

Razvoj novog koncepta fotonaponskog-toplinskog kolektora sa organskim fazno promjenjivim materijalom

Sandro Nižetić¹, Mišo Jurčević¹

¹Sveučilište u Splitu, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje, Ruđera Boškovića 32, 21000 Split

Sažetak: U radu se prezentira dizajn novog fotonaponskog-toplinskog kolektora (FTK) koji je razvijen u sklopu znanstvenog projekta financiranog od Hrvatske zaklade za znanost. Hibridno hlađenje podrazumijeva pasivni (fazno-promjenjivi materijal-FPM) i aktivni (vodeno hlađenje) pristup hlađenju s ugrađenim sustavom pametne regulacije. Novopredloženi FTK dizajn sastoji se od četiri rashladna bloka ispunjena organskim fazno-promjenjivim materijalom, tj. svinjskom mašču kao organskim FPM. U blokove su integrirane ravne cijevi s vodom u ulozi radnog fluida. Integralna evaluacija dizajna FTK kolektora uzima u obzir energetska učinkovitost te ekonomske i ekološke aspekte. FTK dizajn je eksperimentalno ispitan u uvjetima mediteranske klime na geografskoj lokaciji u gradu Splitu. Sustav je eksperimentalno monitoriran nekoliko mjeseci pri čemu je maksimalna postignuta ukupna energetska učinkovitost ispitivanog sustava iznosila 62,2% (očekivana prosječna godišnja ukupna energetska učinkovitost je niža od 50%). Ekonomska analiza je pokazala da se nivelirani trošak ukupno proizvedene energije iz FTK kolektora kreće u rasponu od 0,056 €/kWh do 0,083 €/kWh uz vrijeme povrata investicije od 4 godine.

Ključne riječi: fotonaponski-toplinski kolektor, fazno promjenjivi materijal, hlađenje, obnovljivi izvori energije

1. Uvod

Poticanje primjene obnovljivih izvora energije [1] iznimno je važno sa stajališta nužne energetske tranzicije [2], u cilju racionalizacije potrošnje ograničenih fosilnih resursa a time i smanjena štetnog utjecaja u okoliš energetskih tehnologija baziranih na uporabi fosilnih goriva [3]. U konačnici, krajnji cilj je potpuni prelazak s fosilnih tehnologija na čiste energetske tehnologije bazirane na obnovljivim izvorima energije

je. Pored navedenog iznimno je važno i osigurati povećanje energetske učinkovitosti postojećih energetskih tehnologija kao i u domeni sustava za skladištenje energije. Sukladno trenutnim trendovima, tj., gledano na globalno instalirane energetske kapacitete obnovljivih izvora energije, fotonaponske elektrane prednjače, a prate ih vjetroelektrane. Primjerice prema [4] samo u 2022. godini oko 90% od sveukupno dodanih kapaciteta obnovljivih izvora energije odnosi se upravo na fotonaponske sustave i vjetroelektrane. Prema istoj analizi solarni kapaciteti su u 2022. pridonijeli u iznosu od preko 180 GW novo instaliranih kapaciteta, dok su vjetroelektrane pridonijele u iznosu od oko 75 GW. Vidljiva je dominacija solarnih kapaciteta u odnosu na druge obnovljive izvore energije, a takav se scenarij rasta očekuje i u narednim dekadama, sukladno ciljevima energetske tranzicije. Trenutno ukupno godišnje dodani solarni kapaciteti primarno se odnose na fotonaponske elektrane a u cilju povećanja proizvodnje električne energije obnovljivim putem, dok su solarni toplinski sustavi ipak bitno manje zastupljeni u sveukupno dodanim kapacitetima na godišnjoj razini. Proizvodnja električne energije iz fotonaponskih elektrana danas je uglavnom većinski bazirana na upotrebi silicijskih fotonaponskim tehnologija. Radi se o najstarijim ali i najpouzdanijim fotonaponskim tehnologijama uz razumnu ekonomsku prihvatljivost te široku dostupnost globalno. Silicijske fotonaponske tehnologije pojavljuju se na tržištu u dvije najčešće varijante, tj., u vidu mono ili poli kristalnih fotonaponskih panela (FN). Mono-kristalni fotonaponski paneli imaju veću učinkovitost od polikristalnih ali i veću tržišnu cijenu jer se kod proizvodnje istih pojavljuje veća količina škartu uz veću energiju potrebnu za proizvodnju. Učinkovitost silicijskih fotonaponskih tehnologija je u realnim uvjetima obično manja od 20%, [5]. Na učinkovitost fotonaponskih tehnologija utječe značajno i radna temperatura fotonaponskog panela kao i okoliš u kojem je smještena fotonaponska elektrana. Naime, kod povišenih radnih temperatura fotonaponskih panela pojavljuje se degradacija učinkovitosti, a koja se obično kreće u rasponu od 0,4%/°C to 0,6%/°C za najčešće korištene silicijske fotonaponske tehnologije [6]. U pogledu degradacije učinkovitosti najosjetljivije su upravo poli-kristalne fotonaponske tehnologije, koje su u posljednjoj dekadi bile i najšire zastupljene, pogotovo kod elektrana viših nazivnih instaliranih električnih snaga. Primjenom različitih tehnologija hlađenja, kao primjerice aktivnih [7] ili pasivnih [8] tehnika, moguće je smanjiti degradaciju učinkovitosti, ali i povećati životni vijek FN panela. Trenutno u smislu proizvodnih kapaciteta danas dominiraju mono kristalni silicijski paneli s nominalnim električnim nazivnim snagama preko 400 W po panelu. Globalno gledano većina instaliranih FN panela je u azijskoj regiji, odnosno primarno Kini a na koju otpada približno polovina od ukupno nadodanih kapaciteta fotonaponskih elektrana. Nadalje, većina vodećih proizvođača fotonaponskih tehnologija se upravo nalazi u Kini koja dominira svjetskom proizvodnjom. Jedan od velikih nadolazećih izazova fotonaponskih tehnologija, a s obzirom na značajan rast ukupno globalno instaliranih kapaciteta, je i problem recikliranja istih, [9]. Naime, trenutne tehnologije recikliranja fotonaponskih panela su ekonomski nepovoljne i praćene su značajnim štetnim utjecajima na okoliš [10]. S druge strane FN panel spada pod opasan otpad i ne može se tek tako "baciti" u okoliš. Sukladno procjena-

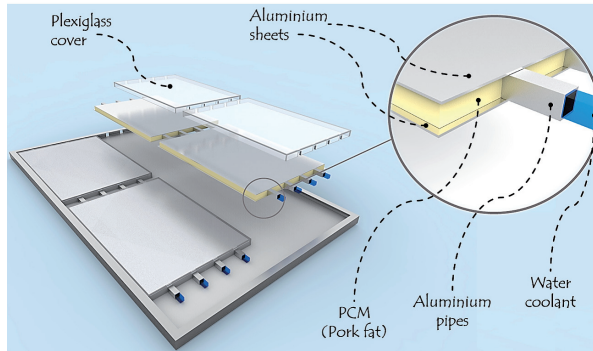
ma IRENA međunarodne asocijacije do kraja 2050. očekuje se oko 78 miliona tona otpada od dotrajalih fotonaponskih elektrana [11]. Stoga, recikliranje fotonaponskih sustava je jedan od najznačajnijih problema koji se mora unaprijediti kako bi se smanjili troškovi recikliranja i umanjio nepovoljan utjecaj na okoliš. U smislu primjene danas se fotonaponske tehnologije najčešće koriste u vidu fotonaponskih elektrana, primjerice krovnih ili samostojećih, ali sve više se razvija i širenje njihove primjene i na druga područja kao primjerice u slučaju fotonaponskih plutajućih elektrana (*Floating Photovoltaics*) [12] ili koncepta agri-fotonapona (*Agrivoltaics*) koji se koristi u primjeni kod proizvodnje hrane [13]. U cilju povećanja ukupne učinkovitosti, kao i mogućnosti pokrivanja potreba za električnom i toplinskom energijom, razvijeni su fotonaponski toplinski sustavi (FTK) [14]. Glavna prednost FTK sustava je mogućnost proizvodnje više oblika energije na istoj osunčanoj površini putem fotonaponsko-toplinskog kolektora (FTK), a što značajno povećava ukupnu učinkovitost. Takvi sustavi pogodni su primjerice upravo za kućanstva gdje postoje potrebe za toplinskom i električnom energijom ili općenito u primjenama gdje postoje navedene energetske potrebe, a mogu se pokriti primjenom FTK sustava. U nekoliko zadnjih godina razvijane su različite varijante FTK kolektora u cilju povećanja toplinske i električne učinkovitosti, ali i osiguranja fleksibilnosti s obzirom na različite trenutne prohtjeve za toplinskom i električnom energijom. Glavni trenutni izazov FTK sustava je smanjivanje specifičnog troška instalacije koji je uglavnom preko 300 €/m² [15] ovisno o specifičnom dizajnu. Smanjivanju troška može se doprinijeti boljim dizajnom FTK kao ključnog dijela FTK sustava. Trenutni tržišno dostupni koncepti FTK sustava osiguravaju povećanje električne učinkovitosti do 20% (gledano u odnosu na referenti, tj., neohlađeni FN panel), dok se toplinska učinkovitost za većinu konceptata kreće obično u rasponu od 50% do 70%. S različitim dizajnom FTK kolektora postižu se i različita povećanja električne i toplinske učinkovitosti, a gdje je suštinski dizajn upravo potrebno prilagoditi prohtjevima, tj., specifičnim potrebama za toplinskom i električnom energijom.

U ovom radu prezentiran je koncept novo razvijenog solarnog-toplinskog kolektora s organskim fazno promjenjivim materijalom (svinjska mast) razvijenom u sklopu znanstvenog projekta financiranog od strane Hrvatske zaklade za znanost. Prezentirani su i podaci eksperimentalnog istraživanja novo razvijenog koncepta FTK u okolnostima Mediteranske klime na geografskoj lokaciji grada Splita.

2. Novo razvijeni koncept fotonaponskog-toplinskog kolektora

Glavna karakteristika novo razvijenog koncepta FTK kolektora je specifični dizajn u kojem se primjenjuje fazno promjenjivi materijal (FPM). Primijenjeni FPM je organskog podrijetla tj., svinjska mast. Glavni razlog korištenja svinjske masti kao FPM-a je značajno niža jedinična cijena (€/kg) u odnosu na komercijalno dostupne FPM, a koji su obično na bazi parafina, praćeni relativno viskom jediničnom cijenom koja se

kreće obično u rasponu od 5 €/kg do 15 €/kg. Nadalje, u pitanju je i okolišni aspekt s obzirom da je proizvodnja komercijalnih FPM-a na bazi parafina povezana s nepovoljnim utjecajima po okoliš. U tome pogledu primijenjena svinjska mast predstavlja prihvatljivije rješenje po okoliš. Sami koncept dizajna FTK kolektora prikazan je na Slici 1.

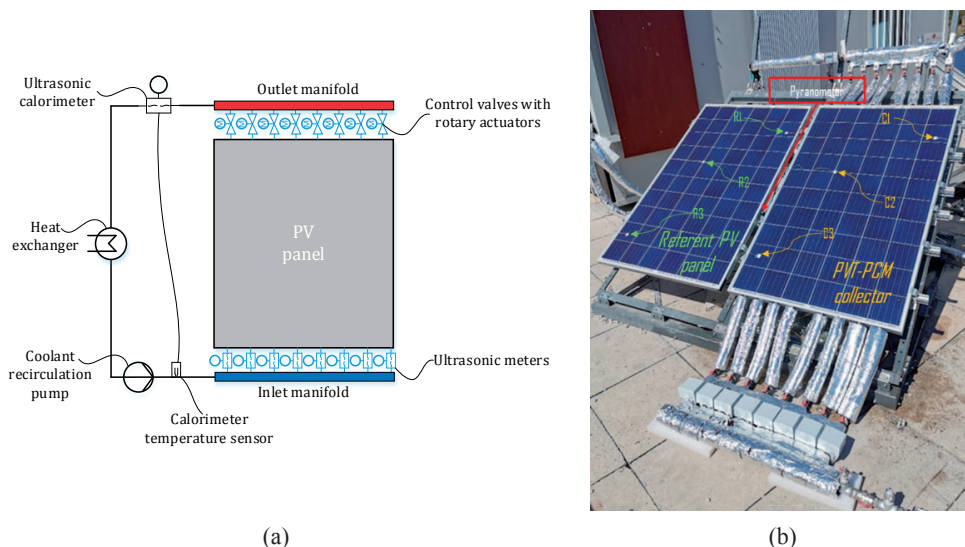


Slika 1: Shematski prikaz koncepta dizajna FTK [16]

Dizajn FTK kolektora sastoji se iz četiri specifična rashladna bloka koja su ispunjena FPM-om, te u kojima se nalaze po četiri aluminijске cijevi kroz koje protječe voda. Dizajn s više blokova hlađenja omogućava učinkovitiju toplinsku regulaciju sloja FPM-a. Upravo je glavni razlog inkorporiranja aluminijških cijevi u dizajn osiguravanje učinkovitijeg toplinskog menadžmenta sloja FPM, a s obzirom na generalan problem toplinske inercije FPM-a kod ovakvih primjena. Svaka cijev ima osiguranu mogućnost pre-definiranog masenog protoka vode putem ugrađenih aktuatora, a čime se osigurava mogućnost fleksibilnijeg balansiranja omjera proizvedene toplinske i električne energije. Naime, grijanjem FN panela opada električna učinkovitost, kako je već prije naglašeno u uvodnom dijelu, međutim dolazi do porasta toplinske učinkovitosti. Stoga, u pogledu performansi upravo je ključno poznavanje trenutnih potreba za električnom i toplinskom energijom, odnosno putem specifičnog dizajna potrebno je i moguće osigurati sustav koji se uspješno prilagođava trenutnim potrebama. Glavna novina predloženog dizajna u odnosu na postojeća rješenja je korištenje četiri odvojena bloka hlađenja, te po prvi puta eksperimentalno ispitana te primijenjena svinjska mast u realnim radnim okolnostima. Predloženi dizajn je koristan i s aspekta cirkularne ekonomije s obzirom da nakon određenog vremena svinjska mast postaje otpad, a ovako bi se taj otpad mogao upotrijebiti dalje u korisnu svrhu. Naravno, jedno od ključnih pitanja u tom pogledu je stabilnost toplinskih svojstava svinjske masti u duljem vremenskom periodu, a što iziskuje svakako dodatna ciklička ispitivanja.

3. Eksperimentalni postav

Eksperimentalno istraživanje na novom FTK-FPM kolektoru je provedeno od kolovoza 2021. do siječnja 2022. u gradu Splitu (Hrvatska) koji ima vlažnu suptropsku i mediteransku klimu. Za potrebe ispitivanja novog FTK koncepta razvijen je eksperimentalni postav čija je shema dana na Slici 2 (a). Voda, nakon što preuzme toplinu iz kolektora, prolazi kroz regulacijske ventile i izlazni razdjelnik te ulazi u izmjenjivač topline, gdje se toplina predaje okolini. Izmjenjivač topline je relativno jednostavan i sastoji se od konvektivno hlađenog radijatora s ventilatorom koji se automatski uključuje nakon pokretanja recirkulacijske pumpe. Praćenje inducirane topline u kolektoru se izvodi s ultrazvučnim kalorimetrom dok je detaljniji uvid u ovaj mehanizam moguć zahvaljujući termoparovima na ulazima i izlazima cijevi kolektora. FTK-FPM kolektor i referentni polikristalni PV panel (275 Wp) su inklinirani pod kutom od 27° te orijentirani prema jugu. Za oba sustava, struje i naponi su mjereni pri fiksnom opterećenju kako bi se odredila proizvedena električna energija pomoću dva YoctoWatt USB vatmetra. Dva otpornika od $4,7 \Omega$ nazivne snage 1,0 kW korištena su kao opterećenja kako bi se oba sustava približila točki maksimalne snage. Nominalno, FN paneli imaju nazivnu struju (I_{MPP}) od 8,5 A i nazivni napon (U_{MPP}) od 32,38 V u standardnim ispitnim uvjetima (STC) s tolerancijom struje i napona od $\pm 3\%$ [17].



Slika 2: Shema eksperimenta (a) i eksperimentalni postav (b) [17]

Termoparovi K-tipa korišteni su na površinama FN panela i FTK kolektora, dok je T-tip korišten za praćenje temperature FPM-a i vode. Temperature su mjerene na

svim površinama panela i kolektora, ali zbog geometrijske složenosti stražnje strane FTK-FPM kolektora temperature su uspoređivane samo na prednjim površinama, Slika 2 (b). Tri termopara K tipa (R1, R2 i R3) postavljena su na prednju površinu referentnog FN panela, dok su tri termopara K tipa (C1, C2, C3) pričvršćena na prednju površinu kolektora. U uskom procjepu između panela i kolektora postavljen je piranometar Apogee Sp-420 za kontinuirano praćenje sunčevog zračenja. Svi senzori i mjerni uređaji odgovarajuće točnosti spojeni su na računalo za kontinuirano prikupljanje podataka.

4. Rezultati mjerenja i diskusija

Kao što je prethodno navedeno, FTK-FPM sustav funkcionira u dva različita režima rada. Primarni način rada koristi pasivnu metodu koja koristi organski FPM, specifično, svinjsku mast. Ovaj način rada radi neovisno sve dok temperatura FPM-a ne dosegne 40 °C, kada se pokreće aktivno vodeno hlađenje. Tijekom ljeta i povremeno u jesen automatski se uključuje aktivni način rada zbog veće izloženosti sunčevoj svjetlosti i povišenih temperatura. Razlika u performansama između referentnog FN panela i novog kolektora analizirana je temeljitim ispitivanjem mjernih podataka za deset dominantno vedrih dana u svakom od šest razmatranih mjeseci, Tablica 1.

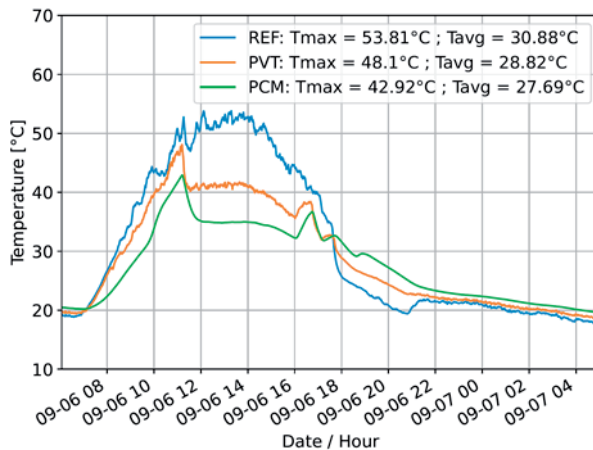
Očekivano, oba sustava su najviše energije proizveli u kolovozu s obzirom da je u tom mjesecu emitirano najviše sunčeve energije. Vršna električna učinkovitost FN panela u kolovozu iznosila je 12%, dok je za FTK-FPM kolektor iznosila 12,4%. Osim toga, kolektor je proizveo 45.208,7 Wh korisne topline s vršnom toplinskom učinkovitošću od 49,8%. U rujnu su zabilježene niže temperature zraka zbog manje ukupne insolacije, pa je kolektor proizveo samo 24.338,1 Wh topline. S padom dnevnih temperatura u rujnu, električna učinkovitost FN panela i kolektora se povećala u odnosu na kolovoz. Tijekom ova dva mjeseca, kolektor je proizveo više električne energije od referentnog FN panela uz generiranje korisne topline, što je rezultiralo vršnom ukupnom učinkovitošću od 62,2%. Od listopada do siječnja prevladavajući način rada bio je pasivan budući da nije postignut prag aktivacije pumpe. U tom su razdoblju kolektor i FN panel imali gotovo identičnu električnu učinkovitost. Sveukupno, u šezdeset dana tijekom šest mjeseci, FTK-FPM kolektor proizveo je 64.278,8 Wh električne energije, skromnih 804,9 Wh više od PV panela, ali je također razvio dodatnih 69.546,8 Wh korisne toplinske energije.

Tijekom sunčanih, vedrih ljetnih dana sa sporim do umjerenim vjetrovima, očekuju se najbolje performanse FTK-FPM sustava [17]. U tu svrhu analizirani su izmjereni podaci za 6. rujna 2021. Izmjerena je ukupna insolacija od 7269,4 Wh/m² uz prosječnu dnevnu temperaturu zraka od 25,6 °C, vlažnost od 38%, te brzinu vjetra od 6,2 km/h. Najviša temperatura zraka iznosila je 30 °C, a vjetar je puhao brzinom od 24,1 km/h. Tijekom cijelog dana nije bilo zasjenjenja i oblaka uz maksimalnu insolaciju iznad 1000 W/m².

Tablica 1: Proizvodnja energije i učinkovitost referentnog FN panela i FTK-FPM kolektora

Mjesec	Insolacija		Ukupna električna energija				Ukupno generirana toplina		Vršna električna učinkovitost		Vršni toplinski učinak		Vršna ukupna učinkovitost	
	Wh m ⁻²	Wh	FN panel		FTK-FPM		Wh	Wh	FN panel		FTK-FPM		%	%
			Wh	Wh	Wh	Wh			%	%				
Kolovoz 2021.	73.128,0	14.136,4	14.651,0	14.651,0	45.208,7	12,0	12,4	49,8	62,2					
Rujan 2021.	65.424,5	13.152,4	13.481,7	13.481,7	24.338,1	12,7	12,9	29,8	42,6					
Listopad 2021.	59.629,3	12.450,5	12.378,6	12.378,6	0,0	13,3	13,2	0,0	13,2					
Studeni 2021.	32.170,4	6.103,5	6.132,0	6.132,0	0,0	13,4	13,5	0,0	13,5					
Prosinac 2021.	36.669,7	7.262,7	7.256,2	7.256,2	0,0	13,0	12,9	0,0	12,9					
Siječanj 2022.	48.293,9	10.368,4	10.379,3	10.379,3	0,0	13,5	13,5	0,0	13,5					
Ukupno	315.315,8	63473,9	64.278,8	64.278,8	69.546,8									

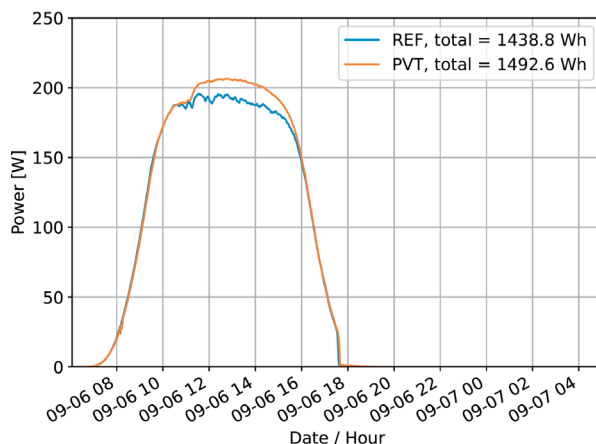
Jutarnja temperatura, prije izlaska sunca, referentnog FN panela (pozicija R2) i FTK-FPM kolektora (pozicija C2) bila je oko 20 °C, s tim da je potonji bio nešto topliji, Slika 3. Nakon izlaska sunca, referentni FN panel je imao brži porast temperature dok je porast temperature FTK-FPM kolektora bio sporiji zbog toplinske inercije FPM-a (svinjske masti). Oko 11 sati temperatura FPM-a dosegla je aktivacijski prag cirkulacijske pumpe. Insolacija je bila jako izražena tijekom dana pa je rashladni sustav tek oko 16 sati uspio smanjiti temperaturu FPM-a ispod donje granice od 33 °C, nakon čega se pumpa isključila. Pumpa se ponovo uključila oko 17 sati, ali je radila dosta kratko jer se pred kraj dana insolacija bitno smanjila. Utjecaj toplinske inercije FPM-a je vidljiv nakon zalaska sunca budući da temperatura FTK kolektora u sredini prednje površine ostaje viša od temperature referentnog FN panela. Iz raspodjele temperature na prednjoj površini referentnog panela i kolektora vidljivo je da je kolektor kontinuirano hladniji u aktivnom i pasivnom režimu rada. Primjetno je znatno manje temperaturnih oscilacija kolektora u usporedbi s FN panelom kao rezultat toplinske inercije FPM-a.



Slika 3: Temperatura FN panela i FTK-FPM kolektora 6. rujna 2021. [17]

Učinak nižih temperatura vidljiv je na dijagramu proizvodnje električne energije gdje je FTK-FPM kolektor proizveo ukupno više električne energije, Slika 4.

Tijekom razmatranog dana FTK-FPM kolektor je proizveo 1492,6 Wh električne energije, pri tom nadmašivši proizvodnju FN panela od 1438,8 Wh. FTK-FPM kolektor nije proizveo znatno više električne energije u pasivnom dijelu rada zbog visoke učinkovitosti baznog FN panela i relativno niske degradacije električne učinkovitosti zbog temperature. U aktivnom režimu, tijekom dva perioda rada pumpe, FTK-FPM kolektor je uz električnu energiju ukupno proizveo i 3351,1 Wh korisne topline što predstavlja dodatni energetska benefit FTK sustava.



Slika 4: Električna energija proizvedena 6. rujna 2021. [17]

5. Zaključak

U ovom radu prezentiran je novo razvijeni koncept fotonaponskog toplinskog kolektora. Novo predloženi dizajn je karakterističan po tome što se u konceptu koristi svinjska mast kao fazno promjenjivi materijal organskog podrijetla. Korištenje svinjske masti je ekonomski značajno povoljnije u odnosu na komercijalno dostupne fazno promjenjive materijale na bazi parafina, ali i isto tako povoljnije sa stajališta utjecaja na okoliš. Dizajn fotonaponskog toplinskog kolektora omogućio je fleksibilno balansiranje proizvedene električne i toplinske energije. Analiza ekonomske isplativosti novopredloženog koncepta pokazale je kako se jedinični trošak ukupno proizvedene energije kreće u rasponu od 0,056 do 0,083 €/kWh, uz očekivano vrijeme povrata investicije od cca. 4 godine. U svrhu daljnjeg unaprijeđenja koncepta, potrebno je izvršiti optimizaciju sloja fazno promjenjivog materijala uz isto tako provedbu cikličkih ispitivanja toplinskih svojstava svinjske masti.

Napomena: Ovaj rad je financiran sredstvima Hrvatske zaklade za znanost, projekt IP-01-2018-2814.

6. Literatura

- [1] Qusay, H.; Sameer, A.; Aws Zuhair, S.; Al-Musawi, T.J.; Al-Jiboory, A.K.; Salman, H.M.; Ali, B.M.; Jaszczur M.: A comprehensive review of international renewable energy growth, *Energy and Built Environment*, (2024) in the press, doi: 10.1016/j.enbenv.2023.12.002
- [2] Saraji, M.K.; Dalia S.: Challenges to the low carbon energy transition: A systematic literature review and research agenda, *Energy Strategy Reviews*, **49** (2024), 101163, doi: 10.1016/j.esr.2023.101163

- [3] Herzog-Hawelka, J.; Joyeeta Gupta.: The role of (multi)national oil and gas companies in leaving fossil fuels underground: A systematic literature review, *Energy Research & Social Science*, **103** (2024) 103194, doi: 10.1016/j.erss.2023.103194
- [4] IRENA: <https://www.irena.org/Publications/2022/Jul/Renewable-Energy-Statistics-2022>, ISBN: 978-92-9260-446-2
- [5] ISE.FRAUNHOFER: <https://www.ise.fraunhofer.de/en/publications/studies/photovoltaics-report.html>, last update Feb 21, (2023)
- [6] Grubišić-Čabo, F.; Nižetić, S.; Marco, T.G.: Photovoltaic panels: A review of the cooling techniques, *Transactions of Famena*, **40** (2016) 63-74
- [7] Nižetić S.; Giama E.; Papadopoulos A.M.: Comprehensive analysis and general economic-environmental evaluation of cooling techniques for photovoltaic panels, Part II: Active cooling techniques, *Energy Conversion and Management*, **155** (2018) 301-323, doi: 10.1016/j.enconman.2017.10.071
- [8] Nižetić S.; Giama E.; Papadopoulos A.M.: Comprehensive analysis and general economic-environmental evaluation of cooling techniques for photovoltaic panels, Part I: Passive cooling techniques, *Energy Conversion and Management*, **149** (2017) 334-354, doi: 10.1016/j.enconman.2017.07.022
- [9] Prichard M.; Tembo, V.S.: Current trends in silicon-based photovoltaic recycling: A technology, assessment, and policy review, *Solar Energy*, **259** (2023) 137-150, doi: 10.1016/j.solener.2023.05.009
- [10] Mao, D.; Yang, S.; Ma, L.; Wenhui M.; Yu, Z.; Xi, F.; Yu, J.: Overview of life cycle assessment of recycling end-of-life photovoltaic panels: A case study of crystalline silicon photovoltaic panels, *Journal of Cleaner Production*, **434** (2024) 140320, doi: 10.1016/j.jclepro.2023.140320
- [11] IRENA: <https://www.irena.org/publications/2016/Jun/End-of-life-management-Solar-Photovoltaic-Panels>, (2016)
- [12] Sahu, A.; Yadav, N.; Sudhakar, K.: Floating photovoltaic power plant: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **66** (2016) 815-824, doi: 10.1016/j.rser.2016.08.051
- [13] Widmer, J.; Christ, B.; Grenz, J.; Norgrove, L.: Agrivoltaics, a promising new tool for electricity and food production: A systematic review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **192** (2024) 114277, doi: 10.1016/j.rser.2023.114277
- [14] Gao, Y.; Wu, D.; Dai, Z.; Wang, C.; Chen, B.; Zhang, X.: A comprehensive review of the current status, developments, and outlooks of heat pipe photovoltaic and photovoltaic/thermal systems, *Renewable Energy*, **207** (2023) 539-574, doi: 10.1016/j.renene.2023.03.039.
- [15] Nižetić, S.; Jurčević, M.; Čoko, D.; Arıcı, M.; Hoang, A.T.: Implementation of phase change materials for thermal regulation of photovoltaic thermal systems: Comprehensive analysis of design approaches, *Energy*, **228** (2021) 120546, doi: 10.1016/j.energy.2021.120546
- [16] Jučević, M.; Nižetić, S.; Marinić-Kragić, I.; Miće Jakić, Arıcı, M.: Towards resilient operation of photovoltaic-thermal collector with incorporated organic phase change material: Numerical and experimental investigation, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, **60** (2023) 103465, doi: 10.1016/j.seta.2023.103465
- [17] Jurčević, M.; Nižetić, S.; Čoko, D.; Arıcı, M.; Hoang, A.T.; Giama, E.; Papadopoulos, A.: Techno-economic and environmental evaluation of photovoltaic-thermal collector design with pork fat as phase change material, *Energy*, **254** (2022) 124284, doi: 10.1016/j.energy.2022.124284