

**SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, STROJARSTVA I
BRODOGRADNJE**

**POSLIJEDIPLOMSKI DOKTORSKI STUDIJ
STROJARSTVA**

KVALIFIKACIJSKI ISPIT

**Povećanje učinkovitosti fotonaponske
pretvorbe energije**

Filip Grubišić Čabo

Split, 29. lipnja 2018.

SADRŽAJ

1. UVOD	2
2. TOPLINSKI MODEL FOTONAPONSKOG MODULA	3
2.1. OSNOVE TOPLINSKOG TOKA NA FOTONAPONSKOM MODULU	3
2.2. EFEKT DEGRADACIJE UČINKOVITOSTI	5
3. TEHNIKE REGULACIJE TEMPERATURE FN MODULA	6
3.1. AKTIVNE TEHNIKE	6
3.1.1. Aktivne tehnike hlađenja vodom	7
3.1.2. Aktivne tehnike hlađenja zrakom.....	8
3.1.3. Ostale aktivne tehnike.....	9
3.2. PASIVNE TEHNIKE	9
3.2.1. Pasivne tehnike hlađenja vodom	9
3.2.2. Pasivne tehnike hlađenja zrakom.....	10
3.2.3. Ostale pasivne tehnike	11
4. POTENCIJAL TEHNIKA REGULACIJE TEMPERATURE FN MODULA	12
5. ZAKLJUČAK.....	14
6. LITERATURA.....	15
7. SAŽETAK.....	17

1. UVOD

Svjetske potrebe za energijom iz dana u dan sve više rastu. Pogotovo je to slučaj u zemljama u razvoju, (zemlje Azije i Afrike) čiji nivo energetske proizvodnje još nije ni približno jednak razvijenim zemljama. U budućnosti će sigurno energetske potrebe i tih zemalja intenzivno rasti, uzevši u obzir kolika je prosječna potrošnja energije po stanovniku u razvijenim zemljama [1]. Može se pretpostaviti da će zemlje u razvoju, na ovaj ili onaj način, doseći energetske potrošnje razvijenih zemalja do 2050.

Neovisno o novim metodama uštede energije (u prvom redu električne), porast potrebe za energijom i energentima stvara veliki pritisak na proizvodnju energije. Uzevši u obzir strukturu proizvodnje energije, i činjenicu da većina zemalja u razvoju nema razvijenu proizvodnju kao ni distribucijsku infrastrukturu, stvarni smjer razvoja globalnog energetskog rješenja još nije vidljiv.

U znanstvenoj zajednici, pak, prisutan je konsenzus o tome da su obnovljivi izvori energije neminovna budućnost proizvodnje energije, kao i njene distribucije. U obnovljive izvore mogu se svrstati vodni potencijali u općem smislu, geotermalna energija, energija vjetera te Sunčeva energija. Energija dobivena fuzijom može se također smatrati obnovljivim tipom energije, međutim, faza razvoja takvog izvora energije ne dopušta da ga se uvrsti u ozbiljno razmatranje energetskih rješenja.

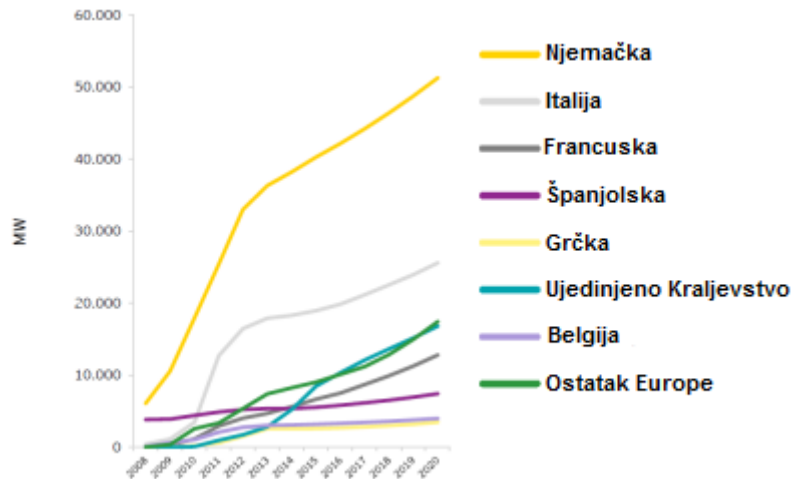
Kada se u obzir uzme utjecaj fosilnih goriva (ugljen, nafta, plin, radioaktivni materijal), može se zaključiti da će globalna energetska slika obuhvaćati značajno veći udio obnovljivih izvora. Značajan utjecaj na to ima i snažna lokalizacija proizvodnje energije, koja će dugoročno izmijeniti energetske infrastrukturnu sliku. Obnovljivi izvori energije izuzetno su pogodni za lokalizaciju proizvodnje, jer su uvelike dostupni izoliranim i nerazvijenim zajednicama.

Razvijene zemlje također vlastitu energetske neovisnost postepeno grade na obnovljivim izvorima. Jedan od temeljnih stupova budućih energetskih sustava biti će i obnovljivi izvori na bazi fotonaponske pretvorbe. Fotonaponska pretvorba energije predstavlja jedan od najefikasnijih načina konverzije Sunčeve energije (kao praktički jedinog pravog izvora obnovljive energije). Ovaj efekt poznat je već od kraja 19. stoljeća, a svoju komercijalnu primjenu doživljava u drugoj polovici 20. stoljeća. Efikasnost ovoga načina konverzije očituje se u nepostojanju posrednika pri prijenosu energije (zrak, voda, ...) što mu je ujedno i najveća mana, jer praktički ne postoji adekvatan način akumulacije energije (kao primjerice kod vodnog potencijala, ili biomase).

Najčešće korišten materijal pri fotonaponskoj pretvorbi jest silicij [2] te je kao takav najinteresantniji za razmatranje. Prema Fraunhofer institutu [3], oko 94% ugrađenih panela jesu paneli na bazi silicijske tehnologije, i to oko 70% zasnovane na tehnologiji polikristalnih silicijskih ćelija, prosječne efikasnosti od 12% (realni uvjeti) do 17% (laboratorijski uvjeti). Sigurno je da značajan iskorak u fotonaponskim tehnologijama još neće zamijeniti silicijsku tehnologiju, te ona srednjeročno predstavlja budućnost fotonaponskih sustava.

Fotonaponskom tehnologijom na bazi silicija baviti će se i ovaj rad. Silicijske fotonaponske tehnologije spadaju u fotonaponsku tehnologiju prve generacije. U drugu generaciju spadaju CdTe tehnologije te CIS/CIGS tehnologije. Treća generacija obuhvaća hibride između organskih i anorganskih tehnologija, koji se još uvijek nalaze u eksperimentalnoj fazi. Povećanje efikasnosti fotonaponske pretvorbe promjenom i modifikacijom materijala neće biti predmet ovoga rada.

Trenutno najveća ulaganja u fotonaponske tehnologije jesu u razvijenim ekonomijama. U Europi fotonaponske tehnologije prevladavaju u razvijenim zemljama, i to prvenstveno u zemljama koje nemaju veliku količinu sunčanih dana, u odnosu na druge dijelove Europe, i Svijeta.



Slika 1.1. - Procjena instaliranih kapaciteta fotonaponskih tehnologija za zemlje EU [4]

Trenutno je u svijetu instalirano preko 400 GWp fotonaponskih kapaciteta, a predviđanja do 2050. očekuju i do 5000 GWp instaliranih kapaciteta, a kojih bi više od pola bilo u Indiji i Kini [5].

Glavni problemi trenutne masovne implementacije fotonaponskih elektrana je problem skladištenja energije, visoka početna investicija u sustav (između 3-3,5 USD/W za kućanstva te 2,2 do 2,6 USD/W za velike sustave), relativno niska učinkovitost u odnosu na dozračenu energiju te problem pregrijavanja fotonaponskog modula što doprinosi obaranju električne efikasnosti. Efikasnost fotonaponske pretvorbe uvelike ovisi o temperaturi na kojoj se fotonaponska ćelija nalazi. Za tehnologije bazirane na siliciju, ta ovisnost se kreće približno 0,25%/°C do 0,5%/°C [6]. Učinkovitost fotonaponske pretvorbe također ovisi i o tipu potrošača, načinu spajanja fotonaponskog sustava u električni krug te o elektroničkoj kontroli radnih parametara sustava. Metode povećanja učinkovitosti fotonaponske pretvorbe vezane za manipulaciju elektroničkih parametara (a kako je opisano u prethodnoj rečenici) neće biti predmet razmatranja ovoga rada.

S ciljem da bi se podigla efikasnost fotonaponske pretvorbe, značajna je aktivnost uložena u razvijanje tehnologija operativnog hlađenja fotonaponskih ćelija. U nastavku će se ovaj rad baviti pregledom postojećih tehnika regulacije temperature fotonaponskih panela.

2. TOPLINSKI MODEL FOTONAPONSKOG MODULA

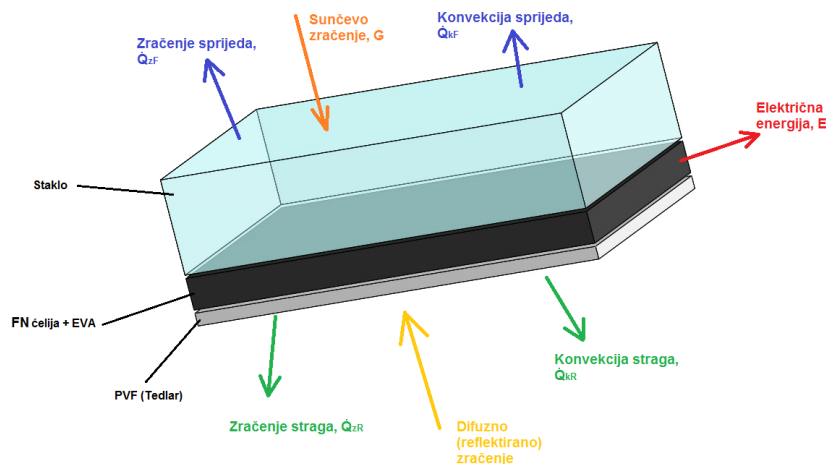
2.1. OSNOVE TOPLINSKOG TOKA NA FOTONAPONSKOM MODULU

Fotonaponski (FN) modul predstavlja tehničku jedinicu koja obuhvaća više fotonaponskih ćelija u međusobnoj vezi (serijskoj ili paralelnoj). U pravilu se poluvodički element silicija, spojen od dva sloja, -p i -n silicija, nalazi između sloja prozirnog materijala sa prednje strane (staklo, polipropilen, ...) te sloja nosive plastike sa stražnje strane (poli-vinil fluorid ili plastike sličnih karakteristika). Silicijska ćelija je između ova dva sloja dodatno učvršćena smjesom na bazi etil-vinil acetata (ili smjesom sličnih svojstava). Na Slici 2.1. prikazan je tipični fotonaponski modul te njegovi sastavni dijelovi.



Slika 2.1. - Fotonaponski (FN) modul i njegovi dijelovi [7]

FN modul u eksploataciji nalazi se u pravilu u zoni najintenzivnijeg Sunčeva zračenja, pod optimalnim kutem koji omogućava najveću obasjanost aktivne plohe, a time i generiranje najveće količine električne energije. Slika 2.2. prikazuje energetska bilancu prosječnog panela, promatranu na jednom segmentu.



Slika 2.2. - energetska bilanca na segmentu panela

Na Slici 2.2. vidi se da su primarni toplinski tokovi na fotonaponskom panelu vezani za konvekciju i radijaciju, dok se kondukcija kroz fotonaponski nosač u pravilu zanemaruje, jer je njen iznos sigurno za dva reda veličine manji od prethodna dva mehanizma toplinskog toka.

Ukoliko se zanemari topl. tok sa bočnih strana (s obzirom da je bočna površina fotonaponskog panela zanemariva), toplinski tok, (odnosno energetski tok) može se podijeliti na tri ključna segmenta: Toplinski tok sa prednje strane, toplinski tok sa stražnje strane te tok električne energije. U smislu odvođenja topline, tok električne energije ne treba se razmatrati, s obzirom na to da taj iznos predstavlja koristan rad fotonaponskog modula.

Prednja strana izmjenjuje toplinu sa okolnim zrakom, bilo prirodnom bilo prisilnom (a u pravilu je uvijek prisilna) konvekcijom, te u općem smislu ovisi o koeficijentu prijelaza topline te temperaturama površine panela i okolnog zraka. Izmjena topline zračenjem sa

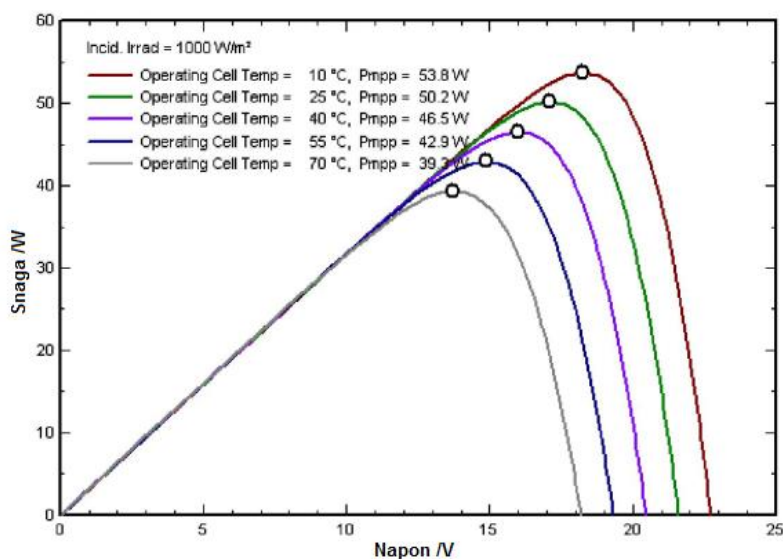
prednje strane nije točno definiran proces, jer uvelike ovisi o meterološkom stanju iznad panela, izgledu horizonta (zgrade, stabla, prepreke, ...). Također, u ovisnosti o postotku vlage i prašine u zraku, točan koeficijent emisivnosti atmosfere, kao i referentnu temperaturu komplicirano je određivati te se nadalje tom problematikom ovaj rad neće baviti.

Stražnja strana također izmjenu vrši konvekcijom sa okolnim zrakom, ali je, s obzirom da su strujanja zraka ispod panela značajno slabija, odvođenje topline ovim mehanizmom slabije. Toplinski tok zračenjem vrši izmjenu topline sa stražnjom stijenkom iza fotonaponskog modula. Stražnja stijenka je u pravilu zid ili krov, ili kod velikih solarnih farmi, tlo.

2.2. EFEKT DEGRADACIJE UČINKOVITOSTI

Kako je u uvodu već istaknuto, efikasnost fotonaponske pretvorbe ovisi o temperaturi na kojoj se FN ćelija nalazi. Za silicijske tehnologije, ta ovisnost se giba po zakonitosti od približno $0,25\%/^{\circ}\text{C}$ za tehnologije amornog silicija, $0,4\%/^{\circ}\text{C}$ za tehnologije mono-kristalnog silicija te $0,5\%/^{\circ}\text{C}$ za tehnologije poli-kristalnog silicija [6]. Ova karakteristika fotonaponskog panela gotovo nikad nije pouzdano deklarirana od proizvođača, nego se daje kao referentna vrijednost. Drugim riječima - ne ispituje se na komercijalnim panelima.

U načelu, ćelija na većoj temperaturi doživljava porast izlazne struje, ali i vidljivi pad napona, što u konačnici rezultira manjom snagom [8]. Na slici 2.3. slikovito se vidi pad izlazne snage u odnosu na operativnu temperaturu FN ćelije.



Slika 2.3. - ovisnost izlazne snage FN modula o operativnoj temperaturi [8]

Ovaj efekt naziva se efektom degradacije učinkovitosti usljed porasta operativne temperature, i predstavlja značajan problem u fotonaponskoj pretvorbi. Ovaj efekt u isto vrijeme predstavlja i paradoks fotonaponskih sustava, a to je da pri najvećoj količini Sunčeva zračenja (ljeti), fotonaponske ćelije imaju najmanju efikasnost, zbog visoke operativne temperature. Obrnuto, u zimskom periodu, za sunčanih dana, izlazna snaga fotonaponskih sustava često premaši nazivnu snagu sustava, i za 15% veći iznos snage od nazivne.

Nazivna snaga fotonaponskog modula deklarirana je od proizvođača, kao snaga dobivena u laboratorijskim uvjetima stalnog zračenja (1000 W/m^2), i strujanja zraka stalne temperature 24°C brzinom od 1m/s . Naravno, stvarna situacija je značajno drugačija, te stoga fotonaponski sustavi gotovo nikad u praksi nemaju nominalnu efikasnost od oko 17%, nego se ista u pravilu giba između 9-12%.

Prethodno napisani iznosi govore da, ukoliko se cijeli fotonaponski modul ohladi za 1°C, njegova će efikasnost porasti za oko 0,5% (za poli-kristalni silicij, koji se najčešće primjenjuje u praksi). Iako je poli-kristalni silicij najosjetljiviji na ovaj efekt, ipak je najčešće u upotrebi zbog relativno niske cijene proizvodnje.

Poznavajući ovaj efekt, industrija fotonaponskih modula već neko vrijeme traga za načinom regulacije operativne temperature ćelija. Regulacija (a u prvom redu smanjenje) operativne temperature može se izvesti ispravnim odabirom materijala, i to u prvom redu prednje i stražnje plohe fotonaponskog modula. Također, regulacija operativne temperature može se izvoditi i filtriranjem dijela neiskoristivog spektra (bilo povećanjem refleksije u određenom dijelu spektra, bilo transmisijom odnosno propuštanjem dijela spektra koji je neiskoristiv za PV modul).

Najveći naponi ulažu se u tehnike hlađenja fotonaponskih modula, i to iz dva razloga: značajnu količinu topline potrebno je odvesti sa modula, te tako smanjiti temperaturu stacionarnog stanja (operativnu temperaturu), a k tome odvedena toplina predstavlja potencijal za iskorištavanje u vidu dodatne topline za potrebe nekog tehnološkog procesa, ili za potrebe grijanja stambenih objekata. Ovaj drugi tip rješenja naziva se PV/T (*PhotoVoltaic/Thermal*) hibridom te neće biti predmet razmatranja ovoga rada.

3. TEHNIKE REGULACIJE TEMPERATURE FN MODULA

Regulacija temperature hlađenjem fotonaponskog panela zasniva se na dodatnom odvođenju viška topline putem nekog od mehanizama prijenosa topline, a koji prvotno nije zamišljen pri komercijalnom rješenju izvedbe fotonaponskog modula. Ovo ograničava razmatranje ovoga rada samo na poboljšanja u efikasnosti postignuta na komercijalnim fotonaponskim panelima. Specijalne izvedbe panela (ili odvojenih ćelija za specifična rješenja) ovdje će samo biti navedene kao primjer.

Također, posebna varijanta fotonaponskih sustava (u eksperimentalnoj eksploataciji) jesu i koncentrirane fotonaponske elektrane, koje koriste fokusirano Sunčevo zračenje (bilo preko leće, ili preko zrcala) te na taj način čine uštedu u utrošku materijala. Regulacija temperature koncentriranih fotonaponskih sustava je nužnost, te je kao takvo prisutnije u istraživanju. Ovaj će se rad u nastavku pokušati usredotočiti na konvencionalne fotonaponske module.

Koncepti regulacije temperature, iako intenzivnijeg djelovanja kod koncentriranih sustava, u načelu su isti, a mogu se općenito podijeliti na aktivne i pasivne sustave regulacije temperature, ovisno o tome da li za hlađenje ulažemo energiju, ili se regulacija zasniva na pasivnom toplinskom toku, koji je uvećan koristeći adekvatno tehničko rješenje. U nastavku će se detaljnije objasniti ove dvije tehnike. Kod regulacije se podrazumijeva hlađenje fotonaponskog panela. Iako, postoje slučajevi kada se fotonaponski panel ciljano pregrijava, ovaj rad to neće razmatrati.

3.1. AKTIVNE TEHNIKE

U aktivne tehnike ubrajaju se one tehnike kod kojih se troši energija s ciljem da se poveća toplinski tok. Ovakve tehnike su značajno efikasnije od pasivnih tehnika, ali se u pravilu može postaviti pitanje kolika je neto dobivena vrijednost, odnosno koliko se dodatno dobivene električne energije troši na aktivnu regulaciju.

3.1.1. Aktivne tehnike hlađenja vodom

Aktivne tehnike hlađenja vodom razlikuju se prema načinu apliciranja, bilo sa prednje ili sa stražnje strane. Različite varijante hlađenja do sada su isprobane, sa različitim rezultatima.

S. Krauter [9] je pokazao da se prelijevanjem vode preko konvencionalnog panela (55W) može dobiti povećanje od 1,5% ukupne efikasnosti. Ipak, [9] navodi da je utrošak energije za cirkuliranje vode značajan.

Abdozaleh i Ameri [10] također istražuju prelijevanje vode preko prednje strane fotonaponskog panela s ciljem podizanja efikasnosti, te za najveće toplinsko opterećenje dobiva i do 2% efikasnosti.

Tespi rješnje [11] predlaže izradu staklenog okvira iznad PV modula, u kojem bi cirkulirala voda. Ovaj način hlađenja značajno umanjuje upadanje elektromagnetskog zračenja infra-crvenih valnih duljina na PV ćeliju, što smanjuje njeno zagrijavanje. Za relevantnu insolaciju (oko 900W/m²) ova metoda hlađenja daje efikasnost veću za oko 1%. Moharram i dr. [12] vrši intermitentno hlađenje periodičkim prelijevanjem hladne vode (25°C) preko prednje strane panela, te tako periodički dobiva porast efikasnosti od maksimalno 1%.

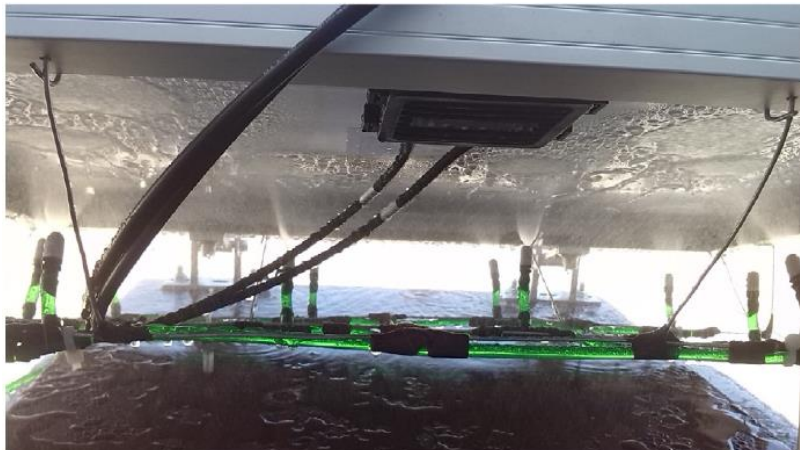


Slika 3.1. - hlađenje vodom sa prednje strane panela [9]

Hlađenje vodom sa stražnje strane može biti izvedeno na više načina. [13] i [14] postavljanjem cijevi sa stražnje strane (te na taj način stvarajući PV/T hibrid) dobivaju povećanje električne efikasnosti od oko 1%. S obzirom da fokus ovoga sistema nije na električnoj efikasnosti, ovo ne predstavlja maksimum efikasnosti koji se može dostignuti sa stražnjim hlađenjem. [15] hlade koncentriranu fotonaponsku ćeliju sa prostrujavanjem vode kroz cijevi na stražnjoj strani te dobiva porast efikasnosti od oko 1%. Bahaidarah i dr. [16] također hladi panel sa stražnje strane, koristeći cijelu stražnju plohu kao izmjenjivač. Hlađenjem pomoću strujanja vode dobio se porast efikasnosti od maksimalnih 2,5%. [17] koristi cijevi sa stražnje strane za hlađenje panela te podiže efikasnost za oko 0,8%.

Poseban tip hlađenja sa stražnje strane je hlađenje nanofluidom. Nanofluid je u načelu disperzija nano čestica u tekućini, u pravilu u vodi, te kao takav ima bolja termalna svojstva. [18] vrši ispitivanja hlađenjem sa nanofluidom na bazi aluminijske oksida sa stražnje strane, u spiralnom obliku strujanja te u pravocrtnom obliku strujanja. Rad ne pokazuje doprinos tehnike hlađenja, nego ističe da hlađenje nanofluidom, kada se uspoređuje sa hlađenjem običnom vodom, može rezultirati porastom dobivene električne energije i do 5%, u odnosu na povećanje električne efikasnosti hlađenjem vodom. U [19] pokazalo se da hlađenje nanofluidom može podignuti ukupnu efikasnost panela i do 1,8% u odnosu na hlađenje vodom. Uzevši u obzir da je riječ o PV/T sistemu, ne može se uzeti da je doprinos nano-fluida ovoliko značajan te da bi jednako doprinosio kada bi bio instaliran samo na PV sustav. Ipak, može se

zaključiti da postoji potencijal nanofluida da poveća električnu efikasnost i do 2,6%, ako se uzme u obzir da većina tehnika hlađenja vodom daje najmanje 0,8% povećanje efikasnosti. U [20] se obostranim hlađenjem panela sa o mlazom vode dobilo povećanje električne efikasnosti od ukupno 2%. U [21], autori pomoću hlađenja ledenom vodom sa prednje strane dobivaju povećanje efikasnosti od 3,36%.



Slika 3.2. - hlađenje vodom sa stražnje strane panela [20]

3.1.2. Aktivne tehnike hlađenja zrakom

Aktivne tehnike hlađenja zrakom jesu sve tehnike hlađenja koje koriste prisilno strujanje zraka da bi hladile fotonaponski panel, bilo sa prednje bilo sa stražnje strane. Uglavnom je riječ o prisilnom nastrujavanju okolnog zraka sa stražnje strane, i to usmjerenog pomoću različite izvedbe kanala. [22] pokazuje da hlađenje strujanjem zraka u kanalu sa stražnje strane može dovesti do smanjenja temperature i do 5°C, što bi značilo povećanje efikasnosti za i do 2%. U praksi to nije tako, iz razloga što temperatura termosonde ne odgovara radnoj temperaturi ćelije. Isti autori u [23] pokazuju da se pravilnim dizajnom izmjenjivača topline sa stražnje strane može dobiti povećanje električne efikasnosti i do 0,8%, za panel od 45Wp. [24] je mehanizmom hlađenja sa stražnje strane (alumijski okvir sa rebima za povećanje topl. vodljivosti) smanjio temperaturu stražnje plohe panela te je za smanjenje temperature od 30°C dobio povećanje efikasnosti od 3,6%. Ovo ne odgovara temperaturnoj degradaciji za polikristalni silicijski panel, koja je otprilike 0,5%/°C. To govori u prilog činjenici da je stvarna mjerena temperatura na mjernim sensorima vjerojatno značajno manja od stvarne operativne temperature ćelije, s obzirom da je stvarna temperaturna degradacija prema napravljenim mjerenjima oko 0,12%/°C. [25] je jednostavnim rješenjem ventilatora i alumijskog kućišta sa stražnje strane dobio povećanje izlazne snage za oko 10%, što bi značilo apsolutni porast efikasnosti za oko 0,8%, uz uvjet da testirani paneli (referentni panel i panel s modifikacijom) daju istu snagu i prije modifikacije. [26] pokazuje da za klasični komercijalni panel kod prirodnog strujanja u kanalu sa stražnje strane, efikasnost opada i za do 0,9%, što je posljedica izolacije koju kanal sa stražnje strane stvara. Kod prisilne konvekcije u kanalu, dobiva se i do 2,4% povećanje efikasnosti za strujanja visoke brzine. U [17], za sunčanog ljetnog dana, dobiveno je poboljšanje od 0,8%, pri situaciji strujanja zraka sa stražnje plohe prosječnom brzinom od 2,1 m/s u plitkim alumijskim kanalima (dubine 25mm).



Slika 3.3. - hlađenje zrakom sa stražnje strane panela [26]

3.1.3. Ostale aktivne tehnike

Postoji i skupina pokušaja da se implementira hibridni sustav, kao što je u [27]. Ovdje autori pokušavaju iskoristiti energiju vjetra za dobivanje električne energije te ujedno usmjeravanje vjetra za hlađenje fotonaponskog panela. Sa stražnje strane postavljen je ventilator, na kojega se nastrujava zrak (simulacija vjetra) koji se izvedbom ventilatora usmjerava prema stražnjoj strani panela. Za relativno mali panel ($0,034\text{m}^2$) ovom tehnikom dobilo se povećanje efikasnosti za preko 3%. Ipak, ovolika količina dovedenog zraka i hlađenja relativno je nepraktična za velike panele.

Tehnika hlađenja pomoću Peltierovih elemenata isprobana je u [28]. Autori su modelom pokazali da se obične i koncentrirane fotonaponske ćelije mogu hladiti pomoću Peltierovih elemenata, na način da se Peltier element napaja iz PV modula. Ovaj sustav, prema modelu, generira 6% više energije u odnosu na ukupno dobivenu energiju, te osigurava rad fotonaponske ćelije na nižoj temperaturi. Ipak, ekonomska opravdanost ovakve izvedbe, s obzirom na cijenu Peltier elemenata, itekako je upitna.

3.2. PASIVNE TEHNIKE

3.2.1. Pasivne tehnike hlađenja vodom

Pasivne tehnike hlađenja vodom uglavnom se zasnivaju na uranjanju fotonaponskog panela u vodu (ili drugu tekućinu), odnosno korištenja efekta isparavanja. Ove tehnike uglavnom se koriste kod PV/T hibrida, kao kod [29] gdje se pokazalo da je električna efikasnost PV/T panela opala i za do 1% usljed pokušavanja eksploatacije otpadne topline. U [30] se pristupilo uranjanju PV panela u vodu konstantne dubine i temperature (jezero), te se pokazalo da na 4 cm dubine efikasnost panela raste i do 1,5%. Objašnjenje ovoga efekta je prvenstveno u činjenici da velik dio neiskoristivog zračenja, koje bi ugrijalo ćeliju, ne dolazi do nje.

Također, okolna voda je praktički stalno iste temperature te stoga konstantno odvodi toplinu. Isti autori pokazuju da na dubini od 40cm efikasnost PV modula značajno pada, i za do 3%, jer sada voda počinje upijati i zračenja koja je PV panel mogao iskoristiti.

[14] su izradili pasivni sustav cirkulacije vode (slično kao kod [29]) međutim su dobili drugačiji rezultat, podignuvši efikasnost sustava za oko 1%. Ovdje se tehnika primijenjena u [14] može promatrati i kao pasivna, s obzirom na to da se koristi cirkulacijski sustav vode bez pumpe, ali se ostavlja mogućnost ugradnje dodatnog aktivnog cirkulacijskog sustava. Ipak, pošto je u [14] naglasak na PV/T sustavu, time je i viša izlazna temperatura vode poželjna varijabla.

[31] koristi efekt kapilariteta da bi održavao stražnju plohu vlažnom. Stražnja ploha je obložena pamučnim namotajima koji kapilarno povlače vodu iz hladnih spremnika. Dio hlađenja se sigurno odvija i isparavanjem. U eksperiment su uvedeni i nanofluidi, međutim se pokazalo da je kapilarni efekt nanofluida značajno slabiji od čiste vode. Efikasnost panela podignuta je za 1,4%. [32] također koristi isparavanje vode kao glavni mehanizam hlađenja panela te postiže povećanje efikasnosti za do 1,8%.

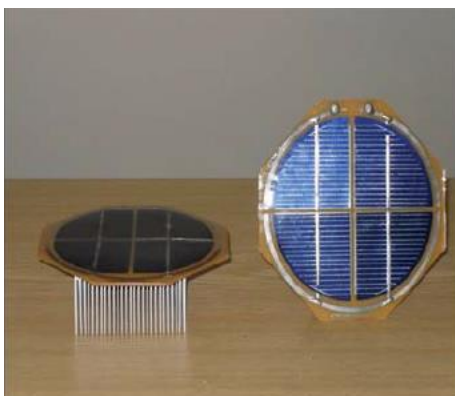


Slika 3.3. - pasivno hlađenje prirodnom cirkulacijom vode [29]

3.2.2. Pasivne tehnike hlađenja zrakom

Relativno malo eksperimenata napravljeno je sa pasivnim tehnikama hlađenja zrakom. U [33], autori su izradili vlastitu komoru za ispitivanje te pozicionirali malu PV ćeliju na aluminijski hladnjak, i varirao intenzitet zračenja. Dobiveni porast efikasnosti iznosio je oko 0,5% za zračenja ekvivalentna vanjskima. Međutim, uzevši u obzir da je ispitivanje izvršeno na maloj ćeliji snage svega 0,5W te relativno velikom aluminijskom hladnjaku, koristeći laboratorijsko svjetlo, ovi rezultati trebaju biti uzeti s dozom rezerve, jer rezultati in situ mogu značajno odstupati. [34] također za malu PV ćeliju te hlađenje zrakom dobiva povećanje efikasnosti za oko 0,4%, koristeći toplinsku cijev (*heat pipe*) kao nosioca topline do aluminijskog hladnjaka.

[26] pokazuje da hlađenje komercijalnog panela tehnikom prirodnog hlađenja, na način da se sa stražnje strane izradi strujni kanal, daje loše rezultate. Naime, stražnji kanal djeluje kao izolator te onemogućuje konstantan dovod svježeg zraka na stražnju stranu panela. [35] istražuju numerički model rebara sa stražnje strane, s ciljem da povećaju konvekciju sa stražnje strane. Prema numeričkom modelu, može se pomoću postavljenih rebara dobiti oko 1% veća efikasnost. [36] koristi mikro rebra da bi povećao stražnje hlađenje koncentriranih fotonaponskih elektrana, te prezentira rezultat u kojem je ovako hlađena fotonaponska ćelija pod koncentriranim zračenjem i do 50% efikasnija od ćelije koja nije hlađena mikro rebrima. Koncentrirane fotonaponske ćelije, s druge strane, ne predstavljaju fokus ovoga rada, ali neki od principa hlađenja primjenjivi su i na običnim PV modulima. [37] predlažu perforiranje fotonaponskog modula da bi se omogućilo strujanje toplog zraka sa stražnje strane, te na taj način povećala izmjena topline na stražnjoj strani panela. Eksperimenti na malim panelima pokazuju smanjenje temperature na stražnjoj plohi panela i do 8°C.



Slika 3.4. - pasivno hlađenje ćelije prirodnom cirkulacijom zraka [33]

3.2.3. Ostale pasivne tehnike

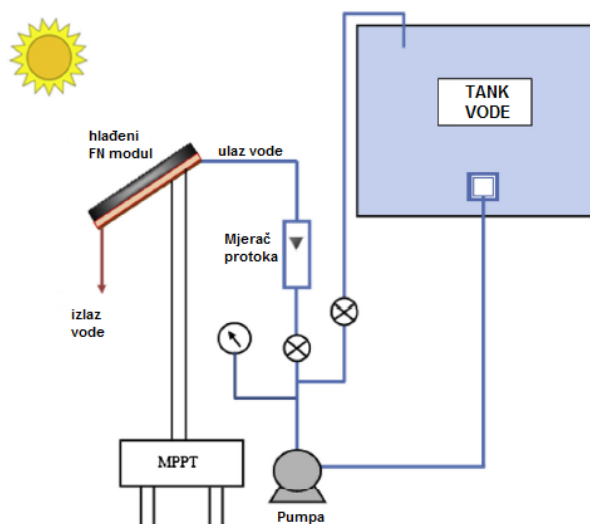
Pod ostale pasivne tehnike najznačajnije bi bilo istaknuti tehnike koje uključuju faznu promjenu materijala. Ove tehnike mogu se smatrati pasivnima, jer nema klasičnog odvođenja topline, niti je zastupljen mehanizam direktnog odvođenja topline. U ovom slučaju, koristi se temperatura fazne promjene materijala za upijanje topline, s ciljem da se operativna temperatura ćelije zadrži na željenom nivou.

[38] pokazuju da se za koncentriranu fotonaponsku ćeliju pomoću PCM-a može podignuti efikasnost i za do 50% u odnosu na koncentriranu fotonaponsku ćeliju, bez PCM-a. [39] pokazuje da je sa PCM-om realno očekivati do 13% povećanja efikasnosti za radne uvjete Bliskog istoka.

4. POTENCIJAL TEHNIKA REGULACIJE TEMPERATURE FN MODULA

Općenito se može zaključiti da primijenjene tehnike hlađenja vodom mogu donijeti do 3,36% ukupne efikasnosti, i to u prvom redu aktivne tehnike hlađenja vodom [21]. To je, po svemu sudeći, maksimum među tehnikama hlađenja apliciranim na komercijalnim fotonaponskim modulima.

Klasični sustav aktivnog hlađenja vodom izgleda kao na Slici 4.1..



Slika 4.1. - primjer sustava hlađenja vodom [16]

Aktivni sustavi hlađenja zrakom prema dosadašnjim rezultatima ostvaruju i do 2,4% povećanja efikasnosti. Ovo je u prvom redu rezultat vrlo visoke brzine prisilnog strujanja zraka (kako je pokazano u [26]). Takva brzina strujanja zahtijeva značajnu instaliranu ventilacijsku snagu i izgradnju aktivnog sustava hlađenja.

Isparavanje, kao najpotentnija pasivna tehnika hlađenja vodom, pokazuje da se sa pasivnim hlađenjem vodom ne može očekivati više od 1,8% povećanja efikasnosti. Ostale tehnike hlađenja vodom daju povećanje efikasnosti od oko 1%, što predstavlja povećanje efikasnosti upola intenzivnije od aktivnih tehnika.

Potencijal do sada istraženih pasivnih tehnika hlađenja zrakom, ne uzimajući u obzir numeričke modele, pokazuje potencijal porasta efikasnosti od oko 0,5%. Relativno je mali uzorak ovako hlađenih komercijalnih ćelija, na osnovu kojih bi se moglo doći do jasnijih podataka koliki je stvarni potencijal ove tehnike.

Tablica 4.1. daje zbirni prikaz svih obrađenih tehnika hlađenja.

Tablica 4.1. Pregled tehnika hlađenja

Rad	Tip tehnike	povećanje efikasnosti	Smanjenje temperature
[9]	aktivno, vodom, sprijeda	1,5%	22°C
[10]	aktivno, vodom, sprijeda	2%	23°C
[11]	aktivno, vodom, sprijeda	1%	nije istaknuto
[12]	aktivno, vodom, sprijeda	1%	do 12°C
[13]	aktivno, vodom, straga i sprijeda	1%	do 15°C
[14]	aktivno/pasivno, vodom, straga	1%	do 10°C
[15]	aktivno, vodom, straga, koncentrirani modul	1%	nije jasno istaknuto
[16]	aktivno, vodom, straga	2,5%	17°C
[17]	aktivno, vodom, straga	0,8%	nije jasno istaknuto
[18]	aktivno, nanofluidom, straga	rel. porast od 5% u odnosu na hlađenje vodom	do 25°C
[19]	aktivno, nanofluidom, straga	apsolutno do 1,8% u odnosu na hlađenje vodom	nije jasno istaknuto
[20]	aktivno, vodom, obostrano	1,7%	22°C
[21]	aktivno, vodom, sprijeda	3,36%	oko 20°C
[22]	aktivno, zrakom, straga	nije poznato	5°C
[23]	aktivno zrakom straga	0,8%	do 10°C
[24]	aktivno zrakom, straga, rebara	3,6%	30°C
[25]	aktivno, zrakom straga	0,8%	12°C
[26]	aktivno, zrakom, straga	2,6%	7°C
[17]	aktivno, zrakom, straga	0,8%	nije jasno istaknuto
[27]	aktivno, zrakom, straga	3%	14°C
[27]	pomoću Peltier elementa	0,6%	prosječno 15°C
[30]	uranjanje u vodu na 4cm dubine	1,5%	na temperaturi vode
[31]	pasivno, vodom, straga, pomoću kapilariteta	1,4%	20°C
[32]	pasivno, vodom, straga, isparavanjem	1,8%	do 15°C
[33]	pasivno, zrakom, straga, pomoću rebara	0,5%	do 17°C
[34]	pasivno, zrakom, straga, pomoću rebara	0,4%	4,7°C
[35]	pasivno, zrakom, straga, pomoću rebara	1%	14°C
[36]	pasivno, zrakom, straga, pomoću mikro-rebara, koncentrirani panel	do 50% veća efikasnost od nehlađenog	do 52°C
[37]	pasivno, perforiranjem panela	nije definirano	do 8°C
[38]	hlađenje PCM-om, koncentrirani panel	50% u odnosu na nehlađeni	nije jasno specificirano
[39]	hlađenje PCM-om,	13% u odnosu na nehlađeni	nije jasno specificirano

S obzirom da su povećanja efikasnosti relativno skromna (tek nekoliko postotaka), pristup hlađenju trebalo bi promišljati i kroz aspekt što jeftinije aplikacije tehnika hlađenja, i to tako da se po mogućnosti tehnika hlađenja može aplicirati već na proizvodnoj liniji, kada su troškovi instalacije najmanji. U suprotnom, tehnike hlađenja mogle bi prouzročiti veće

troškove instalacije nego što bi mogle donijeti uštede. Prvenstveno je to slučaj kada tehnike hlađenja efektivno doprinose tek nekoliko mjeseci u godini.

U smislu aplikacije tehnika hlađenja vodom, hlađenje sa prednje strane zahtijeva ujednačeno prelijevanje vode preko prednje plohe, te kasnije sakupljanje te iste vode. Jednako vrijedi za sve druge tekućine u potencijalnoj primjeni, uz napomenu da je voda ipak najdostupnija tekućina a time i najpraktičnija tekućina. Ne treba ni zaboraviti već spomenuti efekt upijanja IC zračenja koje je neiskoristivo za fotonaponski panel te ga samo pregrijava. Ovaj način hlađenja panela ima i pozitivni učinak u smislu čišćenja panela od nečistoća, ali iz istog razloga zahtijeva i filtriranje prikupljene vode te nadoknađivanje isparene količine. S obzirom na dodatno isparavanje na prednjoj plohi, ovaj način hlađenja se ne može koristiti kod hibridnih sustava, jer dodatna toplina ostaje neiskorištena. Ovakav tip hlađenja bio bi možda najpraktičniji u regijama sa velikom količinom prašine u zraku. Na nesreću, te regije su uglavnom i najsuše regije Svijeta.

Aktivno hlađenje vodom sa stražnje strane pokazuje se praktičnim rješenjem za iskorištavanje otpadne topline. No, ovakav način hlađenja traži tehničku izvedbu strujanja sa stražnje strane, koja će moći ostvariti dovoljno intenzivan toplinski tok sa panela na vodu. Kod hlađenja zrakom sa stražnje strane problem je slične naravi, osim što izvedba s vodom zahtijeva kvalitetno brtvljenje. Kod izvedbe hlađenja zrakom, pokazalo se da pri prirodnom strujanju ugrađeni sustav za aktivno hlađenje djeluje kao izolator.

Pri pasivnom hlađenju vodom, u pravilu voda u sustavu ima dovoljno velik toplinski kapacitet da može apsorbirati velik dio dodatne topline. Ovakav sustav ima prednost u činjenici da ne koristi energiju za cirkulaciju vode, a još uvijek daje dobre rezultate regulacije temperature. Također, ovakav sustav potencijalno može davati značajnu količinu otpadne topline.

Pasivno hlađenje zrakom daje najlošije rezultate u regulaciji topline, ali ima prednost što ne postoji nikakav utrošak energije, a može se implementirati bez opasnosti od gubljenja radnog medija. Pasivno hlađenje zrakom predstavlja način hlađenja koji se može efikasno implementirati na visokoserijsku proizvodnju direktno na proizvodnoj liniji, bez potrebe da se dodatno vrše modifikacije na mjestu ugradnje.

5. ZAKLJUČAK

Obnovljivi izvori predstavljaju energetska budućnost i sigurno će značajno sudjelovati u proizvodnji električne energije u 21. stoljeću. Značajan potencijal da preuzme vodeću ulogu među obnovljivim izvorima je upravo tehnologija fotonaponske pretvorbe. Fotonaponski sustavi već su zastupljeni u razvijenim zemljama, a očekuje se da će se njihova eksploatacija udesetorostručiti do 2050. godine.

Još uvijek najzastupljenija fotonaponska tehnologija je ona bazirana na siliciju (oko 94% zastupljenosti). Silicij se pokazao kao relativno jeftin materijal, pouzdanih svojstava, te je za očekivati da će srednjeročno ova tehnologija biti najprisutnija, kada su u pitanju fotonaponski sustavi.

Najveća mana fotonaponskih sustava, osim visoke cijene instalacije te sporog povrata investicije, je relativno niska učinkovitost, uvelike ovisna o operativnoj temperaturi fotonaponskih panela. Električna efikasnost fotonaponskih panela opada sa porastom radne temperature, te ih to čini nisko efikasnim upravo u periodu najjačeg Sunčeva zračenja. Stoga je jedan od glavnih fokusa industrije fotonaponskih panela na smanjenju operativne temperature.

Jedan od načina smanjenja operativne temperature je regulacija temperature tehnikom hlađenja. Tehnike hlađenja mogu biti aktivne i pasivne. Dosadašnji pregled pokazao je da aktivne tehnike mogu podignuti električnu efikasnost fotonaponskog sustava za 2,6% (za realističnu primjenu), dok aktivne tehnike imaju potencijal podignuti električnu efikasnost i do 1,8%.

6. LITERATURA

- [1] Sagar, A.D.; Oliver, H.H.; Chikkatur, A. P.: "Climate Change, Energy and Developing Countries", Vermont Journal of Environmental Law, Spring Symposium book, 2006.
- [2] Parida, B.; Iniyar, S.; Goić, R.: "A Review of Solar Photovoltaic Technologies", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol 15, Issue 3, p1625-1636, 2011.
- [3] <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf> 19. svibnja 2017.
- [4] http://www.solarpowereurope.org/fileadmin/user_upload/documents/Media/Jobswth.pdf 20. svibnja 2017.
- [5] (International Energy Agency (2014). "Technology Roadmap: Solar Photovoltaic Energy" (PDF). www.iea.org IEA. 7. listopada 2014.
- [6] Shan, F.; Cao, L.; Fang, G.: "Dynamic performances modeling of a photovoltaic-thermal collector with water heating in buildings" Energy and Buildings, Vol. 66, p485-494 2013.
- [7] <http://www.ee.co.za/article/solar-pv-module-faults-failings.html> 25. svibnja 2018.
- [8] Fesharaki, V. J.; Dehghani, M.; Fesharaki, J. J.: "The Effect of Temperature on Photovoltaic Cell Efficiency", Proceedings of the 1st International Conference on Emerging Trends in Energy Conservation - ETEC, Tehran, Iran, 20-21. studenog, 2011.
- [9] Krauter, S.; "Increased electrical yield via water flow over the front of photovoltaic panels", Solar Energy Materials & Solar Cells 82, p131-137, 2004.
- [10] Abdolzadeh, M.; Ameri, M.: "Improving the effectiveness of a photovoltaic water pumping system by spraying water over the front of photovoltaic cells", Renewable Energy 34, p91-96, 2009.
- [11] Rosa-Clot, M.; Rosa-Clot, P.; Tina, G.M.: "TESPI: Thermal Electric Solar Panel Integration", Solar Energy 85, p2433-2442, 2011.
- [12] Moharram, K.A. i dr.; "Enhancing the performance of photovoltaic panels by water cooling", Ain Shams Engineering Journal 4, p869-877, 2013.
- [13] Dorobantu, L.; Popescu, M.O.: "Increasing the efficiency of photovoltaic panels through cooling water film" U.P.B. Sci. Bull., Series C, Vol. 75, Iss. 4, 2013.
- [14] El-Seesy, I.E.; Khalil, T.; Ahmed, M.H.: "Experimental Investigations and Developing of Photovoltaic/Thermal System", World Applied Sciences Journal 19(9), p1342-1347, 2012.

- [15] Du, B.; Hu, E.; Kolhe, M: “Performance analysis of water cooled concentrated photovoltaic (CPV) system“, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16, p6732-6736, 2012.
- [16] Bahaidarah, H. i dr.: “Performance evaluation of a PV (photovoltaic) module by back surface water cooling for hot climatic conditions“, *Energy* 59, p445-453, 2013.
- [17] Arcuri, N.; Reda, F.; De Simone, M.: “Energy and thermo-fluid-dynamics evaluations of photovoltaic panels cooled by water and air“, *Solar Energy* 105, p147-156, 2014.
- [18] Karami, N.; Rahimi, M.: “Heat transfer enhancement in a PV cell using Boehmite nanofluid“, *Energy Conversion and Management* 86, p275-285, 2014.
- [19] Sardarabadi, M.; Passandideh-Fard, M.; Heris, S. Z.: “Experimental investigation of the effects of silica/water nanofluid on PV/T (photovoltaic thermal units) “ *Energy* 66, p264-272, 2014.
- [20] Nižetić, S. i dr.: “Water spray cooling technique applied on a photovoltaic panel: The performance response“, *Energy Conversion and Management* 108, p287-296, 2016.
- [21] Smith, M.K. i dr.: “Water Cooling Method to Improve the Performance of Field Mounted, Insulated, and Concentrating Photovoltaic Modules“ *Journal of Solar Energy Engineering*, Vol. 136, 2014.
- [22] Tonui, J.K.; Tripanagnostopoulos, Y.: “Improved PV/T solar collectors with heat extraction by forced or natural air circulation“, *Renewable Energy* 32, p623-637 2007.
- [23] Tonui, J.K.; Tripanagnostopoulos, Y.: “Air-cooled PV/T solar collectors with low cost performance improvements“, *Solar Energy* 81, p498-511, 2007.
- [24] Teo, H.G.; Lee, P.S.; Hawlader, M.N.A.: “An active cooling system for photovoltaic modules“, *Applied Energy* 90, p309-315, 2012.
- [25] Farhana, Z. i dr.: “Experimental Investigation of Photovoltaic Modules Cooling System“, 2012 IEEE Symposium on Computers & Informatics
- [26] Mazon-Hernandez, R. i dr.: “Improving the Electrical Parameters of a Photovoltaic Panel by Means of an Induced or Forced Air Stream“, *International Journal of Photoenergy*, Volume 2013, Article ID 830968, 10 pages
- [27] Valeh-e-Sheyda, P. i dr.: “Using a wind-driven ventilator to enhance a photovoltaic cell power generation“ *Energy and Buildings* 73, p115-119, 2014.
- [28] Najafi, H.; Woodbury, K.A.: “Optimization of a cooling system based on Peltier effect for photovoltaic cells“, *Solar Energy* 91, p152-160, 2013.
- [29] He, W.; Zhang, Y.; Ji, J.: “Comparative experiment study on photovoltaic and thermal solar system under natural circulation of water“, *Applied Thermal Engineering* 31, p3369-3376, 2011.

- [30] Rosa-Clot, M. i dr.: "Submerged photovoltaic solar panel: SP2", *Renewable Energy* 35, p1862-1865, 2010.
- [31] Chandrasekar, M. i dr.: "Passive cooling of standalone flat PV module with cotton wick structures", *Energy Conversion and Management* 71, p43-50, 2013.
- [32] Alami, A.H.: "Effects of evaporative cooling on efficiency of photovoltaic modules", *Energy Conversion and Management* 77, p668-679, 2014.
- [33] Cuce, E.; Baki, T.; Sekucoglu, S.A.: "Effects of passive cooling on performance of silicon photovoltaic cells", *International Journal of Low-Carbon Technologies* 6, p299-308, 2011.
- [34] Tang, X.; Quan, Z.; Zhao, Y.: "Experimental Investigation of Solar Panel Cooling by a Novel Micro Heat Pipe Array", *Energy and Power Engineering* 2, p171-174, 2010.
- [35] Popovici, C.G. i dr.: "Efficiency improvement of photovoltaic panels by using air cooled heat sinks", *Energy Procedia* 85, p425-432, 2016.
- [36] Micheli, L.; Reddy, K.S.; Mallick, T.K.: "Plate micro-fins in natural convection: an opportunity for passive concentrating photovoltaic cooling", *Energy Procedia* 82, p301-308, 2015.
- [37] Abd-Elhady, M.S.; Serag, Z.; Kandil, H.A.: "An innovative solution to the overheating problem of PV panels", *Energy Conversion and Management* 157, p452-459, 2018.
- [38] Maiti, S. i dr.: "Self regulation of photovoltaic module temperature in V-trough using a metal-wax composite phase change matrix", *Solar Energy* 85, p1805-1816, 2011.
- [39] Hassan, A.: "Phase Change Materials for Thermal Regulation of Building Integrated Photovoltaics", doktorska disertacija, Dublin Institute of Technology, 2010.

7. SAŽETAK

Fotonaponski sustavi predstavljaju jedno od rješenja za energetska pitanje, u 21. stoljeću. Trenutno najkorištenija tehnologija fotonaponske pretvorbe jest ona bazirana na siliciju (94%) i očekuje se da će u budućnosti tako i ostati.

Glavni nedostatak ove tehnologije, uz cijenu, jest značajan pad efikasnosti pri povećanju operativne temperature. S obzirom na to da operativna temperatura raste prvenstveno ljeti, fotonaponski sustavi upravo ljeti imaju najmanju električnu efikasnost. Iz tog razloga, pristupa se raznim tehnikama hlađenja.

Tehnike hlađenja mogu se u općem smislu podijeliti na aktivne i pasivne. Aktivne tehnike hlađenja vodom imaju potencijal povećanja električne efikasnosti i do 3,36%. Aktivne tehnike hlađenja zrakom mogu donijeti i do 2,6% povećanja električne efikasnosti. Pasivne tehnike vodom mogu donijeti do 1,8% povećanja električne efikasnosti, dok pasivne tehnike zrakom donose oko 0,5%, a nekim numeričkim modelima i do 1% veću električnu efikasnost.

**SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, STROJARSTVA I
BRODOGRADNJE**

POSLIJEDIPLOMSKI DOKTORSKI I STUDIJ STROJARSTVA

Kvalifikacijski ispit

**POVEĆANJE UČINKOVITOSTI
FOTONAPONSKE PRETVORBE ENERGIJE**

Filip Grubišić Čabo

Split, lipanj 2018.