlihatkan rangkaian sistem PV-PCM.

Gambar 1. Skematik sistem PV-PCM [15]

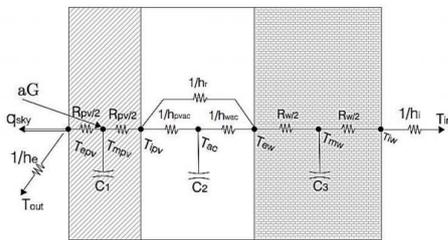
Sistem PV-PCM terdiri dari panel PV dan wadah diisi dengan PCM. Panel PV melekat pada plat depan wadah, bagian belakang yang terbuat dari bahan yang dapat memindahkan panas konduksi dengan baik. Sebagai isolasi wadah sering digunakan *polystyrene*. Panel PV menerima energi radiasi matahari dan mengkonversi beberapa bagian menjadi listrik, sedangkan sisanya dari energi radiasi diubah menjadi panas, kemudian berpindah secara konduksi ke wadah PCM. Pada bagian belakang wadah PCM, dibuat rongga udara

antara wadah dan dinding bangunan untuk memungkinkan panas dibuang secara konveksi alamiah.

II. METODOLOGI PENELITIAN

Model termal dikembangkan sejauh untuk sistem PV - PCM, telah menerima minat yang luas [2], [9], [16]–[19], namun ini memerlukan modifikasi lebih lanjut, yang dapat mencakup efek konveksi dalam PCM meleleh, fusi dan pemadatan PCM, kehilangan panas ke lingkungan dari depan PV panel dan kembali permukaan (oleh alam serta konveksi paksa), kehilangan panas karena radiasi, kondisi iklim variabel dan pengaruh sudut kemiringan panel PV pada mekanisme kehilangan panas. Dalam model thermal ini, perbaikan ini telah dipertimbangkan untuk mempelajari respon termal dari modul PV ditambah dengan PCM dalam berbagai kondisi atmosfer. Hal ini dilakukan dengan mempertimbangkan pengaruh sifat termal dari PCM, bahan PV modul lapisan dan menyelidiki lebih lanjut kehilangan panas dari permukaan PV modul untuk lingkungan bersama dengan panas, massa dan momentum transfer dalam PCM. Model thermal ini sehingga menggabungkan beberapa faktor penting yang tidak dimasukkan sampai sekarang

Dalam rangka memenuhi tujuan penelitian yang diusulkan ini, dengan informasi yang dikumpulkan hasil telaah kepustakaan akan dikembangkan pendekatan numerik untuk melakukan analisa perpindahan panas pada panel PV-PCM. Model yang diusulkan didasarkan pada sistem façade dengan rongga udara berventilasi. Perpindahan panas di sistem dapat dianggap sebagai satu set node terhubung dengan jaringan termal dengan temperatur dan kapasitansi. Analisis numerik didasarkan pada jaringan termal sebagaimana skema yang ditunjukkan dalam Gambar dibawah ini.



Gambar 1. Analogi perpindahan panas pada sistem PV-PCM

Sistem PV-PCM dalam penelitian saat ini dianggap sebagai jenis baru dari sistem thermal fotovoltaik yang menggunakan penyimpanan panas laten. Efisiensi energi dari sistem (PV-T) dapat didefinisikan sebagai rasio total termal (tersedia pada PV sebagai panas) dan energi listrik yang dihasilkan pada total energi matahari yang jatuh pada permukaan PV yang diberikan oleh Persamaan (1) [20]. Neraca energi dari sistem PV diberikan oleh :

$$Q_{solar} = Q_{elect} + Q_{lost} + Q_{stored} \dots \dots \dots (1)$$

Dimana Q_{solar} , Q_{elect} , Q_{lost} dan Q_{stored} adalah energi matahari yang jatuh pada panel PV, keluaran energi listrik dari panel PV, energi termal hilang dari panel PV dan energi panas yang tersimpan di panel PV Q_{solar} diberikan oleh Persamaan (2):

$$Q_{elect} = GA_{pv}\Delta t \dots \dots \dots (2)$$

Dimana G adalah insiden intensitas radiasi matahari global pada panel, dan A_{pv} adalah area panel dan, Δt adalah durasi percobaan. Q_{elect} diberikan oleh Persamaan (3):

$$Q_{elect} = V_{oc}I_{sc}FF\Delta t \dots \dots \dots (3)$$

Dimana V_{oc} , I_{sc} dan FF adalah tegangan rangkaian terbuka, arus hubung singkat dan faktor pengisian untuk panel masing-masing. Pada V_{oc} , arus, $I = 0$ dan pada I_{sc} the $V = 0$, yang berarti produk dari I_{sc} dan V_{oc} saja tidak menghasilkan tenaga dari PV sampai dikalikan dengan faktor yang mengubah I_{sc} menjadi I_{max} (maximum extractable current) dan V_{oc} into V_{max} (maximum extractable voltage) disebut fill factor (FF) dan diberikan oleh Persamaan (4):

$$FF = \frac{V_{max}I_{max}}{V_{oc}I_{sc}} \dots \dots \dots (4)$$

Dimana V_{max} dan I_{max} adalah tegangan dan arus masing-masing sesuai dengan titik daya maksimum untuk PV Q_{lost} diperoleh dengan persamaan (5):

$$Q_{lost-PV} = GA_{PV}(1 - \alpha\tau) + h_{ca}A_{PV}(T_{PV} - T_{amb})\Delta t \dots (5)$$

dimana τ adalah fraksi radiasi matahari yang ditransmisikan melalui penutup atas panel PV, α adalah fraksi radiasi matahari yang diserap oleh penutup, T_{amb} dan T_{PV} , adalah suhu lingkungan dan suhu permukaan panel PV masing-masing dan h_{ca} dikombinasikan konvektif dan koefisien kehilangan panas radiasi dari panel PV Panas yang hilang oleh PV-PCM diperoleh dengan Persamaan (6):

$$Q_{lost-PV-PCM} = GA_{PV-PCM}(1 - \alpha\tau) + h_{ca}A_{PV-PCM}(T_{PV-PCM} - T_{amb})\Delta t \dots \dots \dots (6)$$

dimana T_{PV-PCM} dan, A_{PV-PCM} adalah suhu permukaan dan luas permukaan sistem PV-PCM, h_{ca} diberikan oleh:

$$h_{ca} = 5.7 + 3.8v_w \dots \dots \dots (7)$$

Dimana v_w adalah kecepatan angin yang diukur di lokasi. Integrasi PCM di balik panel PV menyimpan energi panas yang ada pada panel PV yang jika tidak akan hilang ke lingkungan. Penyerapan panas di balik panel PV mengatur suhu PV sehingga menghasilkan output listrik PV Akibatnya PV-PCM termal serta output listrik lebih tinggi dari PV referensi.

Q_{saved} adalah penambahan energi listrik dan energi termal tambahan dengan memasukkan PCM ke PV dibandingkan dengan PV referensi dan dihitung untuk menentukan keefektifan sistem PV-PCM di kedua iklim dan diberikan oleh Persamaan:

$$Q_{saved} = (Q_{elect-PV-PCM} - Q_{elect-PV}) + 0.3(Q_{stored-PV-PCM} - Q_{stored-PV}) \dots \dots \dots (8)$$

Persamaan keseimbangan energi untuk permukaan dan untuk kapasitansi termal modul selalu bergantung pada fluk konvektif dan radiasi dari luar, dari fluk konduksi di panel PV, dan dari fluk konvektif dan radiasi ke rongga udara. Persamaan keseimbangan energi permukaan untuk simpul T_{epv} tergantung pada fluks panas antara node tetangga - sesuai dengan simpul T_{mpv} dan lingkungan luar.

$$-\frac{T_{epv}-T_{mpv}}{R_{pv}/2} - \epsilon_{pv} \cdot \sigma \cdot A(T_{epv}^4 - T_{sky}^4) - h_e A(T_{epv} - T_e) = 0 \dots \dots \dots (9)$$

Dimana koefisien perpindahan panas udara luar ruangan ditentukan dengan:

$$h_e = 8.55 + 2.56 V_{wind} \dots\dots\dots(10)$$

Persamaan keseimbangan energi volumetrik untuk simpul T_{mpv} tergantung pada fluks panas konduktif melalui material PV dan radiasi matahari.

$$M_{pv} \cdot Cp_{pv} \cdot \frac{dT_{mpv}}{dt} = \alpha_{pv} \cdot G + \frac{(T_{epv}-T_{mpv})}{R_{pv/2}} - \frac{(T_{mpv}-T_{ipv})}{R_{pv/2}} \dots\dots\dots(11)$$

Untuk simpul T_{ipv} , persamaan keseimbangan energi permukaan tergantung pada fluks konduktif dari permukaan PV, fluks konvektif antara permukaan PV dan udara di dalam rongga dan pertukaran fluks radiasi antara PV dan permukaan lainnya.

$$\frac{T_{mpv}-T_{ipv}}{R_{pv/2}} - h_{pvac}A(T_{ipv} - T_{ac}) - h_r A(T_{ipv}^4 - T_{ew}^4) = 0 \dots\dots\dots(12)$$

Dimana, koefisien perpindahan panas konveksi ditentukan dari :

$$h_c = h_{pvac} = h_{wac} = \frac{k_f}{l} \left[1 + \left(\frac{0.0665 Ra^{0.333}}{1 + (9600/Ra)^{0.25}} \right)^2 \right]^{0.5}$$

$$Ra_L = \frac{g \alpha_p \rho^2 C_p |T_{pv} - T_{amb}| L^3}{k \mu}$$

Koefisien perpindahan panas radiasi ditentukan dari :

$$h_r = \frac{F_{Rpv-pcm} \cdot \sigma (T_{pv} - T_{pcm})(T_{pv}^2 + T_{pcm}^2)}{\frac{1}{\epsilon_{pv}} + \frac{1}{\epsilon_{pcm}} - 1}$$

Rongga udara simpul (T_{ac}) keseimbangan energi volumetrik tergantung pada dangkal pertukaran panas konvektif antara dua node permukaan (T_{ipv} dan T_{ew}) dan simpul rongga udara (T_{ac}),

$$M_{air} \cdot Cp_{air} \cdot \frac{dT_{ac}}{dt} = h_{pvac}A(T_{ipv} - T_{ac}) + h_{wac}A(T_{ac} - T_{ew}) + \dot{m} Cp_{air}(T_{inlet} - T_{outlet}) \dots\dots\dots(13)$$

Persamaan keseimbangan energi permukaan untuk T_{ew} tergantung pada konveksi antara udara di dalam rongga dan fluks radiasi pertukaran antara dinding dan permukaan lainnya.

$$h_r A(T_{ipv}^4 - T_{ew}^4) - h_{wac}A(T_{ac} - T_{ew}) - \frac{(T_{ew}-T_{mw})}{R_{w/2}} = 0 \dots\dots\dots(14)$$

di mana sifat dan variabel yang berbeda mempertahankan definisi yang sudah disajikan, dan T_{mw} adalah temperatur yang sesuai dengan PCM papan gipsum kapasitansi termal simpul (K) dan R_w merupakan bahan (PCM gypsum board) konduktif resistor. Persamaan keseimbangan energi volumetrik untuk T_{mw} simpul tergantung pada fluks panas konduktif melalui materi. Dalam kasus tertentu papan PCM gypsum terpadu, dan mengikuti pendekatan Athienitis disebutkan dalam sub-bagian, keseimbangan energi untuk node ini juga tergantung pada internal Q_1 generasi panas (W) (Persamaan 15).

$$M_r \cdot Cp_w \cdot \frac{dT_{mw}}{dt} = \frac{(T_{ew}-T_{mw})}{R_{w/2}} - \frac{(T_{mw}-T_{iw})}{R_{w/2}} + q_l \dots(15)$$

Persamaan permukaan keseimbangan energi untuk simpul T_{iw} ditentukan dari:

$$\frac{(T_{mw}-T_{iw})}{R_{w/2}} - h_i A(T_{iw} - T_{in}) = 0 \dots\dots\dots(16)$$

Efisiensi energi listrik diperoleh dengan membagi keluaran energi listrik dengan kejadian energi matahari pada PV yang diberikan oleh Persamaan (17):

$$\eta_{elect} = \frac{Q_{elect}}{G_{APV}} \dots\dots\dots(17)$$

Dengan cara yang sama, efisiensi energi termal diperoleh dengan membagi energi panas yang tersimpan oleh insiden energi matahari pada panel PV yang diberikan oleh Persamaan (18):

$$\eta_{therm} = \frac{0.3Q_{stored}}{G_{APV}} \dots\dots\dots(18)$$

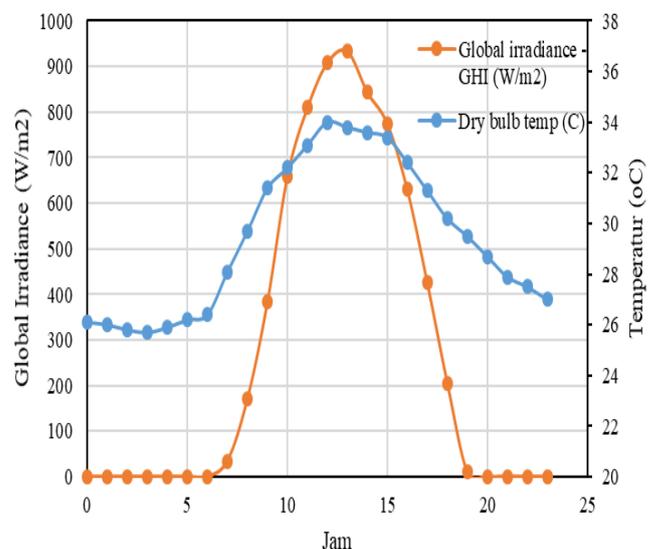
Karena kualitas energi termal tidak sama dengan energi listrik, efisiensi konversi 30% digunakan dalam Persamaan (18) untuk mengubah energi panas menjadi energi listrik ekivalen:

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

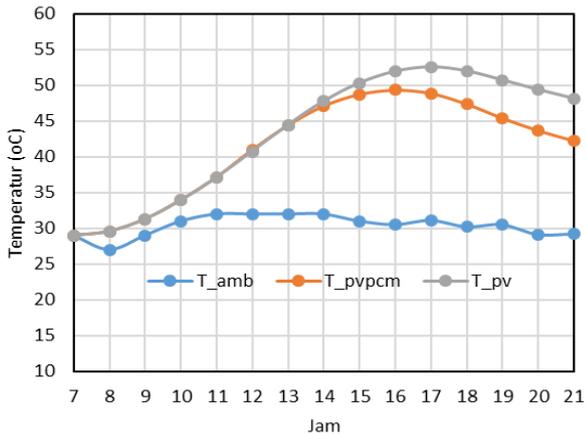
PCM yang digunakan dalam penelitian ini adalah lilin lebah dengan sifat-sifat termofisik sebagaimana ditunjukkan dalam Tabel dibawah ini :

Tabel 1 Sifat-sifat termofisik lilin lebah

Material	Hasil Pengukuran T - History			
	Tm	Cp	k	Hm
	(⁰ C)	(KJ/kg.K)	(W/mK)	(KJ/kg)
Lilin lebah (Beeswax)	57,40-61,79	4,86-8,45	1,23	148,71



Gambar 3. Grafik radiasi surya dan temperatur lingkungan Kota Banda Aceh pada 8 April 2019.



Gambar 4. Grafik perumahan temperatur permukaan PV dengan PCM (T_pvpcm) dan temperatur PV tanpa PCM (T_PV)

Gambar 4 memperlihatkan hasil perhitungan temperatur permukaan atas panel PV menggunakan PCM dibandingkan dengan temperatur permukaan PV tanpa PCM. Terlihat pada pagi hari mulai jam 7-11 pagi temperatur meningkat secara konstan, dan mulai jam 11 pagi terlihat adanya perbedaan temperatur anatara PV-PCM dengan PV tanpa PCM, hal ini diakibatkan temperatur lilin lebah telah mencapai titik lelehnya, dan telah terjadi proses penyerapan panas dan penyimpanan panas oleh PCM.

Hasil perhitungan energi yang termal yang dapat diserap oleh PCM dan efisiensi PV diberikan dalam Tabel 2 Dari tabel terlihat adanya kenaikan efisiensi PV akibat adanya penyerapan panas oleh material berubah fasa.

Tabel 2. Hasil perhitungan efisiensi energi rata-rata

Hasil Perhitungan			Besaran
Energi dari Surya	Qsolar= G Apv (W)		333
Energi listrik rata-rata (W)	PV	Q _{elect}	33.4
		Q _{saved}	0
	PV-PCM	Q _{elect}	33.4
		Q _{saved}	0
Rata-rata energi hilang (W)	PV	Q _{loss}	180
	PV-PCM	Q _{loss}	149
Energi Termal (W)	PV	Q _{stored}	120
		Q _{saved}	0
	PV-PCM	Q _{stored}	148
		Q _{saved}	27.9
Efisiensi energi (%)	PV	η _{elect}	10
		η _{therm}	10.8
	PV-PCM	η _{elect}	10.7
		η _{therm}	13.3

Tahap akhir dari kajian ini adalah tinjauan kelayakan penggunaan PCM pada panel PV. Salah satu kesulitan dalam analisa ekonomis adalah belum adanya standar harga PCM lilin lebah. Harga yang digunakan dalam kajian ini didasarkan pada harga pasar bahan baku lilin lebah sebesar Rp. 35.000/kg. Dan diasumsi biaya proses penyiapan untuk digunakan di PV sebesar 25% dari harga bahan baku, maka harga total lilin lebah adalah Rp. 43.750/kg. Harga listrik untuk rumah tangga daya 900 VA adalah Rp 1.352/kWh, dan energi surya 5,18 kWh/m².yr

$$PBp(yr) = \frac{\text{harga PCM (Rp./kg)} \cdot \text{Berat PCM } (\frac{kg}{m^2})}{\text{Energi Surya (kWh/m}^2\text{/yr)} \cdot \text{Harga listrik (Rp./kWh)}}$$

Maka diperoleh waktu pengembalian modal adalah 9,3 tahun.

IV. KESIMPULAN

Telah dilakukan kajian pemanfaatan material berubah fasa sebagai material penyerap panas pada sistem BIPV untuk pengaturan temperatur permukaan dan peningkatan efisiensi PV. Pada kajian ini digunakan lilin lebah sebagai material berubah fasa yang ramah lingkungan. Dengan menerapkan persamaan keseimbangan panas yang disederhanakan untuk perhitungan energi keluar dan efisiensi PV. Hasil kajian diperoleh penyerapan panas terjadi saat temperatur permukaan PV telah mencapai diatas temperatur leleh lilin lebah. Dan adanya kenaikan daya keluar PV dan kenaikan efisiensi PV

Tujuan lain dari kajian ini adalah kelayakan ekonomis penggunaan PCM pada sistem BIPV. Dari hasil perhitungan teoretis (tetapi jauh tidak realistis) diperoleh periode pengembalian modal penggunaan PCM mencapai 9 tahun.

Ini berarti bahwa agar lilin lebah sebagai PCM memiliki kelayakan digunakan pada sistem BIPV, perlu dilakukan usaha pengurangan jumlah PCM dengan melakukan analisis peningkatan laju perpindahan panas sehingga meningkatkan laju penyerapan panas.

REFERENSI

- [1] P. Eiffert and G. J. Kiss, *Building-Integrated Photovoltaic Designs for Commercial and Institutional Structures A Sourcebook for Architects*. 2000.
- [2] M. Jun Huang, "The effect of using two PCMs on the thermal regulation performance of BIPV systems," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 95, no. 3, pp. 957–963, 2011.
- [3] P. Hersch and K. Zweibel, *Basic photovoltaic principles and methods*, vol. 58, no. 12. 1982.
- [4] E. Skoplaki and J. A. Palyvos, "On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations," *Solar Energy*, vol. 83, no. 5, pp. 614–624, 2009.
- [5] H. Zondag, "Thermal and Electrical Yield of a Combi-Panel," *Proceedings ISES Solar World Congress*, vol. III, pp. 96–101, 1999.
- [6] P. G. Charalambous, G. G. Maidment, S. A. Kalogirou, and K. Yiakoumetti, "Photovoltaic thermal (PV/T) collectors: A review," *Applied Thermal Engineering*, vol. 27, no. 2–3, pp. 275–286, 2007.
- [7] J. K. Tonui and Y. Tripanagnostopoulos, "Air-cooled PV/T solar collectors with low cost performance improvements," *Solar Energy*, vol. 81, no. 4, pp. 498–511, 2007.
- [8] M. Sandberg, "Cooling of Building Integrated Photovoltaics by Ventilation Air," *IEA-ECB&CS Annex 35*, 1999.
- [9] B. J. Brinkworth, R. H. Marshall, and Z. Ibarahim, "A validated model of naturally ventilated PV cladding," *Solar Energy*, vol. 69, no. 1, pp. 67–81, 2000.
- [10] B. Moshfegh and M. Sandberg, "Flow and heat transfer in the air gap behind photovoltaic panels," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 2, no. 3, pp. 287–301, 1998.

- [11] G. Y. Yun, M. McEvoy, and K. Steemers, "Design and overall energy performance of a ventilated photovoltaic facade," *Solar Energy*, vol. 81, no. 3, pp. 383–394, 2007.
- [12] K. A. Moharram, "Enhancing the performance of photovoltaic panels by water cooling," *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 4, no. 4, pp. 869–877, 2013.
- [13] E. Wilson, "Theoretical and operational thermal performance of a 'wet' crystalline silicon PV module under Jamaican conditions," vol. 34, pp. 1655–1660, 2009.
- [14] M. J. Huang, P. C. Eames, and B. Norton, "Thermal regulation of building-integrated photovoltaics using phase change materials," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 47, no. 12–13, pp. 2715–2733, 2004.
- [15] T. Ma, H. Yang, Y. Zhang, L. Lu, and X. Wang, "Using phase change materials in photovoltaic systems for thermal regulation and electrical efficiency improvement: A review and outlook," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 43, no. April, pp. 1273–1284, 2015.
- [16] H. Bahaidarah, A. Subhan, P. Gandhidasan, and S. Rehman, "Performance evaluation of a PV (photovoltaic) module by back surface water cooling for hot climatic conditions," *Energy*, vol. 59, pp. 445–453, 2013.
- [17] C. Sun, Y. Liu, C. Duan, Y. Zheng, H. Chang, and S. Shu, "A mathematical model to investigate on the thermal performance of a flat plate solar air collector and its experimental verification," *Energy Conversion and Management*, vol. 115, pp. 43–51, 2016.
- [18] S. Dubey, G. S. Sandhu, and G. N. Tiwari, "Analytical expression for electrical efficiency of PV / T hybrid air collector," *Applied Energy*, vol. 86, no. 5, pp. 697–705, 2009.
- [19] L. Aelenei, R. Pereira, H. Gonçalves, and A. Athienitis, "Thermal performance of a hybrid BIPV-PCM: modeling , design and experimental investigation," Elsevier B.V., 2014.
- [20] A. S. Joshi, I. Dincer, and B. V. Reddy, "Thermodynamic assessment of photovoltaic systems," *Solar Energy*, vol. 83, no. 8, pp. 1139–1149, 2009.