

PAVIRŠIAUS UŽTERŠTUMO ĮTAKA SAULĖS MODULIO ENERGINIAM EFEKTYVUMUI

Danas VALENČIUS, Vytauto Didžiojo universitetas, Žemės ūkio akademija, Inžinerijos fakultetas, el. paštas: danas.valencius@vdu.lt

Kęstutis VENSLAUSKAS, Vytauto Didžiojo universitetas, Žemės ūkio akademija, Inžinerijos fakultetas, el. paštas: kestutis.venslauskas@vdu.lt

Santrauka

Šio tyrimo tikslas – nustatyti Lietuvos aplinkai būdingų medžiagų dangos užterštumo įtaką saulės modulio energiniam efektyvumui. Tyrimas buvo atliekamas savadarbiame elektros energijos gamybos stende su dirbtiniu apšvietimo šaltiniu. Saulės modulis (20 W) buvo apšviestas 4 metalo halogeno lempomis, kurių bendroji galia – 140 W. Ant stiklo, dengiančio visą modulio plotą, naudojantis sietu buvo užbarstoma nuo 0 g iki 25 g medžiagos didinant kiekį kas 5 g. Tyrime naudotos medžiagos: juodžemis, ežero pakrantės smėlis, silikatinio blokelių dulkės, maltos avižos. Eksperimento metu modulio paviršiaus temperatūra buvo 25 ± 1 °C. Bandymai atliekami 5 kartus, o jų rezultatų vidurkis pateikiamas su paklaidos verte. Tyrimo metu nustatyta, kad didinant medžiagos kiekį užbarstoma ant paviršiaus modulio įtampa ir srovė mažėja su visomis naudotomis medžiagomis. Mažiausia modulio generuojama galia $0,017 \pm 0,002$ W gaunama užteršiant paviršių 25 g juodžemio. Lyginant užteršto paviršiaus 25 g ežero pakrantės smėliu modulio maksimali galia – $1,37 \pm 0,02$ W yra 79 kartus didesnė. Užteršto paviršiaus 25 g ežero pakrantės smėliu modulio energijos nuostolis siekė $40,85 \pm 1,31$ %, tai yra 1,05 karto mažesnis nei modulio, užteršto 5 g maltų avižų $43,02 \pm 1,8$ %. Didinant paviršiaus užterštumą modulio efektyvumas sumažėjo nuo $6,29 \pm 0,07$ % iki $0,04 \pm 0,01$ %. Didinant medžiagų kiekį ant paviršiaus šviesos pralaidumas mažėja su visomis tyrime naudotomis medžiagomis.

Reikšminiai žodžiai: Dulkės, užterštumas, dirbtinis apšvietimo šaltinis, saulės modulis, energijos nuostoliai.

Įvadas

Didėjant pasauliniam energijos vartojimui nespėjama adekvačiai didinti tradicinių energijos šaltinių, t. y. naftos, gamtinių dujų ir akmens anglių gamybos. Energijos poreikio augimas iš dalies padidino šių išteklių kainą. Lengvai prieinami ištekliai yra baigiami išnaudoti, o naftos, dujų, urano ar anglies išgavimas iš gilesnių, labiau nutolusių nuo vartotojų ar mažiau koncentruotų šaltinių, darosi vis brangesnis. Be to, iškastinio kuro tiekimas priklauso ir nuo politinės situacijos, sprendimų bei tarptautinių santykių. Pastaraisiais dešimtmečiais didėjantis susirūpinimas dėl aplinkos išsaugojimo ir klimato kaitos pasaulį ir Lietuvą paskatino skirti dėmesį energijos gamybai iš atsinaujinančių šaltinių (Europos Parlamentas, 2009). Atsinaujinantys energijos ištekliai sulaukia vis didesnio dėmesio. Vienas iš tiesioginės saulės energijos konversijos į elektros energiją būdų yra fotovoltiniai moduliai, kurie mažina žalingą poveikį aplinkai. Vienas iš esminių veiksnių, turintis įtakos saulės elektrinių efektyvumui, yra susikaupiančios dulkės ir purvas ant fotovoltinių modulių paviršiaus. Šie nešvarumai sumažina absorbuojamos šviesos kiekį, dėl paviršiaus užteršimo metinės energijos gamybos kiekis gali sumažėti iki 10 % (Markvart, 2003). Net ir po trumpo modulių buvimo lauke, pavyzdžiui, 2 mėnesiai be lietaus ir valymo energijos gamyba gali sumažėti maždaug 6,5 % (Sarver ir kt., 2013).

Tyrimo tikslas – ištirti paviršiaus dangos užterštumo įtaką saulės modulio energiniam efektyvumui.

Išsikeltam tikslui pasiekti sprendžiami šie **uždaviniai**:

1. Sukonstruoti fotovoltinės elektrinės stendą su dirbtiniu šviesos šaltiniu, sukuriant vienodą matavimų aplinką.
2. Nustatyti medžiagų ir jų kiekio ant modulio paviršiaus poveikį įtampai, srovės stipriui, galiai, energijos nuostoliams, modulio efektyvumui, šviesos pralaidumui.

Tyrimų objektas ir metodai

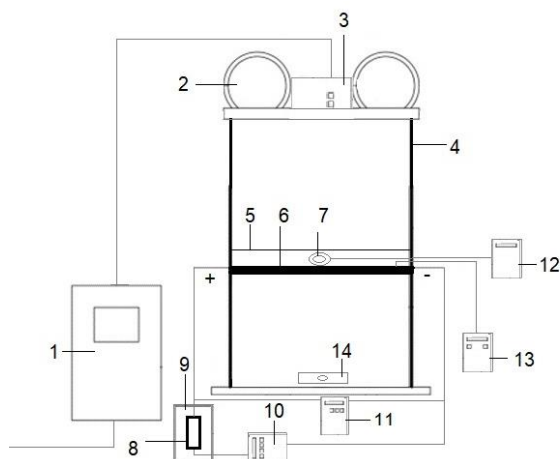
Tyrimų objektas – polikristalinis fotovoltinis modulis Victron Energy SPP040201200, kurio matmenys – $440 \times 350 \times 25$ mm, svoris 1,9 kg, nominali galia 20 W. Prie 1000 W/m^2 apšvietos maksimalios galios įtampa 18,4 V, maksimalios galios srovė 1,09 A, atviros grandinės įtampa 21,96 V, trumpo jungimo srovė 1,18 A. Tyrimai atlikti uždaroje aplinkoje esant $20 \pm 0,5$ °C temperatūrai Kauno rajone, Giraitėje. Tyrimui atlikti sukurtas fotovoltinės elektrinės stendas su dirbtiniu šviesos šaltiniu, kuriame imituojamas elektros energijos gamybos procesas. Elektrinės stendo su dirbtiniu šviesos šaltiniu komponentai nurodyti 1 lentelėje. Fotovoltinės sistemos schema pateikta 1 paveiksle. Tyrimui naudoti dulkių mėginiai: juodžemis, ežero pakrantės smėlis, silikatinio blokelių dulkės, maltos avižos.

1 lentelė. Fotovoltinės sistemos su dirbtiniu apšvietimo šaltiniu komponentai.

Table 1. Components of a photovoltaic system with an artificial lighting source.

Komponentai	Gamintojas	Modelis
Saulės modulis	Victron energy	SPP040201200
Lempos	Osram	HCI-TF 35 W/930 WDL PB
Balastai	Osram	POWERTRONIC PT-FIT 35/240 S
UPS įtampos stabilizatorius	Vertiv	LIEBERT PSP500MT3-240U

Fotovoltinio tyrimo standą (žr. 1 pav.) sudaro uždaras medinis korpusas (4), kuris užtikrina, kad į modulio paviršių nepatektų išorinė šviesa. Stende įrengtos 4 metalo halogeno lempos, kurių bendroji galia 140 W (2). Joms paleisti naudojami elektroniniai balastai (3). UPS įtampos stabilizatorius skirtas tiekti nepertraukiamą $240 \pm 1V$ įtampą (1). Stiklas virš fotovoltinio modulio (5) skirtas dulkių mėginiais tolygiai paskirstyti, uždengiantis fotovoltinio modulio paviršių (6). Apšvietos matuoklis naudojamas nustatyti šviesos pralaidumą per užterštą paviršių (14). Apšvietos matuoklio daviklis atliekant matavimus padedamas tiksliai fotovoltinio modulio matavimų vietoje (7). Naudojant paviršiaus temperatūros matuoklį (13) nuolat stebima modulio paviršiaus temperatūra, siekiant viso eksperimento metu išlaikyti $25 \pm 1^{\circ}C$. Sukurti apkrovai prie fotovoltinio modulio prijungta varža (vielinis 10 W 100 Ω rezistorius) (8) patalpinta į talpą su šaldymo elementais (9), taip sumažinant varžos kaitimą. Multimetras srovei (10) jungiamas nuosekliai prie varžos ir fotovoltinio modulio, o multimetras įtampai (11) – lygiagrečiai.



1 pav. Tyrimo standas: 1 – UPS įtampos stabilizatorius, 2 – metalo halogeno lempos, 3 – elektroninis balastas metalo halogeno lempoms, 4 – uždaras medinis korpusas, 5 – stiklas, 6 – FV modulis, 7 – apšvietos matuoklio daviklis, 8 – varža, 9 – talpa varžai vėsinti, 10 – skaitmeninis multimetras (srovės matavimui), 11 – skaitmeninis multimetras (įtampos matavimui), 12 – apšvietos matuoklis 13 – skaitmeninis multimetras (paviršiaus temperatūros matavimui), 14 – apšvietos matuoklis liuksometras.

Fig. 1. Research stand: 1 – UPS voltage stabilizer, 2 – metal halide lamps, 3 – electronic ballast for metal halide lamps, 4 – closed wooden case, 5 – glass, 6 – PV module, 7 – irradiance meter sensor, 8 – resistance, 9 – capacity for cooling resistance, 10 – Digital multimeter (for current), 11 – Digital multimeter (for voltage), 12 – irradiance meter 13 – Digital multimeter (for surface temperature). 14 - light meter luxmeter.

Nustatant mėginio masę, svėrimui naudojamos svarstyklės TSC01731C (svėrimo ribos: max – 100 g, paklaida – 0,001 g). Srovė matuojama naudojantis Multimetru UT71A (matavimo ribos 200 μA -10 A, tikslumu $\pm 0,2\%$). Įtampos reikšmės nustatomos Multimetru UT139C (matavimo ribos 200 mV-600 V, paklaida $\pm 0,5\%$). Temperatūros multimetru jutiklio (ribos $-40^{\circ}C$ iki $1000^{\circ}C$, $\pm 1\%$ tikslumas). Apšvietumo matuoklis Velleman DVM401 (matavimo diapazonas 0–200000 lx; 0–9999 lx paklaida $\pm 2,0\%$; >10000 lx paklaida $\pm 3,0\%$). Apšvietos reikšmei nustatyti naudotas matuoklis ALMEMO 2890-9 (matavimo diapazonas 1–1200 W/m^2).

Eksperimentinis tyrimas su dulkių mėginiais pradedamas išmatuojant trumpo jungimo srovę ir atviros grandinės įtampą. Toliau nustatoma apšvieta fotovoltinio modulio vietoje po švairiu stiklu, naudojantis multimetrais gaunamos srovės ir įtampos reikšmės. Pirmieji 5 g tiriamojo mėginio naudojantis sietu išbarstomi tolygiai ant stiklo paviršiaus, nustatoma apšvietos reikšmė ir gaunamos įtampos ir srovės vertės. Po tiriamuoju mėginiu, padengtu stiklu, išmatuojama ir apšvieta liuksometru, o rezultatai sulyginami su švaraus stiklo apšvietos rodmenimis. Šviesa gali sklisti tik per stiklą. Proporcijos būdu, nustatomas šviesos pralaidumas, rezultatas nurodomas procentine išraiška. Veiksmai kartojami ant stiklo paviršiaus pridendant po 5 g mėginio medžiagos, kol pasiekiamas 25 g kiekis. Prieš keičiant mėginio tipą stiklas nuvalomas ir pasveriamas nuvalytas medžiagos kiekis, taip užtikrinama, ar nebuvo padaryta svėrimo klaidų pridendant mėginius ant paviršiaus. Matavimai kartojami su visais 4 tiriamaisiais mėginiais. Tarp matavimų atliekamos pertraukos, taip išlaikant fotovoltinio modulio paviršiaus temperatūrą $25 \pm 1^{\circ}C$. Bandytas buvo kartojamas 5 kartus, rezultatuose pateikiamas matavimų vidurkis su paklaida.

Fotovoltinio modulio veikimas įvertinamas pagrindiniais parametrais: įtampa ir srovė. Parametrai kinta nuo fotoelementų temperatūros ir šviesos kiekio, patenkančio ant fotovoltinio modulio paviršiaus. Generuojama galia yra šių kintamųjų sandauga (Muhammed ir kt., 2013).

$$P=I \cdot V; \quad (1)$$

čia: P – generuojama galia [W]; I – srovė [A]; V – įtampa [V].

FV modulio efektyvumas nusako šviesos energijos patenkančios ant modulio paviršiaus, procentinę dalį kuri paverčiama į elektros energiją - apskaičiuojama pagal lygtį (Muhammed ir kt. 2013):

$$\eta = \frac{P}{A \cdot E}; \quad (2)$$

čia: η – FV modulio efektyvumas [%], A – modulio plotas [m^2], E – apšvieta [W/m^2]. A reikšmė gaunama sudauginus modulio ilgį ir plotį.

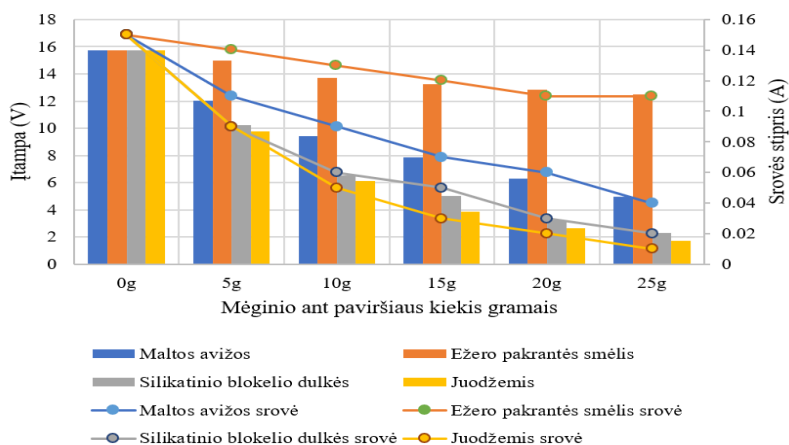
Šviesos pralaidumas reiškia šviesos kiekį, kuris gali sėkmingai praeiti per stiklą ar kitas medžiagas.

$$\eta = 100 - \left(\frac{\check{S}_{vid} \cdot 100}{\check{S}_{vi\check{s}or}} \right) \quad (3)$$

čia: η – šviesos pralaidumas procentais [%]; \check{S}_{vid} – šviesos kiekis praėjęs pro švarų stiklą [lx]; $\check{S}_{vi\check{s}or}$ – šviesos kiekis praėjęs pro užterštą stiklą [lx].

Tyrimų rezultatai ir jų aptarimas

Maksimali modulio generuojama galia su uždengtu švarių stiklu – $2,33 \pm 0,01$ W, galios nuostolis $14,68 \pm 0,4$ % lyginant, kai maksimali galia be stiklo – $2,73 \pm 0,01$ W. Apšvieta modulio paviršiaus vietoje po stiklu buvo $50 W/m^2$ mažesnė nei be stiklo, kurios išmatuota vertė $290 W/m^2$. Generuojama galia gaunama sudauginant modulio srovę ir įtampą. Šie parametrai nustatomi atliekant matavimus naudojantis multimetrais tyrimo metu (žr. 2 pav.).

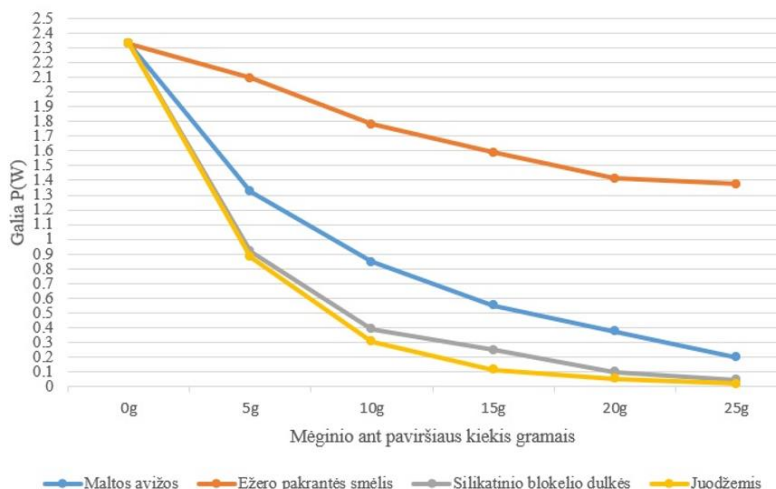


2 pav. Įtampos ir srovės priklausomybė nuo tyrimo medžiagos kiekio ant paviršiaus.

Fig. 2. Dependence of voltage and current on the amount of the test substance on the surface

Didžiausią įtampą $15,51 \pm 0,24$ V ir srovę $0,15 \pm 0,001$ A modulis generuoja su švarių paviršiumi. Mažiausia įtampa $1,73 \pm 0,11$ V, o srovės $0,01 \pm 0,0001$ A reikšmė gaunama paviršių padengiant 25 g juodžemio. Didžiausia užteršto paviršiaus įtampa $14,96 \pm 0,12$ V, kai srovė $0,14 \pm 0,001$ A buvo užbarstant 5 g ežero pakrantės smėlio.

Generuojama galia priklauso nuo modulio įtampos ir srovės (Bouaïcha ir kt., 2010). Grafike (žr. 3 pav.) pateikta saulės modulio generuojamoji galia, priklausomai nuo skirtingų medžiagų kiekio ant jo paviršiaus.



3 pav. Galios priklausomybė nuo tyrimo medžiagos kiekio ant paviršiaus.

Fig. 3. Dependence of the power on the amount of the test substance on the surface.

Mažiausia generuojama galia $0,017 \pm 0,002$ W buvo gauta išbarstant juodžemio sluoksnį ant stiklo, kurio kiekis buvo 25 g. Šis rezultatas atspindi didžiausią galios nuostolį tarp visų tyrimo mėginių, siekiantį $99,26 \pm 0,06$ %. Didžiausia modulis generuojama galia su užterštu paviršiumi – $2,094 \pm 0,08$ W, kai ant paviršiaus buvo 5 g ežero pakrantės smėlio. Šis rezultatas rodo mažiausią galios nuostolį, siekiantį $9,98 \pm 1,5$ %, lyginant su švairiu paviršiumi (žr. 2 lentelę).

2 lentelė. Galios nuostolių suvestinė.

Table 2. Power loss summary.

Mėginio kiekis, g	Mėginio tipas			
	Maltos avižos	Ežero pakrantės smėlis	Silikatinio blokelių dulkės	Juodžemis
	Energijos nuostoliai %			
0	0			
5	$43,02 \pm 1,8$	$9,98 \pm 1,5$	$60,43 \pm 0,98$	$62,2 \pm 1,1$
10	$63,6 \pm 1,41$	$23,45 \pm 1,1$	$83,16 \pm 0,25$	$86,85 \pm 0,3$
15	$76,32 \pm 0,9$	$31,66 \pm 1,5$	$89,23 \pm 0,4$	$95,02 \pm 0,1$
20	$83,8 \pm 0,35$	$39,24 \pm 1,12$	$95,8 \pm 0,2$	$97,73 \pm 0,11$
25	$91,51 \pm 0,31$	$40,85 \pm 1,31$	$97,99 \pm 0,11$	$99,26 \pm 0,06$

Mažiausias galios nuostolis gaunamas paviršių padengiant ežero pakrantės smėliu nuo $9,98 \pm 1,5$ % iki $40,85 \pm 1,31$ %. Didžiausias galios nuostolis susidaro paviršių apibarstant juodžemiu nuo $62,2 \pm 1,1$ % iki $99,26 \pm 0,06$ %. Modulis patiria $43,02 \pm 1,8$ % energijos nuostolius, kai ant paviršiaus išbarstoma 5 g maltų avižų, o tai yra 1,4 karto mažesnis nuostolis, nei 5 g silikatinio blokelių.

Tyrimo naudojamo modulis efektyvumas esant 240W/m^2 apšvietai nurodytas 3 lentelėje.

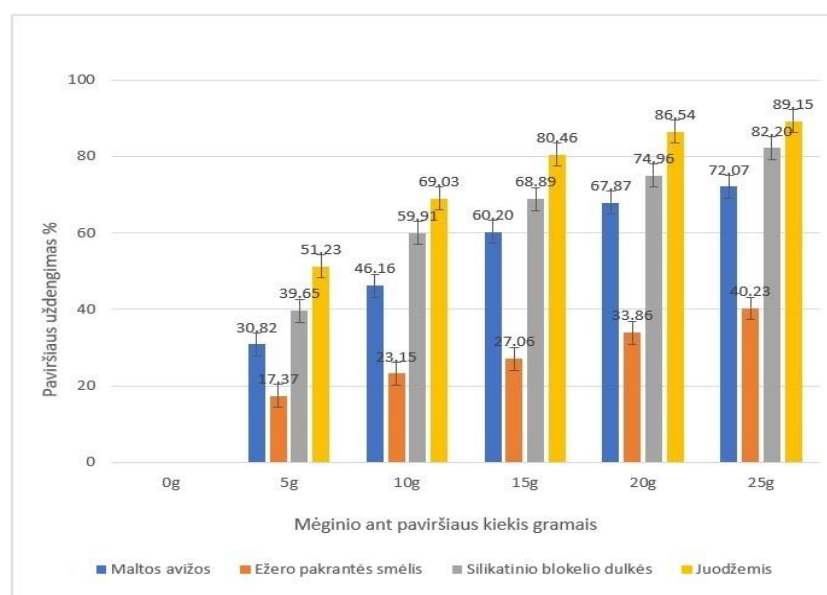
Didžiausias efektyvumas $5,57 \pm 0,2\%$ su užterštu paviršiumi yra išberiant 5 g ežero pakrantės smėlio. Mažiausias efektyvumas buvo $0,04 \pm 0,01$ %, kai paviršius užterštas 25 g juodžemio.

3 lentelė. Modulis efektyvumas esant 240W/m^2 apšvietai.

Table 3. Module efficiency at 240W/m^2 irradiance.

Mėginio kiekis, g	Mėginio tipas			
	Maltos avižos	Ežero pakrantės smėlis	Silikatinio blokelių dulkės	Juodžemis
	Modulio efektyvumas %			
0	$6,29 \pm 0,07$			
5	$3,59 \pm 0,16$	$5,57 \pm 0,2$	$2,49 \pm 0,13$	$2,38 \pm 0,11$
10	$2,29 \pm 0,11$	$4,82 \pm 0,22$	$1,06 \pm 0,06$	$0,83 \pm 0,06$
15	$1,49 \pm 0,09$	$4,3 \pm 0,18$	$0,68 \pm 0,05$	$0,31 \pm 0,03$
20	$1,02 \pm 0,04$	$3,82 \pm 0,15$	$0,26 \pm 0,02$	$0,14 \pm 0,02$
25	$0,53 \pm 0,06$	$3,72 \pm 0,13$	$0,13 \pm 0,03$	$0,04 \pm 0,01$

Paviršiaus uždengimas procentais nurodo, koks kiekis šviesos patenka per užterštą paviršių į modulį (žr. 4 pav.). Nuo šviesos, patenkančios į modulį, priklauso jo energijos gamybos galimybės (Darwish, 2013).



4 pav. Paviršiaus uždengimo priklausomybė nuo mėginio kiekio.

Fig. 4. Dependence of surface coverage on sample amount.

Didžiausias kiekis šviesos pasiekė modulio paviršių, kai stiklas buvo užterštas 5 g smėlio, o paviršiaus uždegimas siekė $17,37 \pm 2,2$ %. Mažiausias kiekis šviesos pateko ant paviršiaus su 25 g juodžemio, kai paviršiaus uždegimas buvo $89,15 \pm 3,1$ %.

Išvados

1. Sukonstruotas fotovoltinės saulės elektrinės stendas, naudojantis 4 halogeno lempas, kaip šviesos šaltinį. Stende po stiklu, ant kurio buvo beriami mėginiai, modulio padėties vietoje apšvieta buvo 240 W/m^2 .
2. Modulio generuojama galia tiesiogiai priklausė nuo įtampos ir srovės, tai lėmė, kad didinant kiekvieno mėginio kiekį ant stiklo paviršiaus modulio generuojama galia mažėjo. Lyginant užteršto paviršiaus 25 g ežero pakrantės smėlio modulio maksimali galia – $1,37 \pm 0,02 \text{ W}$, kai modulio su 25 g juodžemio galia $0,017 \pm 0,002 \text{ W}$.
3. Užteršto paviršiaus 25 g ežero pakrantės smėliu modulio energijos nuostolis siekė $40,85 \pm 1,31$ % ir yra 1,05 karto mažesnis nei modulio, užteršto 5 g maltų avižų $43,02 \pm 1,8$ %.
4. Didinant paviršiaus užterštumą nuo 0 g iki 25 g modulio efektyvumas sumažėjo nuo $6,29 \pm 0,07$ %, esant švariam paviršiui, iki $0,04 \pm 0,01$ % su 25 g juodžemio užterštu paviršiumi.
5. Paviršiaus uždegimas yra priklausomas nuo medžiagos kiekio ant paviršiaus. Didinant medžiagų kiekį ant paviršiaus šviesos pralaidumas mažėja su visomis tyrime naudotomis medžiagomis.

Literatūra

1. Bouaïcha, M., Ksouri, M., Sellami, A., Zagrouba, M. 2010. Identification of PV solar cells and modules parameters using the genetic algorithms: Application to maximum power extraction. *Solar Energy* Vol. 84, iss. 5, p. 860–866.
2. Darwish, Z. A. 2013. Impact of some environmental variables with dust on solar photovoltaic: Review and research. *International Journal of Energy and Environment*, Vol. 7(4), p. 152–159.
3. Europos Parlamentas. Atsinaujinančiųjų išteklių energija. Prieiga per internetą: [Atsinaujinančiųjų išteklių energija | Faktų apie Europos Sąjungą suvestinės | Europos Parlamentas \(europa.eu\)](#) (žiūrėta 2023 02 16).
4. Markvart, T. 2003. *Practical Handbook of Photovoltaic - Fundamentals and Applications*. Oxford, Elsevier Ltd, p. 518.
5. Muhammed, J. M., Syed, A. M. 2013. Effect of dust accumulation on the power outputs of solar photovoltaic modules. *Renewable Energy*. Vol. 60, p. 633–636.
6. Sarver, T., Al-Qaraghuli, A., Kazmerski, L. L. 2013. A comprehensive review of impact of dust on the use of solar energy: History, investigations, results, literature and mitigation approaches. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 22, p. 698–733.

INFLUENCE OF SURFACE CONTAMINATION ON THE ENERGY EFFICIENCY OF THE SOLAR MODULE

Summary

The aim of this study is to determine the influence of coating contamination from materials characteristic of the Lithuanian environment on the energy efficiency of the solar module. The research was carried out in a self-made electricity production stand with an artificial lighting source. The solar module (20 W) was illuminated by four metal halogen lamps with a total power of 140 W. On the glass covering the entire area of the module, 0 g to 25 g of material was sprinkled using a sieve, increasing the amount in increments of 5 g. Materials used in the study: black soil, lakeshore sand, silicate block dust, ground oats. During the experiment, the surface temperature of the module was 25 ± 1 °C. Tests are performed 5 times and the average of their results is given with the error value. During the study, it was found that increasing the amount of material sprinkled on the surface of the module decreases the voltage and current with all the materials used. The minimum power generated by the module of $0.017 \pm 0.002 \text{ W}$ is obtained by contamination of the surface with 25 g of black earth. In comparison, the maximum power of $1.37 \pm 0.02 \text{ W}$ of the 25 g lakeshore sand on the module surface is 79 times higher. The energy loss of the module contaminated with 25 g of lake shore sand was 40.85 ± 1.31 %, which is 1.05 times lower than that of the module contaminated with 5 g of ground oats 43.02 ± 1.8 %. With increasing surface contamination, the module efficiency decreased from 6.29 ± 0.07 % to 0.04 ± 0.01 %. As the amount of materials on the surface increases, the light transmission decreases with all materials used in the study

Keywords: Dust, pollution, artificial light source, solar module, energy loss.