

HIBRIDINĖS KONSTRUKCIJOS SAULĖS KOLEKTORIAUS TYRIMAI

Marius MICKEVIČIUS, Vytauto Didžiojo universitetas, Žemės ūkio akademija, Inžinerijos fakultetas,
el. paštas: marius.mickevicius@stud.vdu.lt

Egidijus ZVICEVIČIUS, Vytauto Didžiojo universitetas, Žemės ūkio akademija, Inžinerijos fakultetas,
el. paštas: egidijus.zvicevicius@vdu.lt

Santrauka

Straipsnyje analizuojamos dviejų srautų orinio saulės kolektoriaus, kuriame vietoje absorberio naudojamas fotovoltinis saulės energijos konversijos modulis, charakteristikos. Išnaudojus dviejų skirtingų kolektorių sinergiją, saulės energijos konversijos efektyvumą pavyko padidinti iki $63 \pm 1,20$ proc. Lygiagrečiai gauti elektros energijos ($131,4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$) ir šiluminės energijos ($480,4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$) srautai. Be to, hibridinė saulės energijos konversijos modulis konstrukcija sukūrė palankesnes darbo sąlygas fotovoltiniam moduliui. Esant $978 \pm 1,50 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ apšvietai ir $26,6 \pm 0,42 \text{ }^{\circ}\text{C}$ aplinkos temperatūrai, fotovoltinio modulis paviršiaus temperatūra sumažėjo vidutiniškai $9 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Reikšminiai žodžiai: saulės energija, hibridinis saulės kolektorius, konversijos efektyvumas.

Įvadas

Pagrindinis šių dienų visuomenės poreikis yra energija. Pakankamas jos kiekis skatina pramonę tobulėti ir greičiau vystytis, suteikia technologinį proveržį. Dėl vis didėjančio pasaulinio energijos poreikio ir tradicinio iškastinio kuro suvartojimo, susirūpinimą kelia iš to kylančios aplinkosauginės problemos bei vis dažnėjančios energetikos krizės. Švarių atsinaujinančiųjų energijos išteklių plėtra tapo svarbiu šių problemų sprendimo būdu. Saulės energija yra ekologiška, nebrangi ir gausus atsinaujinantis energijos šaltinis, plačiai prieinamas visiems. Šiuo metu vyksta intensyvi šios srities plėtra. Tačiau iš visos apšvietos, kuri pasiekia fotovoltinį saulės energijos konversijos modulį, elektra paverčiama tik apie 20 proc., o likę 80 proc. virsta šiluma ir yra išspinduliuojami į aplinką (Rahman et al., 2017). Be to, esant aukštai aplinkos ir pačio modulis paviršiaus temperatūrai, reikšmingai sumažėja fotovoltinio modulis generuojamos galios potencialas. Esant $1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ apšvietai, fotovoltiniam moduliui pasiekus $47 \text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūrą, naudingumas gali sumažėti 5 proc., o pasiekus $64 \text{ }^{\circ}\text{C}$ – net 69 proc. (Hasan et al., 2022). Apjungus skirtingos konstrukcijos kolektorius galima pasiekti didesnę spindulinės saulės energijos įsisavinimą ir kolektoriaus efektyvumą.

Tyrimo tikslas – nustatyti fotovoltinį ir orinį kolektorius jungiančio hibridinės konstrukcijos saulės energijos konversijos modulis efektyvumą.

Iškeltam tikslui pasiekti sprendžiami šie **uždaviniai**:

1. Sukurti hibridinės konstrukcijos saulės kolektoriaus tyrimų stendą.
2. Nustatyti sukurto kolektoriaus generuojamus terminės ir elektros energijos srautus.
3. Apskaičiuoti hibridinės konstrukcijos saulės kolektoriaus efektyvumą.

Tyrimų objektas ir metodai

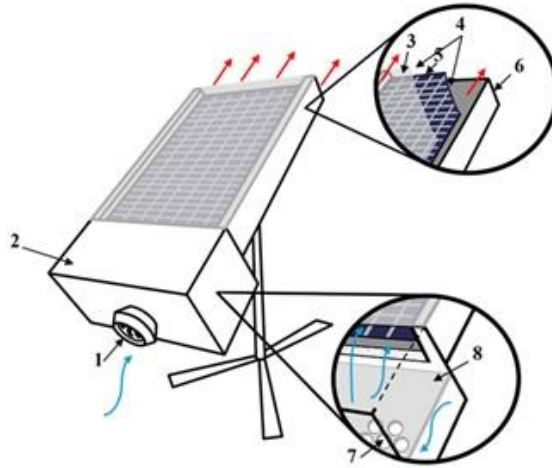
Hibridinio saulės energijos konversijos modulis (žr. 1 pav.) tyrimai buvo atliekami 2024 m. rugpjūčio–rugsėjo mėnesiais. Saulės energijos konversijos modulis buvo sumontuotas ant Vytauto Didžiojo universiteto Žemės ūkio akademijos VIII rūmų stogo, Kauno rajone. Hibridinio saulės konversijos modulis naudingasis plotas $1,998 \text{ m}^2$. Korpuso gamyboje panaudotas ekstruzinis polistireninis putplastis, 5 cm storio „Finnfoam FL-300XX“, šilumos laidumo koeficientas $\lambda_D 0,033 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$. Korpuso vidinė pusė sutvirtinta 3 cm storio poliuretano putų šerdis, su folijos danga „Finnfoam FF-PIR Sauna“, plokšte, kurios šiluminis laidumas $\lambda_D 0,022 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$. Skaidriajai danga buvo panaudotas skaidrus, 8 mm storio kanalinis polikarbonatas.



1 pav. Hibridinio saulės energijos konversijos modulis tyrimų stendas

Fig 1. Hybrid Solar Energy Conversion Module

Hibridinio saulės energijos konversijos modulio tyrimų stendą (žr. 2 pav.) sudaro ventiliatorius, oro sumaišymo slėgio kamera oro srautui paskirstyti ir eksperimentinis hibridinis saulės energijos konversijos modulis.



2 pav. Hibridinio saulės energijos konversijos modulio tyrimų stendo principinė veikimo schema: 1 – ventiliatorius; 2 – oro paruošimo kamera; 3 – polikarbonato dangą; 4 – ortakiai; 5 – fotovoltinis modulis; 6 – apšiltinamasis sluoksnis; 7 – oro padavimo angos; 8 – pertvara

Fig 2. Principle diagram of the hybrid solar energy conversion module test bench: 1 – fan; 2 – air preparation chamber; 3 – polycarbonate coating; 4 – ducts; 5 – photovoltaic module; 6 – insulation layer; 7 – air supply openings; 8 – partition

Šilumnešio tiekimui į oro sumaišymo kamerą buvo panaudotas kanalinis ventiliatorius „Salda VKA 200 LD“, maksimali galia – 0,162 kW, maksimalus našumas – $960 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Oro srauto išlyginimui ir paskirstymui oro sumaišymo kamera buvo padalyta pertvara, kurioje išgręžta dvylika 8 cm skersmens angų. Šilumnešis buvo tiekiamas į apatinę kamerą ir per oro padavimo angas patekdavo į viršutinę oro sumaišymo ir paskirstymo kameros dalį, iš kurios šilumnešis toliau buvo nukreipiamas į kolektoriaus ortakius. Ortakio virš absorberio plotis – 107 cm, aukštis – 3 cm. Ortakio po absorberiu plotis – 107 cm, aukštis – 10 cm. Absorberiui buvo panaudotas fotovoltinis silicio monokristalo modulis „Trina TSM-420DE09R.08“, maksimali generuojama elektros srovės galia – 420 W. Modulį sudaro 144 celės, maksimalus naudingo veikimo koeficientas – 0,21, ilgis – 176,2 cm, plotis – 113,4 cm, darbinė temperatūra – nuo -40°C iki $+85^\circ\text{C}$.

Tyrimu metu aplinkos oro parametrų stebėjimui buvo sumontuoti temperatūros ir santykinio drėgno jutikliai „Ahlborn FHAD46“, analogiški jutikliai buvo sumontuoti oro sumaišymo kameros viršutinėje dalyje ir kolektoriaus ortakiuose prie šilumnešio išteklėjimo angų. Fotovoltinio modulio paviršiaus temperatūros fiksavimui buvo naudojamos termoporos tiek išorinėje tiek nugarinėje modulio pusėje. Saulės apšvietos matavimui šalia hibridinio saulės kolektoriaus sumontuotas apšvietos matuoklis „Ahlborn FLA613-GS“. Analogiškas matuoklis buvo sumontuotas ir po polikarbonatine danga, kad būtų galima fiksuoti saulės spinduliuotės srautą iki ir po polikarbonatine danga. Apšvietos jutikliai sumontuoti tokiu pačiu kampu kaip ir hibridinis modulis. Visi jutikliai buvo pajungti ir duomenys fiksuojami vienos minutės intervalais duomenų kaupiklyje „Almemo 2890“. Fotovoltinis modulis buvo prijungtas prie hibridinio įtampos keitiklio „GreenCell INVSOL01“, generuojamos elektros energijos galios fiksavimui buvo naudojama įtampos keitiklio programinė įranga. Įtampos keitiklis kraudavo „Kepworth“ LiFePO_4 100 Ah akumuliatorių ir užtikrindavo stabilų elektros energijos tiekimą kolektoriaus ventiliatoriui bei duomenų fiksavimo įrangai. Oro greitis hibridiniame saulės energijos konversijos modulio ortakiuose, penkiuose skirtinguose taškuose išilgai kanalo, buvo matuojamas sparnelinio anemometru „Ahlborn FVAD15HMK20“, prijungtu prie duomenų kaupiklio „Almemo 2590“. Hibridinis saulės konversijos modulis buvo sumontuotas ant platformos su keičiama posvyrio kampo ir orientavimo padėtimi, todėl viso tyrimo metu buvo išlaikomas 90° kampas su saulės spindėjimo kryptimi.

Pagal gautus matavimų rezultatus apskaičiuotas per kolektorių pratekantis oro srautas:

$$Q_{oro} = \tilde{v} \cdot \Sigma A_{or}, \quad (1)$$

čia: Q_{oro} – oro srautas, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; $\tilde{v}$ – išmatuotas oro greičių vidurkis ties išteklėjimo ortakijų angomis, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; ΣA_{or} – kolektoriaus ortakijų angų plotų suma, m^2 .

Faktinė šiluminė hibridinio saulės energijos konversijos modulio galia (Azad et al., 2023):

$$P_{th} = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_o - T_i), \quad (2)$$

čia: P_{th} – šiluminė hibridinio saulės kolektoriaus galia, W; $\dot{m}$ – šilumnešio srauto masė, $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$; c_p – specifinė šilumnešio šiluma, $\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$; T_o – ištekančio šilumnešio temperatūra, $^\circ\text{C}$; T_i – įtekančio šilumnešio temperatūra, $^\circ\text{C}$.

Hibridinio saulės energijos konversijos modulio šiluminis efektyvumas (Alshibil et al., 2022):

$$\eta_{th} = \frac{P_{kol}}{GA_{kol}}, \quad (3)$$

čia: η_{th} – hibridinio saulės energijos konversijos modulio šiluminis naudingo veikimo koeficientas; G – apšvietos intensyvumas, $W \cdot m^{-2}$; A_{kol} – kolektoriaus paviršiaus plotas, m^2 .

Fotovoltinio modulio generuojama elektrinė galia:

$$P_{el} = I \cdot V, \quad (4)$$

čia: P_{el} – fotovoltinio modulio generuojama galia, W; I – elektros srovės stipris, A; V – elektros įtampa, V.

Hibridinio saulės energijos konversijos modulio elektrinis efektyvumas (Alshibil et al., 2022):

$$\eta_{el} = \frac{P_{el}}{GA_{kol}}, \quad (5)$$

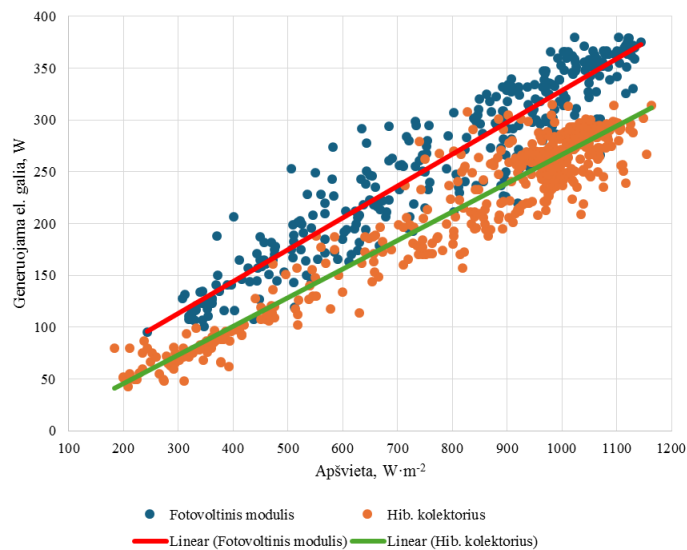
čia: η_{el} – hibridinio saulės energijos konversijos modulio elektros gamybos naudingo veikimo koeficientas; G – apšvietos intensyvumas, $W \cdot m^{-2}$; A_{kol} – kolektoriaus paviršiaus plotas, m^2 .

Remiantis energijos srautų analize, bendras hibridinio saulės energijos konversijos modulio efektyvumas susideda iš šiluminio ir elektros energijos generavimo naudingo veikimo koeficientų ir gali būti užrašomas lygtimi (Fudholi et al., 2018):

$$\eta_k = \eta_{th} + \eta_{el}. \quad (6)$$

Tyrimų rezultatai ir jų aptarimas

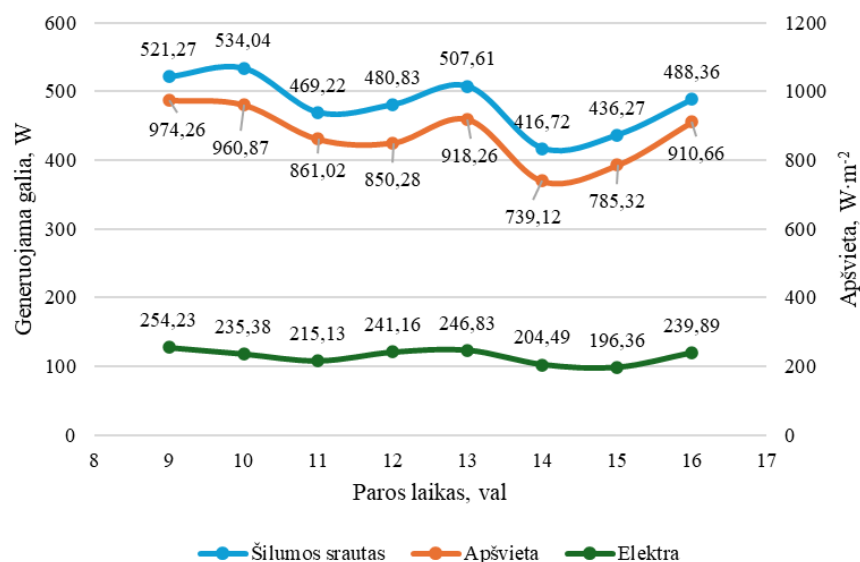
Fotovoltinio modulio generuojama elektros galia priklauso nuo daugelio dalykų: apšvietos, aplinkos oro sąlygų, modulio paviršiaus temperatūros, modulio rūšies ir medžiagų, iš kurių jis pagamintas. Gamintojai pagrindines fotovoltinio modulio charakteristikas pateikia gautas standartinių bandymų metu (angl. STC), kai apšvieta $1000 W \cdot m^{-2}$, modulio paviršiaus temperatūra – $25^\circ C$, šviesos spektras – 1,5 (AM 1,5). 3 paveiksle pateikta bandymu metu gauta fotovoltinio modulio generuojamos elektros galios priklausomybė nuo apšvietos intensyvumo.



3 pav. Generuojamos elektros galios priklausomybė nuo apšvietos intensyvumo

Fig 3. Dependence of the power generation on the intensity of solar radiation

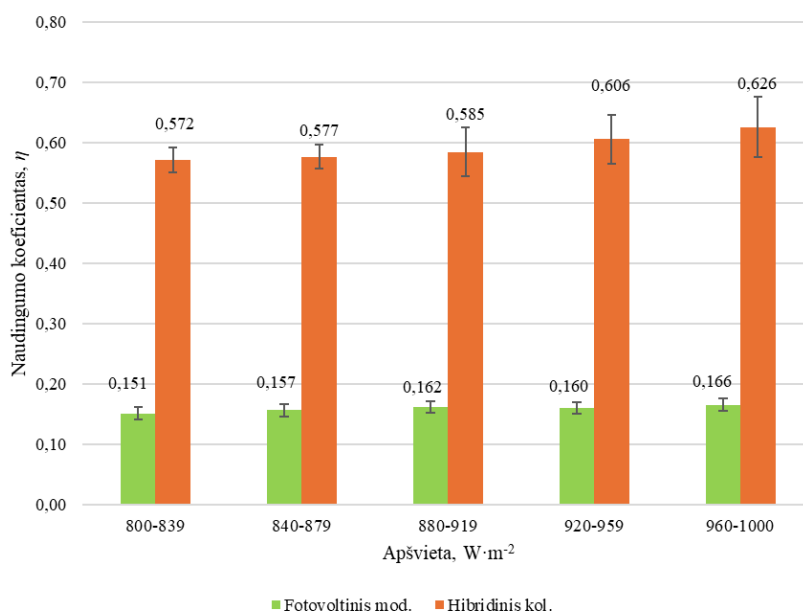
Pateiktame grafike matyti, kad didėjant apšvietai didėja ir fotovoltinio modulio generuojama elektros galia, tik hibridiniame kolektoriuje ji yra vidutiniškai 19 proc. mažesnė dėl apšvietos nuostolių, kuriems įtaką daro polikarbonatinė danga. Didžiausia fotovoltinio modulio, dirbančio įprastinėmis sąlygomis, generuojama galia buvo $380 \pm 7,3 W$, esant $1120 \pm 5,3 W \cdot m^{-2}$ apšvietai, analogiškai hibridiniame saulės energijos konversijos modulyje prie tos pačios apšvietos buvo generuojama $302 \pm 5,2 W$ elektros energijos. Hibridinis saulės energijos konversijos modulis be elektros energijos dar papildomai generavo ir šilumos srautą (žr. 4 pav.), kuris prie vidutinės $1110 \pm 6,55 W \cdot m^{-2}$ apšvietos buvo $604 \pm 14,51 W$.



4 pav. Generuojamos elektros ir šiluminės galios priklausomybė nuo paros laiko
Fig 4. Dependence of the electrical and thermal power generated on the time of day

Pateiktame grafike matoma, kad paros laikas neturi įtakos šiluminės ir elektrinės galios generacijai, nes saulės modulis visą matavimų laiką buvo koreguojamas pagal saulės judėjimo kryptį. Elektros ir šilumos kreivės praktiškai atkartoja apšviestos intensyvumo kreivę, todėl didžiausią įtaką šiems dydžiams turi saulės spinduliuotės intensyvumas.

Hibridinio saulės energijos konversijos modulio vidutinis efektyvumas, esant 800–1000 W·m⁻² apšvietai, sudarė 59,3 % ± 3,4 % (žr. 5 pav.).



5 pav. Fotovoltinio modulio ir hibridinio saulės kolektoriaus naudingumo koeficientų palyginimas
Fig 5. Comparison of PV module and hybrid solar collector efficiencies

Nors hibridinio saulės energijos konversijos modulio elektros generacijos naudingumo koeficientas buvo žemesnis, lyginant su įprastu fotovoltinio modulio veikimo režimu, tačiau sugeneruotas šilumos srautas padidino bendrą sistemos naudingo veikimo koeficientą daugiau kaip 3,5 karto.

Išvados

1. Didžiausias vidutinis, hibridinės konstrukcijos saulės kolektoriaus generuojamas šilumos srautas $480,42 \pm 10,28$ W·m⁻² buvo gautas esant vidutinei $978 \pm 1,5$ W·m⁻² apšvietai. Ortakyje virš absorberio buvo sugeneruotas $189,09 \pm 3,25$ W·m⁻², ortakyje po absorberiu – $291,33 \pm 6,83$ W·m⁻² vidutinis šilumos srautas.

2. Fotovoltinis modulis, dirbdamas įprastinėmis sąlygomis, generavo didžiausią vidutinį elektros energijos kiekį $161,90 \pm 5,18 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, esant vidutinei $982 \pm 7,57 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ apšvietai. Hibridinės konstrukcijos saulės kolektorius atitinkamai – $131,54 \pm 3,16 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, esant vidutinei $978 \pm 1,5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ apšvietai.
3. Efektyviausiai hibridinės konstrukcijos saulės kolektorius dirbo esant vidutinei $978 \pm 1,5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ apšvietai, tuo metu bendras (šiluminės ir elektros energijos) naudingo veikimo koeficientas sudarė $0,63 \pm 0,012$. Gauti rezultatai yra artimi kitų mokslininkų atliktiems tyrimų rezultatams, su panašios konstrukcijos, hibridinio tipo saulės kolektorius (Nazri et al., 2019; Michael et al., 2015).

Literatūra

1. Azad, A. K., & Parvin, S. (2023). Photovoltaic thermal (PV/T) performance analysis for different flow regimes: A comparative numerical study. *International Journal of Thermofluids*, 18, 100319–. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2023.100319>
2. Alshibil, A. M. A., Farkas, I., & Víg, P. (2022). Multi-aspect approach of electrical and thermal performance evaluation for hybrid photovoltaic/thermal solar collector using TRNSYS tool. *International Journal of Thermofluids*, 16, 100222–. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2022.100222>
3. Fudholi, A., Razali, N. F. M., Ridwan, A., Yendra, R., Hartono, Desvina, A. P., ... Sopian, K. (2018). Overview of photovoltaic thermal (PVT) water collector. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, 9(4), 1891–1898. <https://doi.org/10.11591/ijpeds.v9.i4.pp1891-1898>
4. Hasan, K., Yousuf, S. B., Tushar, M. S. H. K., Das, B. K., Das, P., & Islam, Md. S. (2022). Effects of different environmental and operational factors on the PV performance: A comprehensive review. *Energy Science & Engineering*, 10(2), 656–675. <https://doi.org/10.1002/ese3.1043>
5. Michael, J. J., S, I., & Goic, R. (2015). Flat plate solar photovoltaic–thermal (PV/T) systems: A reference guide. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 51, 62–88. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.06.022>
6. Nazri, N. S., Fudholi, A., Mustafa, W., Yen, C. H., Mohammad, M., Ruslan, M. H., & Sopian, K. (2019). Exergy and improvement potential of hybrid photovoltaic thermal/thermoelectric (PVT/TE) air collector. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 111, 132–144. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.03.024>
7. Rahman, M. M., Hasanuzzaman, M., & Rahim, N. A. (2017). Effects of operational conditions on the energy efficiency of photovoltaic modules operating in Malaysia. *Journal of Cleaner Production*, 143, 912–924. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.029>

RESEARCH ON A HYBRID PHOTOVOLTAIC THERMAL SOLAR COLLECTOR

Abstract

This paper analyses the characteristics of a dual flow glazed flat plate solar collector using a photovoltaic solar energy conversion module instead of a regular absorber. By exploiting the synergies between the two different collectors, the solar energy conversion efficiency increased to $63 \pm 1.20\%$. Parallel flows of electrical energy ($131,41 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$) and thermal energy ($480,42 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$) were obtained. In addition, the hybrid design of the solar energy conversion module created more suitable operating conditions for the PV module. At $978 \pm 1,50 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ irradiance and an ambient temperature of $26,6 \pm 0,42 \text{ }^{\circ}\text{C}$, the surface temperature of the PV module decreased by $9 \text{ }^{\circ}\text{C}$ on average.

Keywords: solar energy, hybrid solar collector, photovoltaic thermal (PV/T), conversion efficiency.