

# UTJECAJ TEMPERATURE NA EFIKASNOST SOLARNIH FOTONAPONSKIH PRETVORNIKA

---

**Protuđer, Vitomir**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2021**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Split / Sveučilište u Splitu**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:228:171791>

*Rights / Prava:* [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-06-25**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of University Department of Professional Studies](#)



UNIVERSITY OF SPLIT



**SVEUČILIŠTE U SPLITU**  
**SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STRUČNE STUDIJE**

Preddiplomski stručni studij Konstrukcijsko strojarstvo

**VITOMIR PROTUDER**

**ZAVRŠNI RAD**

**UTJECAJ TEMPERATURE NA EFIKASNOST  
SOLARNIH FOTONAPONSKIH PRETVORNIKA**

Split, rujan 2021.

**SVEUČILIŠTE U SPLITU**  
**SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STRUČNE STUDIJE**

Preddiplomski stručni studij Konstrukcijsko strojarstvo

**Predmet:** Obnovljivi izvori energije

**Z A V R Š N I R A D**

**Kandidat:** Vitomir Protuđer

**Naslov rada:** Utjecaj temperature na efikasnost solarnih fotonaponskih pretvornika

**Mentor:** dr. sc. Zlatko Jankoski, prof. v. š. u trajnom zvanju

**Komentor:** /

Split, rujan 2021.

**REPUBLIKA HRVATSKA**  
**SVEUČILIŠTE U SPLITU**  
**Sveučilišni odjel za stručne studije**

**Studij:** Preddiplomski stručni studij Konstrukcijsko strojarstvo  
**Predmet:** Obnovljivi izvori energije  
**Nastavnik:** dr. sc. Zlatko Jankoski, prof. v. š. u trajnom zvanju

## **ZADATAK**

**Kandidat:** Vitomir Protuđer

**Zadatak:** Utjecaj temperature na efikasnost solarnih fotonaponskih pretvornika

U radu je potrebno:

- Teoretski objasniti princip rada solarnih fotonaponskih pretvornika, s naglaskom na osnovne radne parametre, strujno-naponsku karakteristiku i točku maksimalne snage;
- Dati pregled čimbenika koji utječu na proizvodnju električne energije i efikasnost solarnih fotonaponskih pretvornika;
- Detaljno objasniti utjecaj temperature na efikasnost solarnih fotonaponskih pretvornika, uz prikaz primjera i iskustava drugih istraživača ili proizvođača opreme;
- Izraditi tehnički opis i specifikaciju postojećeg fotonaponskog sustava u laboratoriju Odsjeka za strojarstvo, uz grafičke i prema potrebi nacrtne priloge;
- Na osnovu plana mjerenja izvršiti mjerenje radnih parametara fotonaponskog sustava kojim će se demonstrirati utjecaj temperature na efikasnost solarnih fotonaponskih pretvornika;
- Iznijeti zaključke;
- Navesti literaturu i izvore podataka.

## Sažetak

U završnom radu prikazan je utjecaj temperature na iskoristivost solarnih fotonaponskih sustava. U tu svrhu korišteni su fotonaponski pretvornici na bazi polikristalnog silicija i tankoslojni fotonaponski pretvornici na bazi kadmij telurida. U teoretskom dijelu završnoga rada objašnjen je utjecaj temperature površine fotonaponskog pretvornika na njegove radne parametre, kao što su napon-jakost struje i snaga. U svrhu kompletnosti teoretskog dijela, opisani su fotonaponski pretvornici na bazi polikristalnog silicija i kadmij telurida, uz prikaz tehničkih podataka i radnih karakteristika. U praktičnom dijelu završnoga rada opisana su oba laboratorijska sustava s pripadajućom mjernom opremom. Rezultati mjerenja demonstrirali su rad sustava u realnim uvjetima, pri čemu je poseban naglasak dan na mjerenje temperature površine fotonaponskih pretvornika, uz kontinuirano praćenje njihovih radnih parametara. Podaci dobiveni mjerenjem obrađeni su tabličnim kalkulatorom i prikazani u grafičkom obliku, s posebnim naglaskom na utjecaj temperature na učinkovitosti pretvorbe energije.

Ključne riječi: fotonaponski pretvornik, temperatura, učinkovitost

## Summary (Influence of temperature on the efficiency of solar photovoltaic panels)

The final paper presents the influence of temperature on the efficiency of solar photovoltaic systems. For this purpose, photovoltaic panels based on polycrystalline silicon and thin-film photovoltaic panel based on cadmium telluride were used. In the theoretical part, the influence of the surface temperature of the photovoltaic panel on its operating parameters, such as voltage-current and power, is explained. For the purpose of completeness of the theoretical part, photovoltaic panels based on polycrystalline silicon and cadmium telluride are described, with a presentation of technical data and operating characteristics. In the practical part of the final paper, both laboratory systems with the corresponding measuring equipment are described. The measurement results demonstrated the operation of the system in real conditions, with special emphasis on measuring the surface temperature of photovoltaic panels, with continuous monitoring of their operating parameters. The data obtained by measurement were processed by a spreadsheet and presented in graphical form, with special emphasis on the relationship between temperature and energy conversion efficiency.

Keywords: photovoltaic panel, temperature, efficiency

## Sadržaj

1. UVOD .....	1
2. UTJECAJ TEMPERATURE NA RAD FOTONAPONSKOG PANELA .....	2
2.1. Općenito o utjecaju temperature na rad FN panela .....	2
2.2. Istraživanje o utjecaju temperature na radne karakteristike fotonaponskog panela ....	2
3. OPIS FOTONAPONSKOG SUSTAVA I MJERNE OPREME.....	8
3.1. Fotonaponski modul – polikristalni silicij.....	8
3.2. Tankoslojni fotonaponski modul - kadmij telurid .....	11
3.3. Akumulatorska baterija AGM 12V/220Ah .....	15
3.4. Akumulatorska baterija AGM 12V/60Ah .....	16
3.5. MPPT 75/15 solarni regulator punjenja.....	17
3.6. Li-19 Data Logger .....	17
3.7. Piranometar LP02 .....	19
3.8. Nadzornik baterija BMV 700 .....	20
3.9. Termometar SE 309.....	22
3.10. Regulator punjenja PR 2020 .....	23
4. MJERENJA I PRIKAZ REZULTATA ZA POLIKRISTALNI FOTONAPONSKI MODUL I TANKOSLOJNI CdTe.....	26
4.1. Mjerenja i prikaz rezultata za polikristalni FN modul.....	26
4.1.1. Polikristal - probno mjerenja 11. svibnja 2021. ....	26
4.1.2. Polikristal - mjerenje 9. lipnja 2021. ....	30
4.2. Mjerenja i prikaz rezultata za tehnologiju kadmij – telurid (CdTe) .....	35
5. ZAKLJUČAK .....	40

## Popis slika

SLIKA 2.1 – PRIKAZ I-U KRIVULJE [1].....	3
SLIKA 2.2 - PRIKAZ P-U KRIVULJE [1] .....	3
SLIKA 2.3 - P-U KARAKTERISTIKA PRI RAZLIČITIM KOLIČINAMA DOZRAČENE ENERGIJE [1].....	4
SLIKA 2.4 - PRIKAZ ISKORISTIVOSTI PRI RAZLIČITIM TEMPERATURAMA I DOZRAČENOSTI [1] .....	4
SLIKA 2.5 - INTENZITET DOZRAČENE SUNČEVE ENERGIJE TIJEKOM ISPITIVANJA [1].....	5
SLIKA 2.6 - PRIKAZ KARAKTERISTIKA STRUJE I NAPONA PRI ODREĐENIM TEMPERATURAMA [1] .	5
SLIKA 2.7 - PRIKAZ IZLAZNE SNAGE PRI RAZLIČITIM TEMPERATURAMA [1] .....	6
SLIKA 2.8 - PRIKAZ ISKORISTIVOSTI FN MODULA PRI ODREĐENIM TEMPERATURAMA [1] .....	6
SLIKA 3.1 - LUXOR LX 250P POLIKRISTALNI MODUL .....	8
SLIKA 3.2 - DIMENZIJE FN MODULA [2] .....	10
SLIKA 3.3 - KARAKTERISTIKE STRUJE I NAPONA [2] .....	10
SLIKA 3.4 - A) PREDNJI IZGLED CdTe TANKOSLOJNOG CX3 FOTONAPONSKOG MODULA [3] B) PREDNJI IZGLED CdTe TANKOSLOJNOG CX3 FOTONAPONSKOG MODULA [3] .....	11
SLIKA 3.5 - OPĆI OPIS PROIZVODA [3] .....	14
SLIKA 3.6 - VICTRON ENERGY AGM BATERIJA 12V 220 AH.....	15
SLIKA 3.7 - DIMENZIJE AGM BATERIJE [5] .....	15
SLIKA 3.8 - VICTRON ENERGY AGM BATERIJA 12V/60AH .....	16
SLIKA 3.9 - PRIKAZ 12V/60AH AGM BATERIJE SPOJENE NA CdTe TEHNOLOGIJU .....	16
SLIKA 3.10 - SOLARNI REGULATOR PUNJENJA .....	17
SLIKA 3.11 - LI-19 DATA LOGGER .....	18
SLIKA 3.12 - PIRANOMETAR.....	19
SLIKA 3.13 - KOMPONENTE PIRANOMETRA [8].....	20
SLIKA 3.14 - IZGLED APLIKACIJE VICTRON CONNECT ŠTO SVE MOŽEMO VIDJETI .....	21
SLIKA 3.15 - NADZORNIK BATERIJE BMV 700.....	22
SLIKA 3.16 - TERMOMETAR SE 309 .....	23
SLIKA 3.17 - ELEMENTI PRIKAZA I RADA [10] .....	24
SLIKA 3.18 - MONITOR TRENUTNOG STANJA REGULATORA PUNJENJA [10] .....	24
SLIKA 3.19 - STECA PR 2020 IP65 .....	25
SLIKA 4.1 - A) PRIKAZ DVAJU TEMPERATURNIH SENZORA NA POLEĐINI FN MODULA B) PRIKAZ MINIMALNE I MAKSIMALNE IZMJERENE TEMPERATURE NA TERMOMETRU .....	27
SLIKA 4.2 – TRENUTAČNA TEMPERATURA SOLARNOG PANELA SLIKANO SA TERMALNOM KAMEROM.....	27

SLIKA 4.3 – GRAFIČKI PRIKAZ DOZRAČENE SNAGE, UKUPNE DOZRAČENE SNAGE I SNAGE PUNJENJA BATERIJA.....	29
SLIKA 4.4 GRAFIČKI PRIKAZ ISKORISTIVOSTI U ODNOSU NA TEMPERATURU FN MODULA.....	29
SLIKA 4.5 - GRAFIČKI PRIKAZ PROMJENE NAPONA I STRUJE U ODREĐENOM VREMENU .....	30
SLIKA 4.6 - GRAFIČKI PRIKAZ TEMPERATURE I ISKORISTIVOSTI FN MODULA U ODREĐENOM VREMENU .....	30
SLIKA 4.7 - GRAFIČKI PRIKAZ PROMJENE TEMPERATURE T1 I T2 NA POVRŠINI FN MODULA .....	32
SLIKA 4.8 - GRAFIČKI PRIKAZ PROMJENE DOZRAČENE SUNČEVE ENERGIJE U VREMENU .....	32
SLIKA 4.9 – GRAFIČKI PRIKAZ DOZRAČENE SNAGE, UKUPNE DOZRAČNE SNAGE I SNAGE PUNJENJA BATERIJA.....	33
SLIKA 4.10 - GRAFIČKI PRIKAZ ISKORISTIVOSTI FN MODULA U ODNOSU NA TEMPERATURU FN MODULA.....	33
SLIKA 4.11 - GRAFIČKI PRIKAZ PROMJENE NAPONA I STRUJE U ODREĐENOM VREMENU .....	34
SLIKA 4.12 - GRAFIČKI PRIKAZ TEMPERATURE I ISKORISTIVOSTI FN MODULA U ODREĐENOM VREMENU .....	34
SLIKA 4.13 – GRAFIČKI PRIKAZ DOZRAČENE SNAGE, UKUPNE DOZRAČNE SNAGE I SNAGE PUNJENJA BATERIJA.....	<b>ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.</b>
SLIKA 4.14 - GRAFIČKI PRIKAZ PROMJENE NAPONA I STRUJE U ODREĐENOM VREMENU ...	<b>ERROR!</b>
	<b>BOOKMARK NOT DEFINED.</b>
SLIKA 4.15 – GRAFIČKI PRIKAZ TEMPERATURE I ISKORISTIVOSTI FN MODULA U ODREĐENOM VREMENU .....	<b>ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.</b>
SLIKA 4.16 - GRAFIČKI PRIKAZ NAPONA I STRUJE BATERIJE U ODREĐENOM VREMENU MJERENJA .....	<b>ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.</b>
SLIKA 4.17 - GRAFIČKI PRIKAZ ISKORISTIVOSTI FN MODULA U ODREĐENOM VREMENU MJERENJA .....	<b>ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.</b>



**Popis tablica**

TABLICA 3.1 – ELEKTRIČNI PODATCI FN MODULA [2] .....	9
TABLICA 3.2 – SPECIFIKACIJE FN MODULA [2] .....	9
TABLICA 3.3 – TEHNIČKE SPECIFIKACIJE CdTe [3] .....	12
TABLICA 3.4 – ELEKTRIČNE KARAKTERISTIKE CX3 MODULA [3].....	14
TABLICA 3.5 – SPECIFIKACIJE LI-19 DATA LOGGER-A [7].....	18
TABLICA 3.6 – SPECIFIKACIJE LP02 PIRANOMETRA [8].....	20
TABLICA 4.1 – REZULTATI MJERENJA TEMPERATURE, DOZRAČENE ENERGIJE I KARAKTERISTIKE NAPONA I STRUJE .....	26
TABLICA 4.2 – REZULTATI MJERENJA RADNIH KARAKTERISTIKA – UTJECAJ TEMPERATURE NA ISKORISTIVOST FN SUSTAVA – POLIKRISTALNI SILICIJ - A .....	28
TABLICA 4.3 – REZULTATI MJERENJA RADNIH KARAKTERISTIKA – UTJECAJ TEMPERATURE NA ISKORISTIVOST FN SUSTAVA – POLIKRISTALNI SILICIJ - B <b>ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.</b>	
TABLICA 4.4 – REZULTATI MJERENJA RADNIH KARAKTERISTIKA – UTJECAJ TEMPERATURE NA ISKORISTIVOST FN SUSTAVA - CdTe .....	31

## 1. UVOD

Svrha ovog završnog rada je utjecaj temperature fotonaponskog panela na rad fotonaponskog sustava, odnosno na učinkovitost pretvorbe energije sunca u električnu energiju pohranjenu u akumulatorske baterije. Utjecaj temperature upravo je izražen na strujno-naponsku karakteristiku fotonaponskog pretvornika odnosno panela. Konačno, promjena strujno-naponske karakteristike ima direktan utjecaj na maksimalnu snagu koju fotonaponski panel u danom trenutku može generirati.

Za potrebe izrade završnog rada korištena su dva laboratorijska fotonaponska sustava koji rade u realnim uvjetima. Prvi fotonaponski sustav sastoji se od dva fotonaponska panela izrađena od polikristalnog silicija, ukupne snage 500 Wp. Drugi fotonaponski sustav sastoji se od jednog tankoslojnog fotonaponskog panela izrađen od kadmij telurida (CdTe) nazivne snage 80 Wp. Mjerenje radnih parametara izvršeno je u realnim uvjetima pri čemu je posebna pozornost posvećena kontinuiranom mjerenju temperature površine fotonaponskih panela, uz istovremeno praćenje radnih parametara fotonaponskih sustava. Iz izmjerenih radnih parametara fotonaponskog sustava i izmjerene količine dozračene sunčeve energije izvršen je proračun učinkovitosti pretvorbe sunčeve energije u električnu energiju punjenja akumulatorskih baterija.

Općepoznato je da je jedan od nedostataka fotonaponskih panela smanjenje njihove snage s porastom temperature. Time temperatura na koju će se zagrijati fotonaponski panel ima direktan utjecaj na iskoristivost fotonaponskog sustava. Kako bi se demonstrirao utjecaj temperature na iskoristivost fotonaponskog sustava u nastavku završnog rada biti će prezentirani rezultati mjerenja tijekom nekoliko dana i tijekom određenog vremenskog perioda.

Suočeni s nedostatkom fotonaponskih panela da pri najvećoj osunčanosti imaju najnižu učinkovitost uslijed zagrijavanja površine panela, neki od proizvođača razvili su takozvani hibridni fotonaponski panel. Hibridni fotonaponski panel predstavlja kombinaciju fotonaponskog panela i toplinskog panela s ciljem da se pomoću fluida, koji cirkulira u zatvorenom krugu toplinskog panela, odvodi toplinska energija i na taj način hladi fotonaponski panel. Odvedena toplinska energija može se koristiti za zagrijavanje potrošne tople vode ili za zagrijavanje prostora.

## **2. UTJECAJ TEMPERATURE NA RAD FOTONAPONSKOG PANELA**

### **2.1. Općenito o utjecaju temperature na rad FN panela**

Solarni fotonaponski (FN) paneli ili moduli uglavnom su postavljeni na otvorenom mjestu, i zbog toga su izloženi utjecaju okoliša, izravnoj sunčevoj svjetlosti te okruženjima s velikim temperaturnim promjenama. Stoga je potrebno analizirati utjecaj promjene temperature na karakteristike fotonaponskih sustava. Snaga FN modula opada s porastom temperature. Radna temperatura ima veliku ulogu u procesu fotonaponske pretvorbe te iskoristivost sustava i izlazna snaga FN modula linearno ovise o radnoj temperaturi.

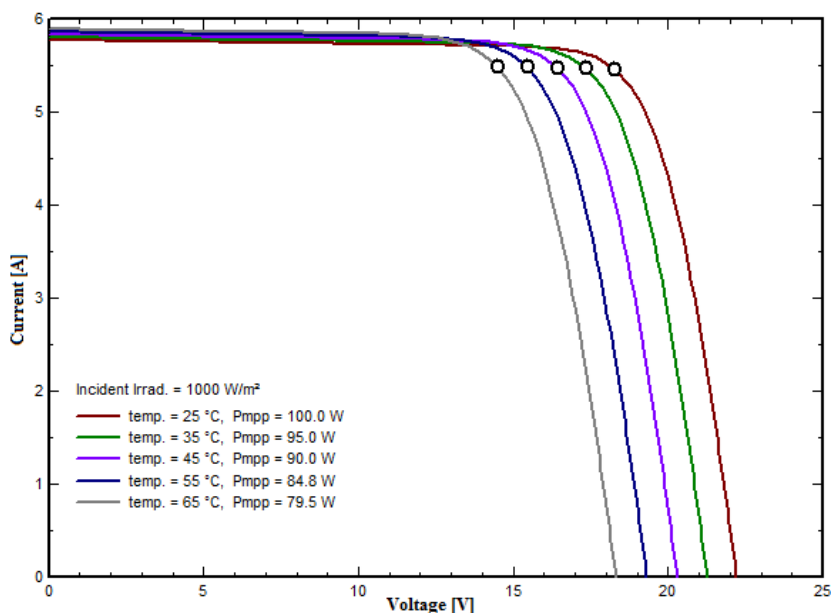
Karakteristike FN modula prvenstveno ovise o vrsti FN modula koji se koristi. Standardni FN modul pretvara 6-20 % upadnog sunčevog zračenja u električnu energiju, ovisno o vrsti solarnih ćelija te o klimatskim uvjetima. Ostatak upadnog sunčevog zračenja pretvara se u toplinu, što s vremenom rada tijekom dana povećava temperaturu FN modula i ujedno smanjuje njegovu nazivnu snagu. Pri standardnim uvjetima ispitivanja, učinkovitost pretvorbe FN modula opada za oko 0,40 do 0,50 % za svaki stupanj porasta temperature [1].

### **2.2. Istraživanje o utjecaju temperature na radne karakteristike fotonaponskog panela**

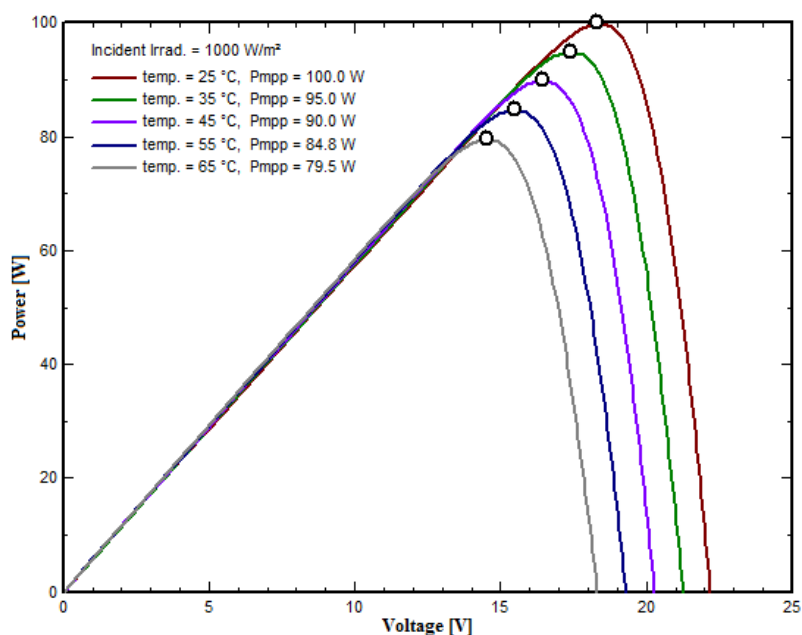
Prilikom istraživanja koje je provedeno u centru izvrsnosti za obnovljive izvore energije u Perlisu (Malezija) [1], obavljeno je ispitivanje o utjecaju temperature na rad monokristalnog FN modula. To ispitivanje odvijalo se pri vanjskim uvjetima, dok su se svi podatci mjerili u vremenskom razdoblju od 9:00 sati ujutro do 17:00 sati popodne, u intervalima od svakih 10 minuta.

Na Slici 2.1 prikazana je strujno-naponska karakteristika FN modula pri konstantnoj dozračenosti od  $1000 \text{ W/m}^2$  ali pri različitim temperaturama. Analizirajući izgled strujno-naponske karakteristike može se zaključiti da porast temperature rezultira postupnim padom napona, dok se struja značajno ne mijenja. Nazivna snaga pri temperaturi od  $25^\circ\text{C}$  iznosi 100 W. Porastom temperature za  $10^\circ\text{C}$  nazivna snaga se smanjuje za 5 W, odnosno za 5 %. Konačno, pri temperaturi od  $65^\circ\text{C}$  nazivna snaga se smanjuje na 79,5 W.

Slika 2.2. prikazuje P-U karakteristiku fotonaponskog panela i utjecaj porasta temperature na položaj radne točke fotonaponskog panela, koja predstavlja maksimalni produkt struje i napona fotonaponskog modula.



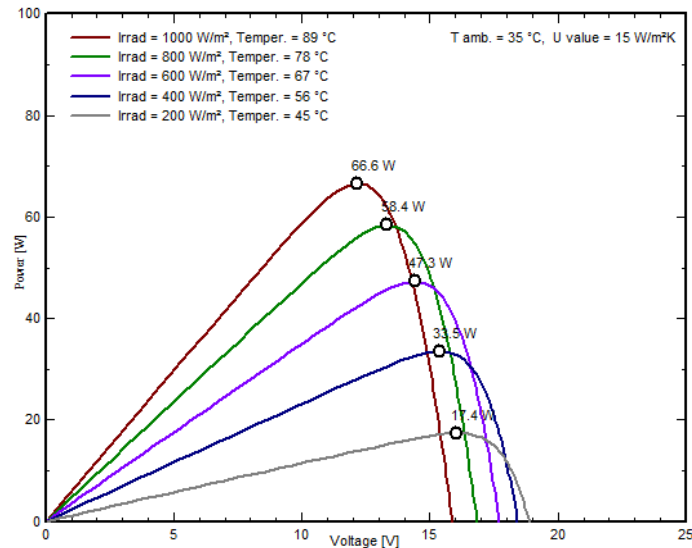
Slika 2.1 – Prikaz I-U krivulje [1]



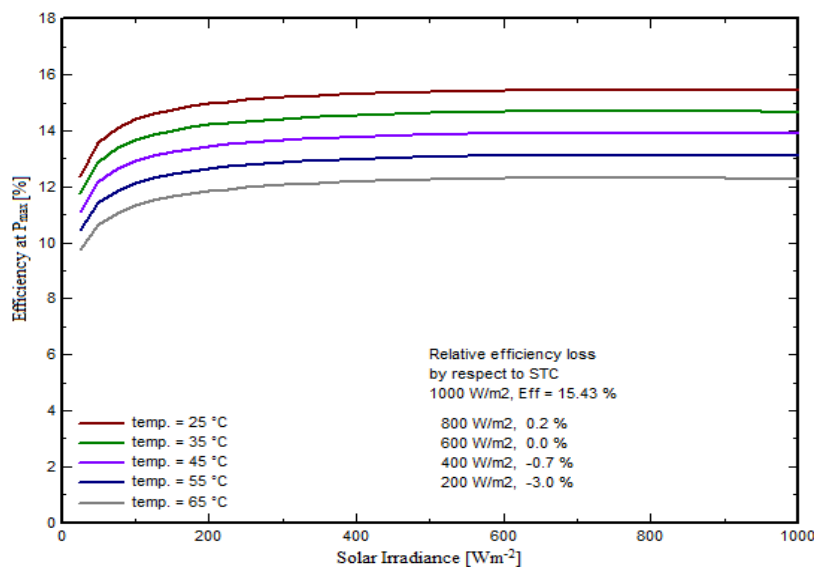
Slika 2.2 – Prikaz P-U krivulje [1]

Na Slici 2.3 može se vidjeti kako se pri povećanju dozračenost povećava i temperatura fotonaponskog panela. Tako na primjer pri najvećoj dozračenost od  $1000 \text{ W/m}^2$  temperatura panela iznosi  $89^\circ\text{C}$ , dok pri dozračenosti od  $200 \text{ W/m}^2$  temperatura panela iznosi  $45^\circ\text{C}$ .

Ipak povećanjem dozračenosti povećava se snaga fotonaponskog panela, tako da uz temperaturu i dozračenost ima važnu ulogu pri analizi proizvodnje električne energije iz FN modula.



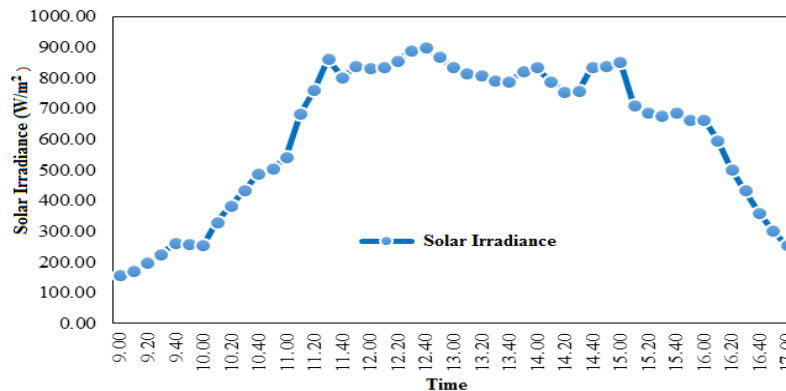
Slika 2.3 - P-U karakteristika pri različitim količinama dozračenosti [1]



Slika 2.4 - Prikaz iskoristivosti pri različitim temperaturama i dozračenosti [1]

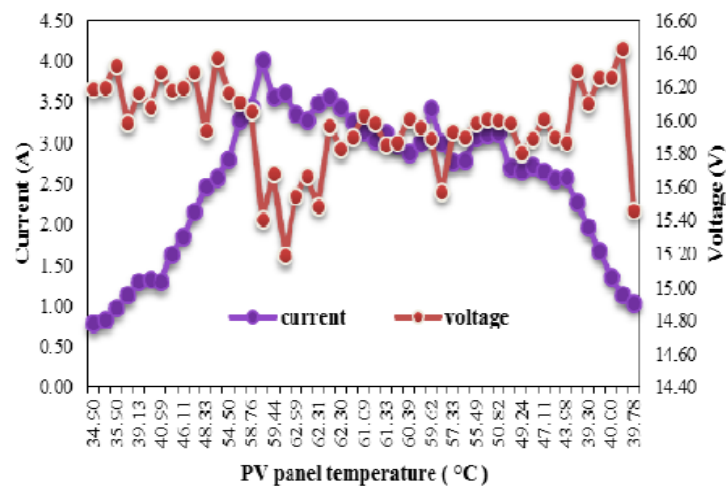
Na Slici 2.4 prikazan je učinak temperature FN modula na iskoristivost sustava pri različitoj dozračenosti. Najveća iskoristivost FN modula će biti većoj dozračenosti i nižoj temperaturi. Iz grafa se može vidjeti da je najveća iskoristivost FN modula od 15,43% postignuta pri

temperaturi panela od  $25^{\circ}\text{C}$  te pri dozračenosti od  $1000\text{ W/m}^2$ . Porastom temperature iskoristivost FN modula opada.



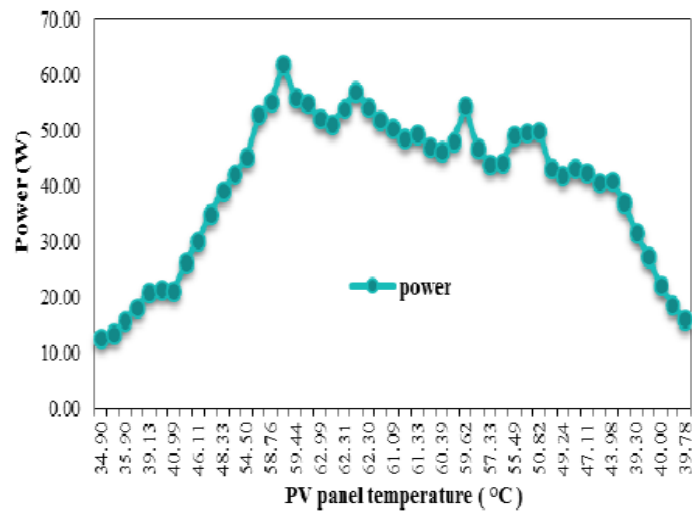
Slika 2.5 - Intenzitet dozračene sunčeve energije tijekom ispitivanja [1]

Promjena intenziteta dozračene energije tijekom perioda mjerenja prikazana je na Slici 2.5. Trend porasta dozračene energije evidentan je tijekom jutarnjih sati, kada u periodu od 11:00 do 15:00 sati doseže maksimalne vrijednosti između  $800$  do  $900\text{ W/m}^2$ . U popodnevnim satima dozračena energija ima trend opadanja. Oscilacije u dozračenju energiji upućuju na prisutnost povremene naoblake.



Slika 2.6 - Prikaz karakteristika struje i napona pri određenim temperaturama [1]

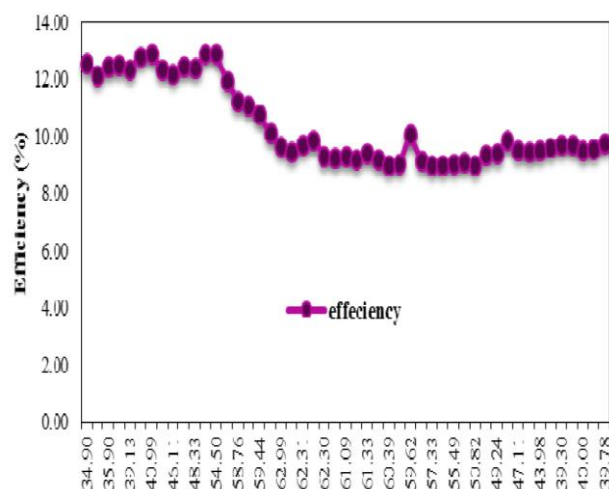
Mjerenjem su prikazane promjene napona i struje u ovisnosti o temperaturi. Maksimalna jakost struje proizvedena je pri temperaturi od  $59,03^{\circ}\text{C}$  i ona je tada iznosila  $4,01\text{ A}$  dok je pri temperaturi od  $34,90^{\circ}\text{C}$  struja iznosila  $0,78\text{ A}$ . Mala izlazna struja je dobivena pri niskim temperaturama panela, odnosno pri maloj dozračenosti. Prema tome izlazna struja dobivena iz FN modula mijenja se u skladu s promjenom dozračenosti.



Slika 2.7 - Prikaz izlazne snage pri različitim temperaturama [1]

Prema Slici 2.7 može se vidjeti ukupna izlazna snaga generirana iz FN modula tijekom mjerenja u ovisnosti o temperaturi. Maksimalna izlazna snaga od 61,76 W postignuta je pri najvećoj temperaturi od 59,03°C, dok je minimalna izmjerena snaga od 12,65 W izmjerena pri temperaturi od 34,90°C.

Analizom prikazanih grafova može se zaključiti da izlazna snaga raste paralelno s izlaznom strujom isto kao i s dozračenosti. Međutim, izlazna snaga FN modula ne može iskoristiti svoj puni potencijal zbog povišene temperature, što ima za rezultat visoku izlaznu struju i niski napon.



Slika 2.8 - Prikaz iskoristivosti FN modula pri određenim temperaturama [1]

Prema Slici 2.8 vidi se prikaz učinkovitosti FN sustava u ovisnosti o temperaturi za različite periode mjerenja. Prema slici vidi se da porast temperature utječe na iskoristivost FN sustava, te da porastom temperature opada iskoristivost. To znači da FN modul prilikom najjačeg osunčanja, odnosno kada je dozračena sunčeva energija najveća, radi s manjom učinkovitosti. Visoka dozračenost povećava izlaznu snagu, ali porast temperature FN modula znatno utječe na pad iskoristivosti.



### 3. OPIS FOTONAPONSKOG SUSTAVA I MJERNE OPREME

#### 3.1. Fotonaponski modul – polikristalni silicij

Prilikom izrade ovog završnog rada izvršena su mjerenja na fotonaponskom sustavu u okviru kojeg su instalirana dva FN modula proizvođača Luxor LX 250P eco line, svaki nazivne snage 250 Wp, odnosno ukupne snage 500 Wp. Prema podacima proizvođača nazivna struja FN modula iznosi 8,14 A, a nazivni napon 30,75 V.



*Slika 3.1 - Luxor LX 250P Polikristalni modul*

Mjerenja su obavljena na lokaciji „Sveučilišnog odjela za stručne studije“, Sveučilišta u Splitu, gdje je fotonaponski sustav instaliran. FN modul se sastoji od 60 fotonaponskih ćelija. Profil panela napravljen je od eloksiranog aluminija koji štiti panel od korozije. Dimenzije FN modula iznose 1640 mm × 990 mm, što mu daje površinu od 1,66 m<sup>2</sup>. Aktivna površina panela proizlazi iz umnoška površine svake ćelije (m<sup>2</sup>) s brojem ćelija:

$$P_{\text{akt}} = 0,156 \text{ m} \times 0,156 \text{ m} \times 60 = 1,46 \text{ m}^2$$

Tablica 3.1 – Električni podatci FN modula [2]

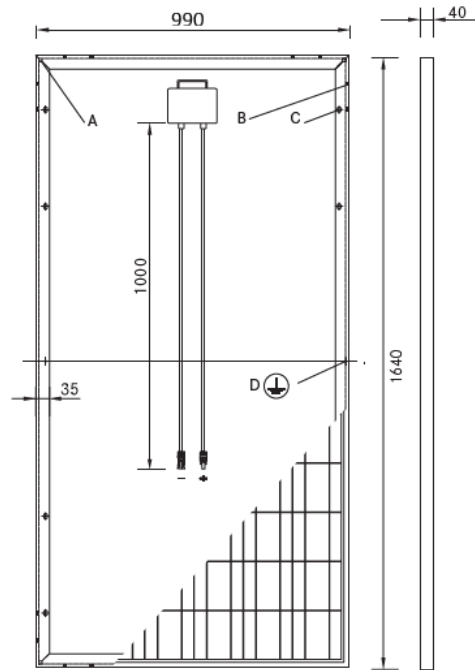
Tehnički podaci	Vrijednost
nazivna snaga [Wp]	250,00
PMPP u rasponu od	250,00
PMPP u rasponu do	256,49
nazivna struja [A]	8,14
nazivni napon [V]	30,75
struja kratkog spoja [A]	8,59
napon otvorenog kruga [V]	37,31
djelotvornost pri STC	15,38%
djelotvornost pri 200 W/m <sup>2</sup>	14,94%
NOCT [°C]	45 ± 2°C

Polikristalni solarni paneli su paneli koji se izrađuju od silicija, ali s obzirom da je silicij loš vodič električne energije i smatra se poluvodičkim materijalom prilikom izrade solarnih ćelija silicij se miješa s drugim komponentama kako bi mu se povećala vodljivost. Neki od materijala koji se koriste za izradu solarnih ćelija su polikristalni silicij, monokristalni silicij, te amorfni silicij.

Polikristalni solarni paneli dobiju se na način da se tijekom proizvodnog procesa rastopi velika količina odlomljenog silicija i tako se oblikuju solarne ploče. Kod upotrebe polikristalnih solarnih panela, prednost je što su oni lakši i sam njihov proizvodni postupak je jeftiniji, a imaju razinu učinkovitosti oko 16 %. Tehnički podaci dani su u Tablicama 3.1 i 3.2.

Tablica 3.2 – Specifikacije FN modula [2]

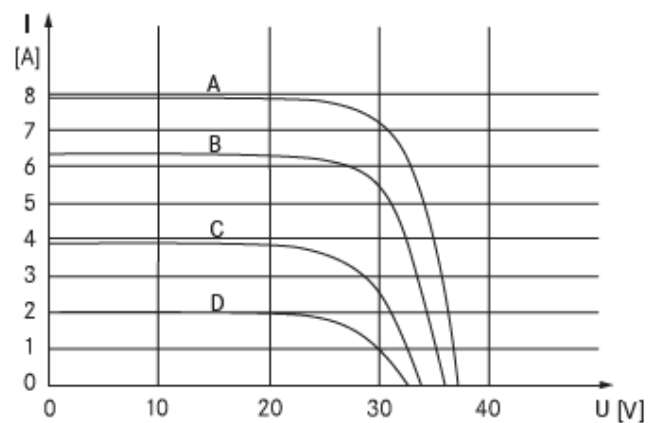
specifikacije	vrijednosti
broj ćelija	6 × 10, tri žice u nizu
veličina ćelija	156 mm × 156 mm
dimenzije modula (L×W×H)	1640 mm × 990 mm × 40 mm (18,3 kg)
prednje bočno staklo	3,2 mm očvrstnuto solarno staklo s niskim udjelom željeza
okvir	stabilan, anodiziran aluminijski okvir u šupljem presjeku
utičnica	plastična (PPO) IP65, prozračena i rasterećena
diode	3 Schottky diode 15 A / 45 V
kabel	4 mm <sup>2</sup> solarni kabel dužine 1 m
utikač u spoju	visoko kvalitetni priključni sustav, (IP65) MC4 ili slično
test izdržljivosti tuče	Ø 45 mm, brzine udara od 23 m/s
tehnička odobrenja	klasificirano prema DIN EN 13501-5 B-roof



Slika 3.2 - Dimenzije FN modula [2]

- A: 4 x drainage 10\*10 mm
- B: 8 x ventilation aperture 3\*7 mm
- C: 8 x mounting hole<sup>4</sup> d = 7 mm
- D: 2 x earthing d = 2 mm

### Characteristics



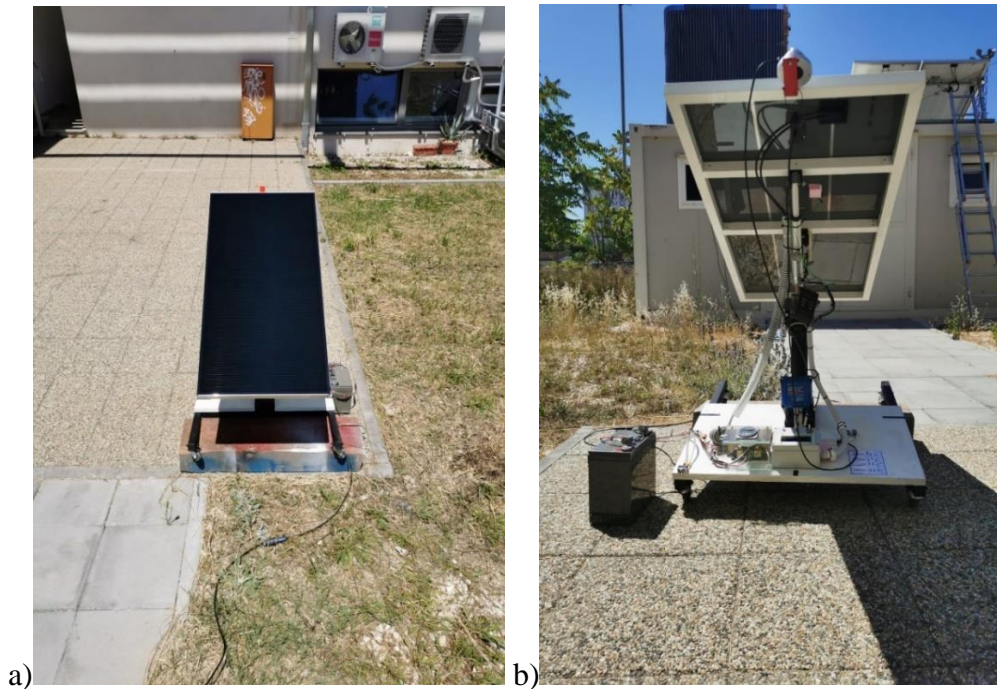
A: 1000 W/m<sup>2</sup> | B: 800 W/m<sup>2</sup> | C: 500 W/m<sup>2</sup> | D: 250 W/m<sup>2</sup>

Slika 3.3 - Karakteristike struje i napona [2]

Na Slici 3.2 prikazane su dimenzije FN modula, dok je na Slici 3.3 prikazana karakteristika struje i napona u ovisnosti dozračenosti sunčevoj energiji.

### 3.2. Tankoslojni fotonaponski modul - kadmij telurid

Prilikom mjerenja korišten je i tankoslojni modul CX3 (Slika 3.4) koji koristi tehnologiju izrade fotonaponskih ćelija od kadmija i telurida (CdTe). CdTe je trenutno jedini tankoslojni fotonaponski modul na tržištu koji ima niže troškove od uobičajenih solarnih panela koji su izrađeni od kristala silicija. CdTe tehnologiju izvorno je razvila američka tvrtka Solar Fields. Zbog svojih fizičkih svojstava, kadmij telurid je idealan izbor za učinkovitu pretvorbu energije zračenja u električnu energiju, čak i u težim radnim uvjetima poput visoke temperature ljeti, oblačnog vremena, malog nagiba ili loše orijentacije krova.



*Slika 3.4 - a) prednji izgled CdTe tankoslojnog CX3 fotonaponskog modula [3] b) prednji izgled CdTe tankoslojnog CX3 fotonaponskog modula [3]*

Tehnička specifikacija korištenog tankoslojnog fotonaponskog modula prikazana je u Tablici 3.3. Nazivna snaga FN modula iznosi 80 Wp, dok su dimenzije modula  $1,2 \text{ m} \times 0,6 \text{ m}$  što daje površinu modula od  $0,72 \text{ m}^2$  dok je efektivna površina  $0,68 \text{ m}^2$ .

Tablica 3.3 – Tehničke specifikacije CdTe [3]

Tip modula	CX3 – serija
Izvedba	Staklo – staklo laminat
Tip ćelija	Kadmij telurid/kadmij sulfid [CdTe / CdS]
Dimenzije	1200 mm × 600 mm
Debljina	6,9 mm (21,0 mm uključujući razvodnu kutiju)
Površina	0,68 m <sup>2</sup>
Težina	12 kg
Gornji pokrov	3,2 mm staklo
Donji pokrov	3,2 mm staklo
Okvir	ne postoji
Max. Napon sustava V <sub>sys</sub>	1000V [IEC], 600V [UL]
Struja pri maks. izlaznoj snazi	4 [A]
Razvodna kutija	Zaštita IP65, bez obilazne diode
Priključnica	Yamaichi Y-Sol4
PV-Kabel	Studer kabel Betaflam 125 flex, 1,5 m <sup>2</sup>
Razred kakvoće	B
Vjetar/snijeg izdržljivost	2400Pa [IEC], 35lb [UL]
Odobrenja/Certifikati	IEC 61646 (Ed.2); IEC 61730 (Ed.1); BRE MCS, CE
Reciklaža	PV Ciklus

CdTe tehnologija ima nekoliko prednosti u odnosu na polikristalnu tehnologiju, a neke od njih su [4]:

- Jednostavna proizvodnja: električno polje potrebno za pretvorbu sunčeve energije u električnu energiju koja dolazi od karakteristika dviju molekula kadmija, kadmij sulfida i kadmij telurida. To znači da jednostavna smjesa molekula postiže željena svojstva i olakšava samu proizvodnju u usporedbi s postupkom spajanja dviju različitih vrsta silicija u silicijsku solarnu ploču.
- Dobro se podudara sa sunčevom svjetlošću. Kadmij - telurid odlično upija sunčevu svjetlost, skoro pa do idealne valne duljine, te hvata energiju na kraćoj valnoj duljini, što je kod silikonskih panela puno teže.
- Kadmija ima u izobilju, što je nusproizvod cinka i drugih bitnih industrijskih metala, pa u posljednje dvije godine nije došlo do šire promjene cijena s cijenama silicija.
- Cijena kadmij – telurida je povoljnija u odnosu na polikristal



CdTe tehnologija ima i nedostataka u odnosu na polikristalnu tehnologiju, kao što su [4]:

- Niža razina učinkovitosti: Solarni paneli s tehnologijom kadmij – telurid trenutno postižu znatno manju učinkovitost od silicijskih solarnih panela. Tako je kod kadmij – telurida iskoristivost do 10,6 %, a kod polikristalnih solarnih panela je ona do 16 %.
- Opskrba teluridom: Iako je kadmij materijal kojeg ima na izobilje, telurid s druge strane je jako rijedak materijal. Prema podacima USGS-a (United States Geological Survey) globalna proizvodnja telurida u 2007. iznosila je 135 metričkih tona, a većina tog materijala je proizvedena kao nusproizvod bakra, s manjim nusproizvodom od olova i zlata. Za jedan GW snage CdTe FN modula bilo bi potrebno oko 93 metričkih tona, te se zbog toga, što je telurid jako rijedak materijal, ograničava proizvodnja tih FN modula. Kako se CdTe tehnologija smatra bitnom u pogledu na globalnu energiju i okoliš, pitanje dostupnosti telurida je jako bitno. Prema posljednjim istraživanjima saznalo se da je telur najzastupljeniji element u svemiru s atomskim brojem 40, a to nadmašuje i teže materijale kao što su kositar, bizmut i olovo, a ti materijali jako su česti. Istraživači su također doznali da su podmorski grebeni bogati telurom te da bi oni sami po sebi mogli isporučiti više telura, nego što bi se ikad moglo iskoristiti za svu našu globalnu energiju. Još nije poznato je li telur, koji je dobiven iz podmorskog grebena obnovljiv, isto kao što se ne zna postoji li još telurija gdje god drugdje, a da se može obnoviti.

Veliki problem ove tehnologije je taj što je kadmij, kao materijal, veoma opasan te je jedan od najsmrtonosnijih i najotrovnijih materijala na svijetu. Pokazalo se da kadmij u kombinaciji s telurom ima manju otrovnost, barem što se tiče akutne izloženosti, ali to ne znači da je bezopasan. Kadmij – telurid je otrovan ako ga se proguta, ako se udiše prašina ili ako se nepravilno rukuje s njim, odnosno bez odgovarajuće opreme (rukavica) i sigurnosnih mjera opreza. Zbrinjavanje i dugoročna sigurnost kadmij – telurida je poznati problem glede velike komercijalizacije solarnih ploča izrađenih od kadmij – telurida, te je uloženo dosta truda kako bi se taj problem shvatio i pokušao riješiti. Istraživači iz Nacionalnog laboratorija američkog Ministarstva energetike Brookhaven [4] otkrili su da velika uporaba CdTe FN modula ne predstavlja rizik za zdravlje i okoliš, a recikliranje modula na kraju njihovog korisnog vijeka rješava bilo kakve opasnosti za okoliš. Tijekom svog rada CdTe FN moduli ne proizvode nikakve onečišćujuće tvari, te se čini da su CdTe FN moduli prihvatljiviji od svih ostalih

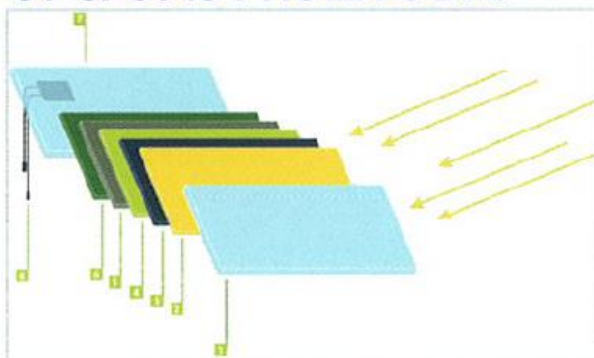
primjena kadmija. Međutim u Europskoj uniji i Kini se gleda drugačije i pristupa se s većom sigurnošću. U EU smatraju kadmij i njegove spojeve otrovnim kancerogenim sredstvima te se pitanje regulacije i upotrebe kadmij – telurida trenutno raspravlja u Europi, a kineski propisi dopuštaju samo proizvodnju kadmija za izvoz.

Električni podaci korištenog FN modula prikazani su u Tablici 3.4, dok je Slikom 3.5 dan opis proizvoda.

Tablica 3.4 – Električne karakteristike CX3 modula [3]

Klasa modula	CX3		75	77	80	82	85
Nazivna snaga (+/- 5%)	Pmpp	[W]	75	77,5	80	82,5	85
Struja pri maks. snazi	Imp	[I]	1,65	1,68	1,72	1,75	1,78
Napon pri maks. snazi	Vmpp	[V]	46,3	46,7	47	47,3	47,8
Struja kratkog spoja	Isc	[I]	1,95	1,98	2,01	2,04	2,06
Napon otvorenog kruga	Voc	[V]	62	62,5	62,8	63,2	63,6

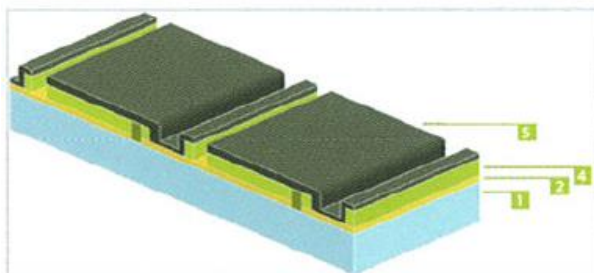
## OPĆI OPIS PROIZVODA:



Poprečni presjek Calyxo modula :

- [1] Prednje staklo
- [2] Prednji spoj : visoko propustan sloj sa odličnom električnom konduktivnošću za maksimalan prolaz svjetla i protok struje gotovo bez otpora
- [3] CdS sloj (0,1  $\mu\text{m}$ )
- [4] CdTe sloj (3,0  $\mu\text{m}$ )
- [5] Crni spoj : visoko stabilni, električno konduktivni metal
- [6] Staklo laminat sloj : vodonepropusna brtva, sigurna zaštita od gubitka sastojaka ( npr. u slučaju bilo kakvog oštećenja ), sigurna brtva krajeva modula
- [7] Stražnje staklo : specijalno ojačano staklo dizajnirano za zadovoljavanje dugoročnih zahtjeva za proizvodnjom
- [8] Razvodna kutija : uključuje solarni kabel i konektor

## INOVATIVNA TEHNOLOGIJA



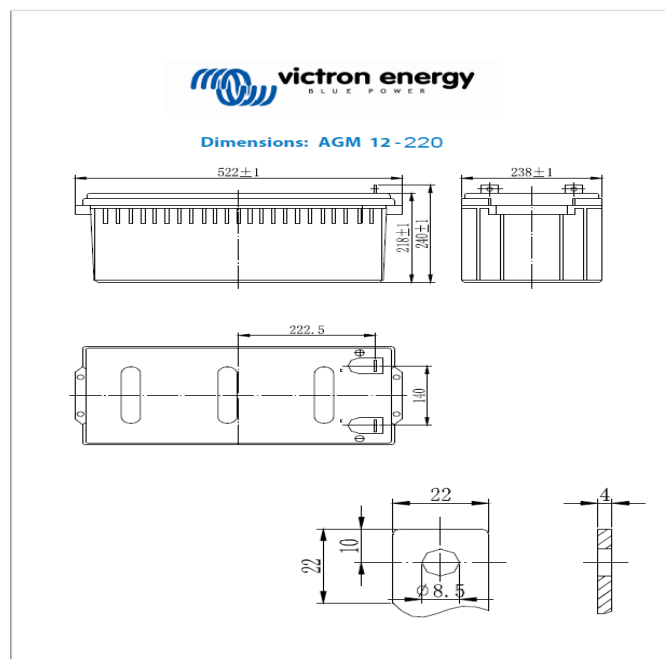
Slika 3.5 - Opći opis proizvoda [3]

### 3.3. Akumulatorska baterija AGM 12V/220Ah

Baterije koje su se koristile prilikom izvođenja mjerenja u slučaju za polikristalni FN modul su Victron Energy AGM baterije koje imaju nazivni napon od 12 V i nazivni kapacitet od 220 Ah (Slike 3.6 i 3.7). Korištene su dvije baterije spojene u seriju, što daje ukupno napon od 24 V i kapacitet od 220 Ah. AGM baterije imaju vrlo malen unutarnji otpor te su zbog toga prikladne za pražnjenje gdje je visoka struja, kao što su pretvarači. AGM baterije koriste rešetke od olova i kalcija te imaju nisko samopražnjenje, što im osigurava duži vijek trajanja ako se dugo vremena ne pune.



Slika 3.6 - Victron Energy AGM baterija 12V 220 Ah



Slika 3.7 - Dimenzije AGM baterije [5]

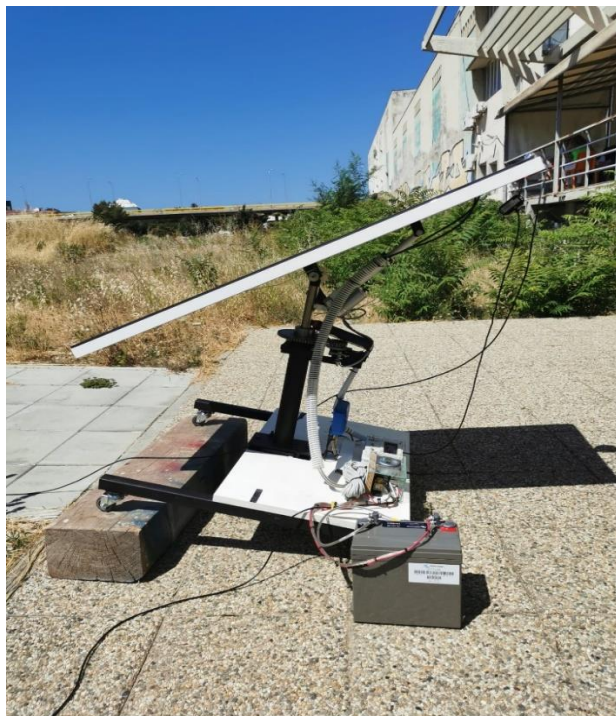


### 3.4. Akumulatorska baterija AGM 12V/60Ah

Baterija koja se koristila prilikom izvođenja mjerenja za tehnologiju kadmij – telurid je Victron Energy AGM baterija koja ima nazivni napon od 12 V, te nazivni kapacitet 60 Ah (Slike 3.8 i 3.9).



*Slika 3.8 - Victron Energy AGM baterija 12V/60Ah*



*Slika 3.9 - Prikaz 12V/60Ah AGM baterije spojene na CdTe tehnologiju*

### 3.5. MPPT 75/15 solarni regulator punjenja

MPPT (eng. Maximum Power Point Tracking) regulator punjenja odnosno praćenja maksimalne točke snage osigurava indirektnu vezu između baterije i FN modula. Ovaj neizravni priključak uključuje DC/DC pretvarač napona koji uzima dodatni FN napon i pretvara ga u dodatnu struju pri nižem naponu, a da pri tome nužno ne gubi snagu.

MPPT kontroleri to mogu izvesti zbog adaptivnog algoritma koji prati MPPT FN polja, a koji zatim prilagođava dolazni napon kako bi održao najučinkovitiju razinu snage sustava [6].



Slika 3.10 - Solarni regulator punjenja

Solarni punjač prikuplja energiju iz solarnih panela te je pohranjuje u bateriju. Koristeći najnoviju i najbržu tehnologiju SmartSolar maksimizira ovu energiju, tako da postigne potpuno punjenje u što kraćem mogućem roku.

### 3.6. Li-19 Data Logger

Li-19 je data logger (Slika 3.11) na koji se spaja piranometar Hukseflux LP-02. LI-19 mjeri istosmjerni napon te prikazuje trenutnu ukupno dozračenu sunčevu energiju u  $W/m^2$ . Upotrebom prikladnog programa spaja se s računalom u svrhu prikaza i pohrane izmjenjenih vrijednosti. Pri završetku mjerenja pohranjeni podaci mogu se dalje obrađivati u svrhu grafičkih prikaza ili naknadne obrade izmjenjenih podataka.

Detaljna tehnička specifikacija LI-19 dana loggera prikazana je u Tablici 3.5.



Slika 3.11 - LI-19 data logger

Tablica 3.5 – Specifikacije LI-19 data logger [7]

Tehnički podatak	Opis
izlaz na zaslonu	toplinski tok, sunčevo zračenje
ulaz	analogni napon
pretvorba	podjela osjetljivosti senzora
definicija prikaza	četiri znamenke sa znakom
prikaz brzine osvježavanja	1 S <sup>(-1)</sup>
kalibracijska greška	0,1%
ovisnost o temperaturi	<0,5 % + 3 · 10 <sup>(-6)</sup> V preko predviđenog raspona
uzorak stope	2 S <sup>(-1)</sup>
nazivno područje ulaza	6,25 do 200 x 10 <sup>(-3)</sup>
A/D pretvorba	16 bita
pohranjena definicija mjerenja	
kapacitet za pohranu	3518 mjerenja
raspon intervala za pohranu	2 do 65535 s
kompatibilnost sa hukseflux sensorima	SR05-A1, HFP01, SBG01, HF03
tip baterije	2 x AA
unutarnji napon napajanja	3 VDC
vijek trajanja baterije	> 50 dana
nazivni raspon radne temperature	od -10 do + 40 °C
vrsta OS-a za uparivanje s računalom	Windows XP i noviji

priključak za računalo	USB 1.1 / 2.0
korisničko sučelje za računalo	LI19 software
IP razred zaštite	IP40
priključak za senzor	2 ženska priključka za utor od 4 mm
težina	0,175 kg (neto) 1,3 kg sa torbicom
dimenzije	(70 x 146 x 25) mm
dimenzije kućišta	(400 x 300 x 120) mm

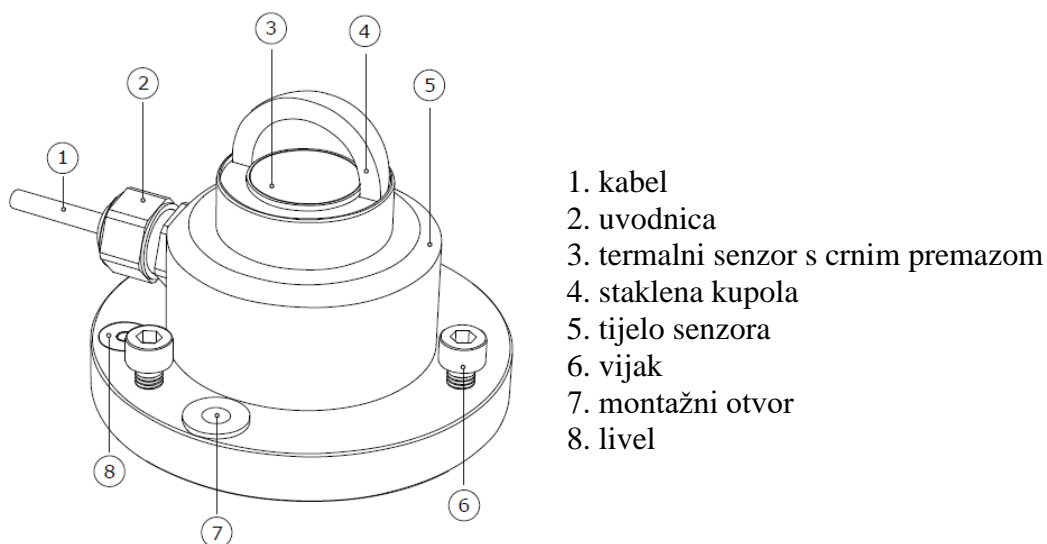
### 3.7. Piranometar LP02

LP02 piranometar (Slika 3.12) je piranometar drugog razreda koji je sukladan s normama ISO 9060. To je senzor koji služi za mjerenje ukupno dozračene sunčeve energije. Senzor prima sunčevu energiju koja se preko data loggera LI-19 transformira u podatke o dozračenoj sunčevoj energiji. Piranometar mora biti postavljen pod istim kutom kao što je postavljen fotonaponski modul, što je u ovom slučaju pod kutom od 26 stupnjeva. Kut primjene pod kojom se mjeri dozračena sunčeva energija je do 180 stupnjeva. Dobivena dozračena sunčeva energija je izražena u  $W/m^2$ .



*Slika 3.12 - Piranometar*

LP02 piranometar se može koristiti na otvorenom ili u zatvorenom prostoru sa solarnim simulatorima koji koriste svjetlo svjetiljki. Orijentacija piranometra ovisi o njegovoj primjeni te ona može biti vodoravna, nagnuta ili obrnuta (za reflektirano zračenje). LP02 piranometar koristi toplinski senzor s crnim premazom, staklenu kupolu i anodizirano aluminijsko tijelo.



Slika 3.13 - Komponente piranometra [8]

Detaljni tehnički podaci za piranometar LP02 prikazani su u Tablici 3.6.

Tablica 3.6 – Specifikacije LP02 piranometra [8]

Tehnički podatak	Opis
senzor	zatamnjena termopila zaštićena kupolom
opis mjerenja	nadgleda sunčevo zračenje za puni domet sunčevog spektra
spektralni domet	285 - 3000 nm
maksimalna dozračenost	2000 W/m <sup>2</sup>
osjetljivost	15 μV/W/m <sup>2</sup>
raspon radne temperature	-40° do + 80°
ovisnost o temperaturi	< 0,15% po °C
ISO klasifikacija	ISO 9060:2018
promjer tijela	7,8 cm
promjer kupole	3,0 cm
visina	5,9 cm
težina	363 g sa 4,6 m kabela

### 3.8. Nadzornik baterija BMV 700

BMV 700 je nadzornik baterije, a služi kako bi se dobio uvid u radne parametre baterije, odnosno:

- napon baterije (V)



- struja punjenja/praznjenja (A)
- energija potrošene iz ili pohranjene u bateriju (Ah)
- stanje napunjenosti (%)

Nadzornik baterije se spaja s računalom te se primjenom prikladnog računalnog programa (BMV Reader) može dobiti uvid u radne parametre akumulatorskih baterija.

Preostali kapacitet baterije ovisi o potrošenim amper satima (Ah), struji punjenja, temperaturi i starosti baterije. Nadzornik baterija može se dodatno povezati s pametnim telefonom te upotrebom aplikacije „Victron Connect“ prikazati radne parametre fotonaponskog modula i baterija (Slika 3.14).



Slika 3.14 - Izgled aplikacije Victron Connect

Standardne značajke nadzornika baterija BMV 700, Slika 3.15 [9]:

- preostalo vrijeme pri trenutnoj brzini praznjenja
- programirani vizualni i zvučni alarm
- programirani relej za pomoću kojih se isključuju nekritična opterećenja, ili pokretanje generatora prema potrebi

- sklopka od 500 A za brzo povezivanje, te priključni komplet
- mogućnost odabira šanta od 10000 A
- Victron Energy Direct priključni port
- širok spektar pohrane
- široki raspon ulaznog napona od 9.5 V do 95 V
- Rezolucija mjerenja visoke struje 10mA (0,01A)
- niska potrošnja struje od 2,9 Ah mjesečno (4mA) pri 12 V i 2,2 Ah mjesečno (3mA) pri 24V



Slika 3.15 - Nadzornik baterije BMV 700

### 3.9. Termometar SE 309

Prilikom mjerenja temperature na FN modulima koristio se četverokanalni digitalni termometar SE 309 s data loggerom (Slika 3.16). Prilikom mjerenja korištena su dva kanala, odnosno, dva mjerna mjesta koja su bila postavljena na zadnjoj površini fotonaponskih

pretvornika. Srednja vrijednost temperature korištena je pri obradi mjerenih podataka. Mjerno područje termometra je od 200°C do 1370°C.



Slika 3.16 - Termometar SE 309

### 3.10. Regulator punjenja PR 2020

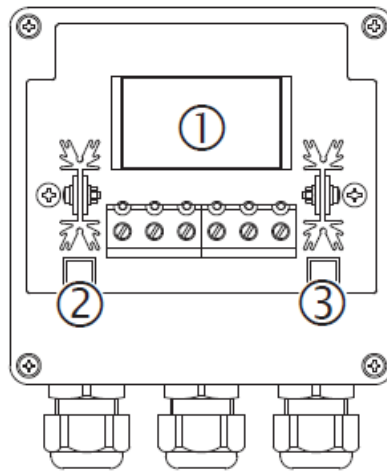
Regulator punjenja fotonaponskog modula opremljen je velikim zaslonom koji prikazuje postotak trenutnog stanja napunjenosti. Steca PR 2020 IP posebno je dizajniran za rad u teškim uvjetima s visokim udjelom soli, vlage i prašine.

Na Slici 3.17 prikazan je regulator punjenja pri čemu prikazane brojčane oznake predstavljaju:

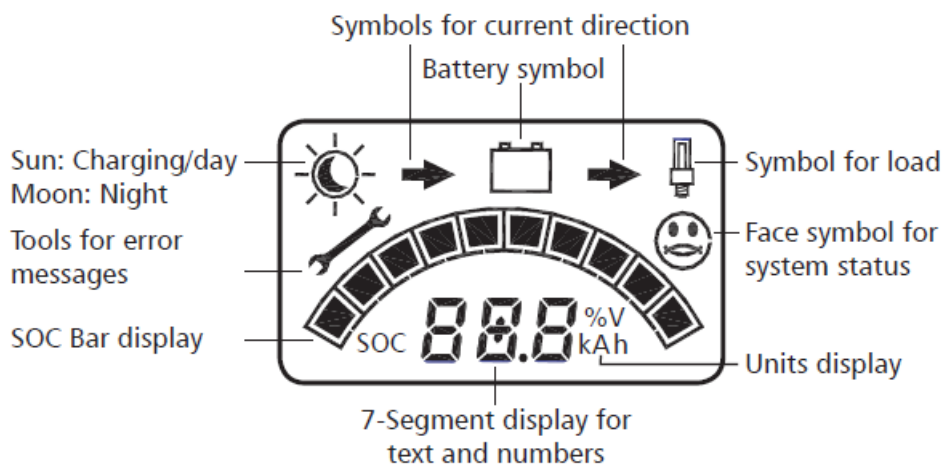
1. Zaslom sustava informacija i poruka (Slika 3.18)
2. Tipka za prebacivanje ili pozivanje nekih postavki



## 3. Ručna sklopka ili tipka za potvrdu



Slika 3.17 - Elementi prikaza i rada [10]



Slika 3.18 - Monitor trenutnog stanja regulatora punjenja [10]

U trenutnom prikazu može se vidjeti:

- prikaz stanja napunjenosti
- prikaz pogreške
- sunce – punjenje tijekom dana ; mjesec – punjenje tijekom noći

- simboli smjera struje
- simbol baterije
- simbol za punjenje
- simbol za status sustava
- prikaz jedinica
- sedmo-segmentni zaslon za tekst i brojeve

Izgled laboratorijskog regulatora punjenja za fotonaponske module prikazan je na Slici 3.19.



*Slika 3.19 - STECA PR 2020 IP65*

## 4. MJERENJA I PRIKAZ REZULZAZA ZA POLIKRISTALNI FOTONAPONSKI MODUL I TANKOSLOJNI CdTe

### 4.1. Mjerenja i prikaz rezultata za polikristalni FN modul

#### 4.1.1. Polikristal - probno mjerenje 11. svibnja 2021.

Za potrebe završnog rada obavljeno je mjerenje utjecaja temperature na efikasnost sustava solarnih fotonaponskih pretvornika, pri čemu je korištena u prethodnim poglavljima navedena mjerna oprema

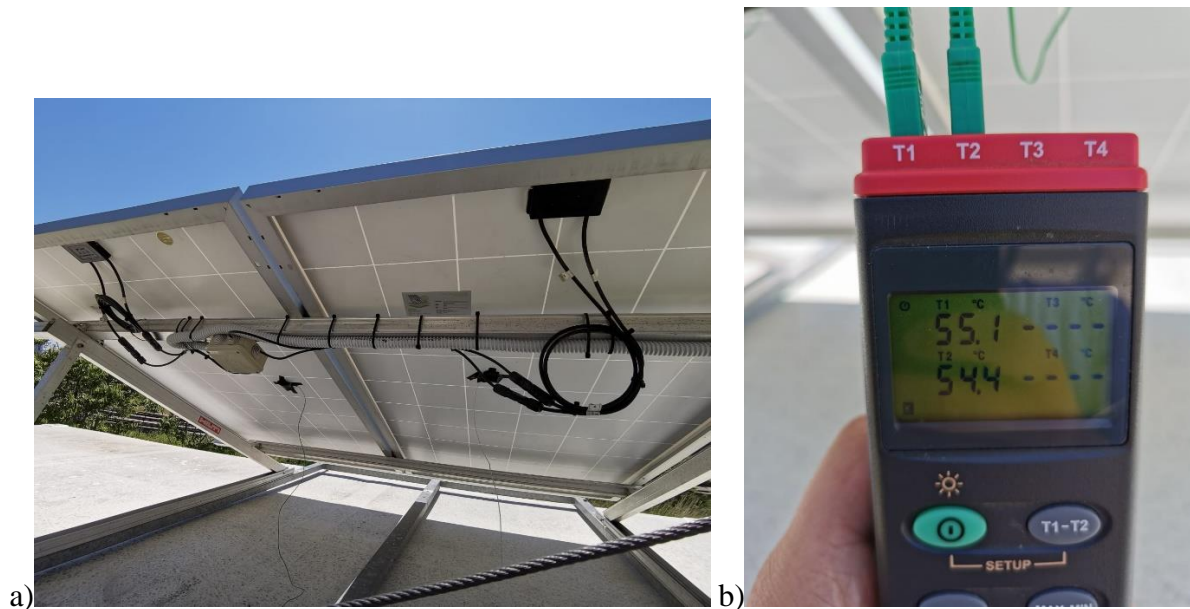
Mjerenje je izvršeno na polikristalnim fotonaponskim modulima Luxor LX 250P eco line. Prvo mjerenje obavljeno je 11. svibnja 2021. koje je ujedno bilo i probno mjerenje kako bi se provjerila funkcionalnost svih elemenata te potvrdio koncept provedbe mjerenja. Također je bitno naglasiti da su prije početka mjerenja FN moduli detaljno očišćeni od nakupljenih naslaga kako bi se umanjio utjecaj vanjskih faktora na kvalitetu mjerenja.

Probno mjerenje je pokazalo jedan nedostatak koji je naknadno uklonjen. Jedan od temperaturnih senzora, koji su bili pričvršćeni na površinu fotonaponskih modula, nije bio prikladno pričvršćen što je utjecalo na izmjerene vrijednosti temperatura, odnosno, njihovu oscilaciju u vremenu.

Tablica 4.1 – Rezultati mjerenja temperature, dozračene energije i karakteristike napona i struje

Vrijeme	Dozračena energija			Napon	Struja	Temperatura
	Min.	Max.	Sred.			
9:00	576	582	579	25,77	9,76	46
9:30	661	665	663	26,08	10,86	52
10:00	764	770	767	26,5	12,15	53
10:30	845	856	851	26,56	13,33	53,8
11:00	926	934	930	26,59	14,2	54,2
11:30	974	983	979	26,62	14,73	55
12:00	1019	1030	1025	26,67	15,23	56,4
12:30	1035	1044	1040	26,66	14,85	57,7
13:00	1043	1050	1047	26,61	14,76	60
13:30	1028	1036	1032	26,62	14,66	59,3
14:00	989	1004	997	26,66	14,72	53

Mjerenje je trajalo od 9:00 do 14:00 sati, što je prikazano u (Tablici 4.1). S obzirom na inertnost sustava, prikazane su očitane vrijednosti svakih 30 minuta, i to za dozračenu energiju sunca, vrijednosti napona i struje punjenja baterija, te srednje temperature površine FN modula. Izgled pozadine FN modula, gdje su pričvršćeni temperaturni senzori, te termometar prikazani su na Slici 4.1.



*Slika 4.1 - a) Prikaz dvaju temperaturnih senzora na poledini FN modula b) Prikaz minimalne i maksimalne izmjerene temperature na termometru*



*Slika 4.2 – Trenutačna temperatura solarnog panela slikano sa termalnom kamerom*

Na Slici 4.2 prikazan je snimak fotonaponskih modula napravljen termalnom kamerom, gdje su crvenom i roza bojom prikazana područja najviše temperature.

Tablica 4.2 – Rezultati mjerenja radnih karakteristika - utjecaj temperature na iskoristivost FN sustava – polikristalni silicij - A

	9:00	9:30	10:00	10:30	11:00	11:30
Dozračena sunčeva energija (W/m <sup>2</sup> )	579	663	767	851	930	979
Temperatura modula (°C)	46,0	52,0	53,0	53,8	54,2	55,0
Napon (V)	25,77	26,08	26,5	26,56	26,59	26,62
Struja (A)	9,76	10,86	12,15	13,33	14,2	14,73
Aktivna površina panela (m <sup>2</sup> )	2,92	2,92	2,92	2,92	2,92	2,92
Trenutna dozračena snaga (W)	1.690,7	1.936,0	2.239,6	2.484,9	2.715,6	2.858,7
Snaga punjenja baterije (W)	251,5	283,2	322,0	354,0	377,6	392,1
Iskoristivost (%)	14,88	14,63	14,38	14,25	13,90	13,72

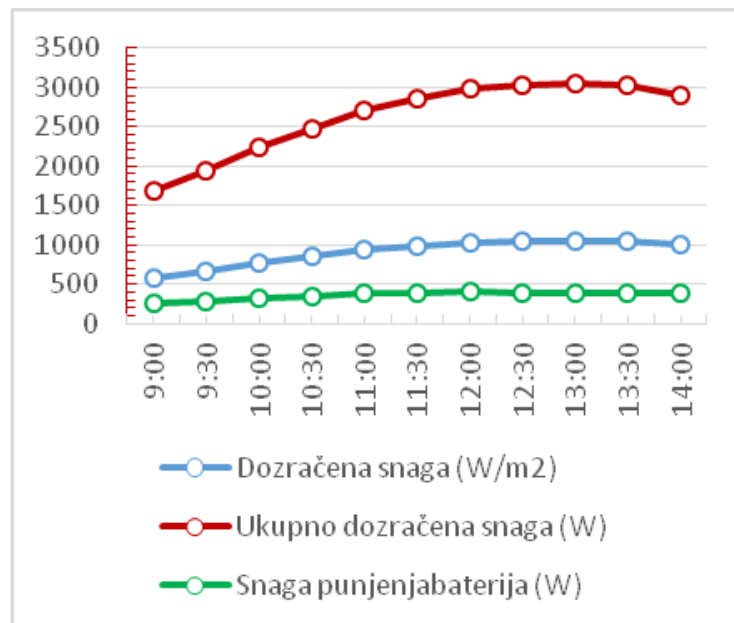
	12:00	12:30	13:00	13:30	14:00
Dozračena sunčeva energija (W/m <sup>2</sup> )	1025	1040	1047	1040	997
Temperatura modula (°C)	56,4	57,7	60,0	59,3	53,0
Napon (V)	26,67	26,66	26,61	26,62	26,66
Struja (A)	15,23	14,85	14,76	14,66	14,72
Aktivna površina panela (m <sup>2</sup> )	2,92	2,92	2,92	2,92	2,92
Trenutna dozračena snaga (W)	2.993,0	3.036,8	3.057,2	3.036,8	2.911,2
Snaga punjenja baterije (W)	406,2	395,9	392,8	390,2	392,4
Iskoristivost (%)	13,57	13,04	12,85	12,85	13,48

Prema Tablici 4.2 mogu se vidjeti radni parametri koji su očitavani s mjerne opreme tijekom rada FN sustava. Očitavanje je vršeno svakih 30 minuta tijekom vremenskog razdoblja od 9:00 do 14:00 sati. Iz tablice se vidi promjena struje i napona punjenja akumulatora tijekom vremena.

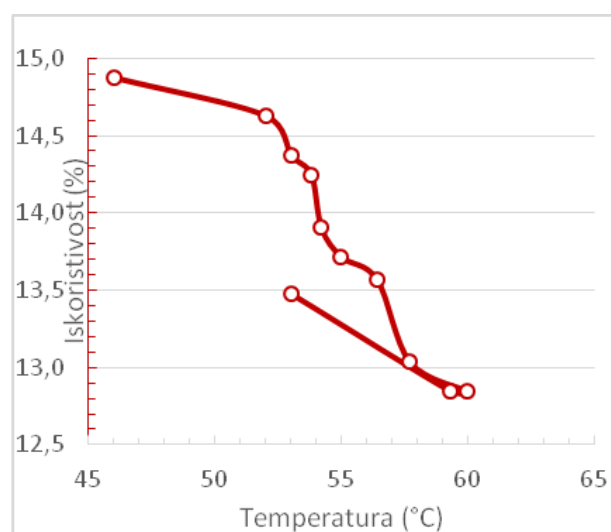
Umnoškom napona i struje punjenja izračunata je trenutna snaga punjenja baterija, koja varira ovisno o promjeni I-U karakteristike fotonaponskih modula. Na dnu tablice prikazane su trenutne vrijednosti iskoristivosti fotonaponskog sustava. Iskoristivost proizlazi iz omjera trenutne snage punjenja baterija i trenutne dozračene snage sunčeve energije koja je raspoloživa na efektivnu površinu fotonaponskih modula.

Iskoristivost FN sustava najveća (14,8 %) je na početku mjerenja, ujutro u 9:00 sati, kada je i temperatura fotonaponskih modula najniža (46°C). U 13:00 sati iskoristivost FN sustava ima najnižu vrijednost od 12,85 % pri najvišoj temperaturi površine FN modula tijekom mjerenja u iznosu od 60°C. Pri kraju mjerenja, u 14:00 sati, kada je temperatura površine FN modula počela opadati (53°C), učinkovitost FN sustava se povećava te iznosi 13,48 %.

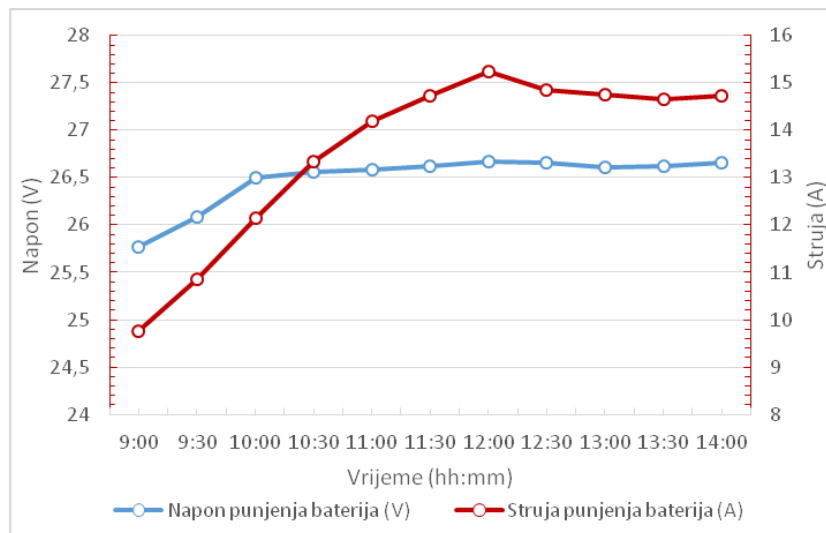
Grafički prikaz izmjerenih rezultata prikazan je na Slikama 4.3 do 4.6.



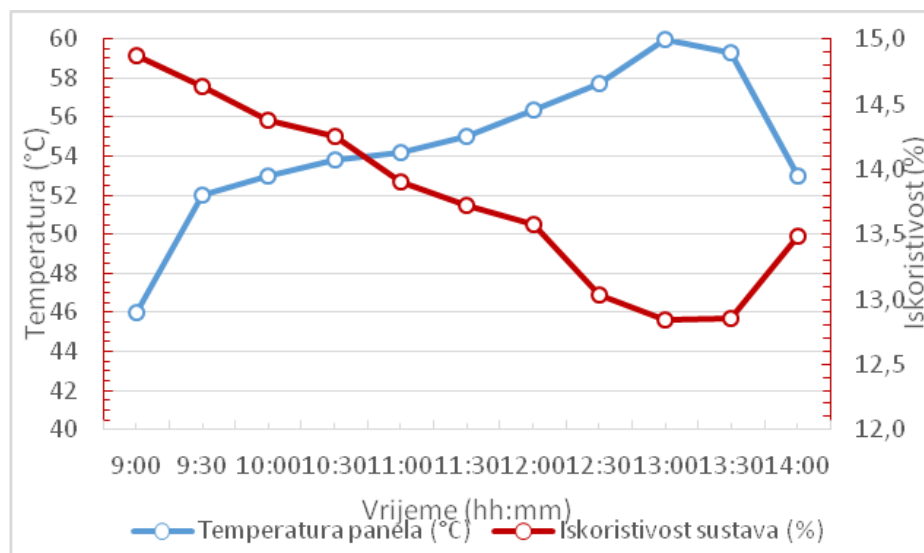
Slika 4.3 – Grafički prikaz dozračene snage, ukupne dozračene snage i snage punjenja baterija



Slika 4.4 Grafički prikaz iskoristivosti u odnosu na temperaturu FN modula



Slika 4.5 - Grafički prikaz promjene napona i struje u određenom vremenu



Slika 4.6 - Grafički prikaz temperature i iskoristivosti FN modula u određenom vremenu

#### 4.1.2. Polikristal - mjerenje 9. lipnja 2021.

Mjerenje je provedeno na isti način kao i probno mjerenje tako da nije potrebno detaljnije opisivati postupak mjerenja i mjerene veličine.

Mjerenje je provedeno u vremenskom periodu od 9:00 do 16:00 sati, s namjerom da se uoči trend promjene učinkovitosti pri porastu temperature površine modula, te pri snižavanju temperature u popodnevnim satima.

Tablica 4.3 – Rezultati mjerenja radnih karakteristika - utjecaj temperature na iskoristivost FN sustava – polikristalni silicij - B

	9:00	9:30	10:00	10:30	11:00
Dozračena sunčeva energija (W/m <sup>2</sup> )	569	671	772	847	913
Temperatura modula (°C)	44,6	47,7	50,2	53,9	54,7
Napon (V)	25,88	26,19	26,44	26,54	26,6
Struja (A)	9,48	10,97	12,28	13,12	13,94
Aktivna površina panela (m <sup>2</sup> )	2,92	2,92	2,92	2,92	2,92
Trenutna dozračena snaga (W)	1661,48	1959,32	2254,24	2473,24	2665,96
Snaga punjenja baterije (W)	245,34	287,30	324,68	348,20	370,80
Iskoristivost (%)	14,77	14,66	14,40	14,08	13,91

	11:30	12:00	12:30	13:00	13:30
Dozračena sunčeva energija (W/m <sup>2</sup> )	979	1008	1030	1037	1053
Temperatura modula (°C)	57,4	65,2	65,8	64,7	59,8
Napon (V)	26,61	26,6	26,6	26,64	26,65
Struja (A)	14,44	13,95	14	14,43	15,15
Aktivna površina panela (m <sup>2</sup> )	2,92	2,92	2,92	2,92	2,92
Trenutna dozračena snaga (W)	2858,68	2943,36	3007,6	3028,04	3074,76
Snaga punjenja baterije (W)	384,25	371,07	372,40	384,42	403,75
Iskoristivost (%)	13,44	12,61	12,38	12,70	13,13

	14:00	14:30	15:00	15:30	16:00
Dozračena sunčeva energija (W/m <sup>2</sup> )	1052	973	906	818	774
Temperatura modula (°C)	53,6	60,4	57,9	50	48,9
Napon (V)	26,65	26,66	26,67	26,65	26,62
Struja (A)	15,72	13,81	13,3	12,41	11,5
Aktivna površina panela (m <sup>2</sup> )	2,92	2,92	2,92	2,92	2,92
Trenutna dozračena snaga (W)	3071,84	2841,16	2645,52	2388,56	2260,08
Snaga punjenja baterije (W)	418,94	368,17	354,71	330,73	306,13
Iskoristivost (%)	13,64	12,96	13,41	13,85	13,55

Kao što je bio slučaj i s probnim mjerenjem, iskoristivost FN sustava najveća je na početku mjerenja te je iznosila 14,77 % pri najnižoj temperaturi površine FN modula od 44,6°C (Tablica 4.3). Svakim sljedećim očitanjem izmjerenih veličina može se uočiti porast temperature površine FN modula te smanjenje učinkovitosti FN sustava. Učinkovitost sustava najniža je u 12:30 sati, kada iznosi 12,38 % pri temperaturi površine FN modula od 65,8°C što je ujedno najviša izmjerena temperatura tijekom mjerenja. Daljnjim mjerenjem može se vidjeti da temperatura s vremenom opada što ima utjecaj na povećanje iskoristivosti FN sustava. Tako pri kraju mjerenja, u 16:00 sati iskoristivost iznosi 13,55 % pri temperaturi FN

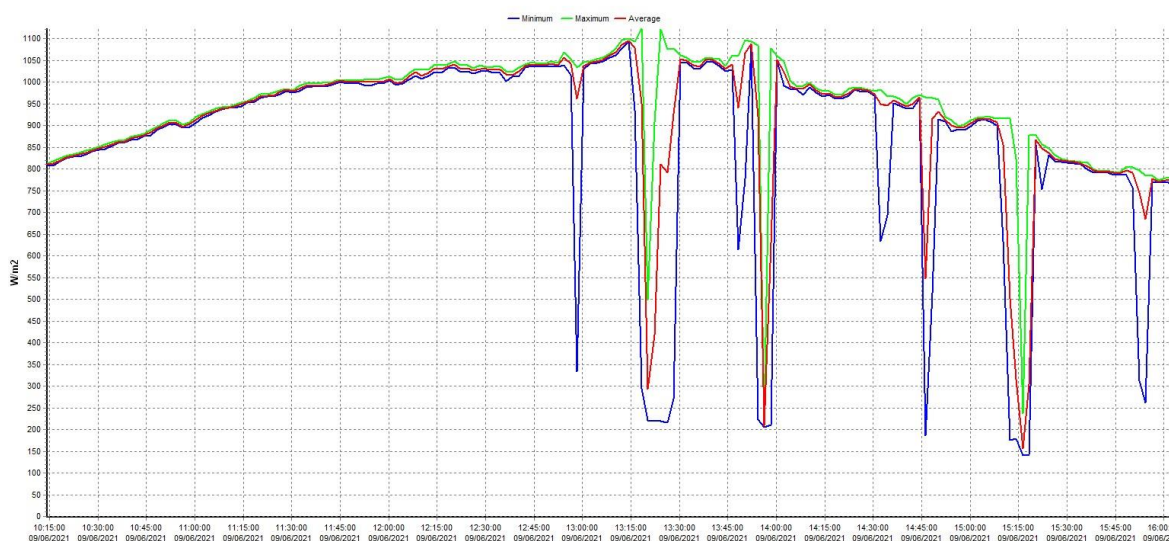


modula od  $48,9^{\circ}\text{C}$ . U 14:30 sati, uslijed naglog povećanja temperature FN modula (što može biti uslijed trenutnog prestanka strujanja vjetera), učinkovitost FN sustava se opet smanjuje na 12,96 % pri čemu je izmjerena temperatura panela od  $60,4^{\circ}\text{C}$ .

Očitavanje temperatura na površini FN modula, T1 i T2 (korištena su dva temperaturna senzora), tijekom perioda mjerenja prikazano je na Slici 4.7. Temperature T1 i T2 pokazuju značajne oscilacije tijekom mjerenja a time i promjenjivost temperature uslijed utjecaja promjene intenziteta sunčevog zračenja uslijed naoblake (vidi Sliku 4.8), te utjecaja vjetera.



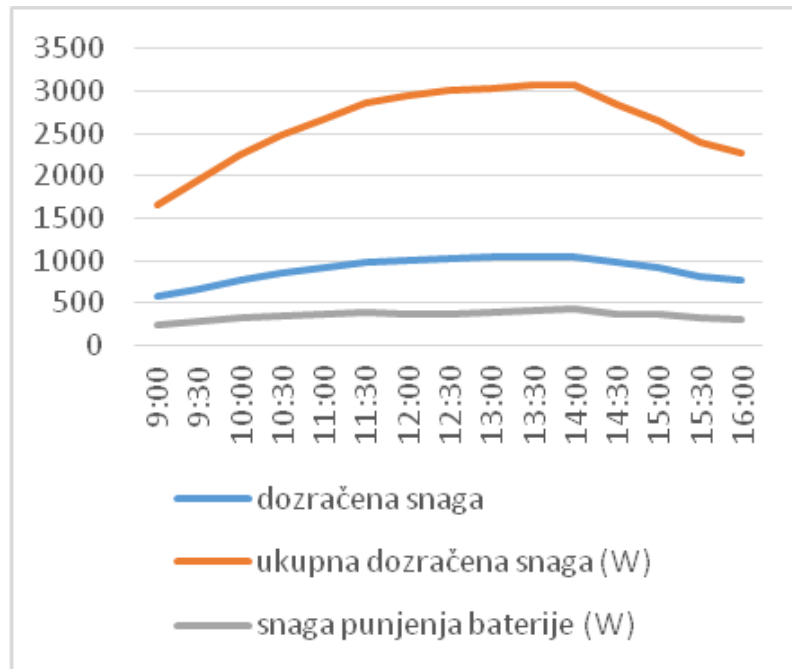
Slika 4.7 - Grafički prikaz promjene temperature T1 i T2 na površini FN modula



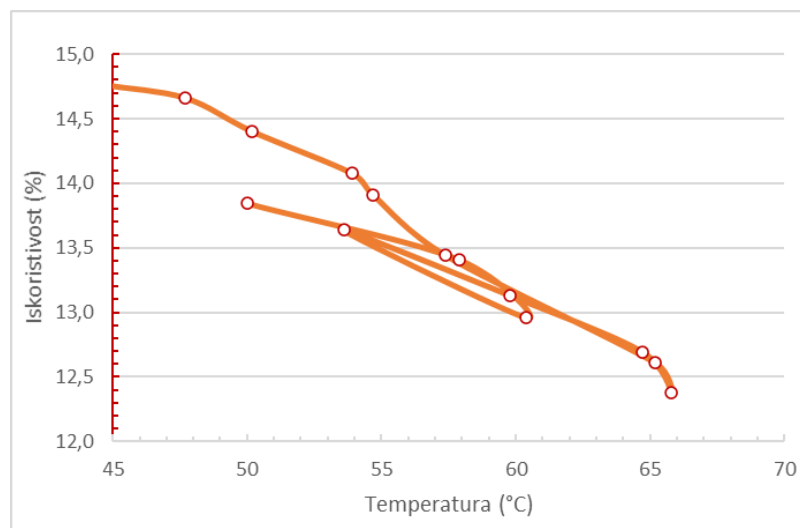
Slika 4.8 - Grafički prikaz promjene dozračene sunčeve energije u vremenu

Slika 4.8 prikazuje promjenu minimalne, maksimalne i prosječne vrijednosti dozračene sunčeve energije koja je očitavana s piranometra, a koji je bio postavljen pod istim kutom kao i kut nagiba FN modula.

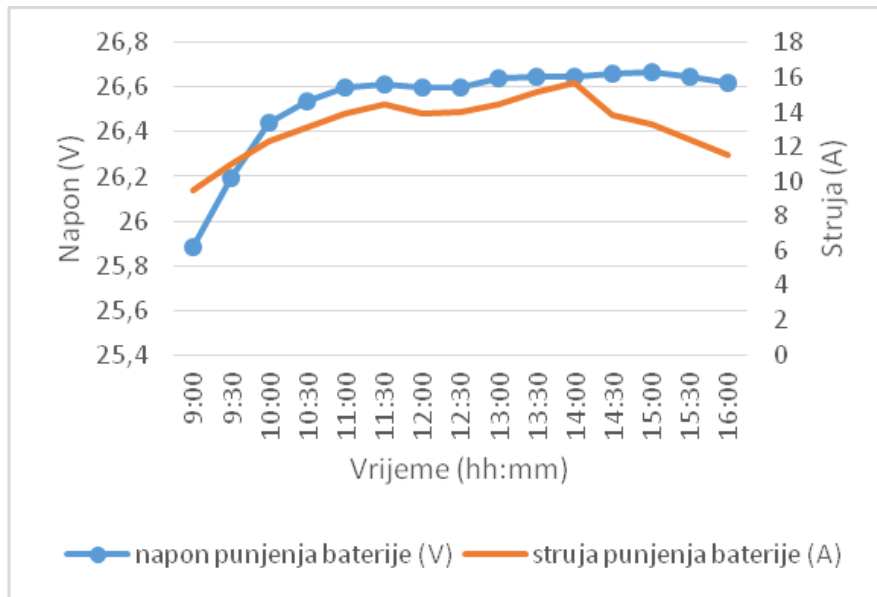
Grafički prikaz izmjerenih rezultata prikazan je na Slikama 4.9 do 4.12.



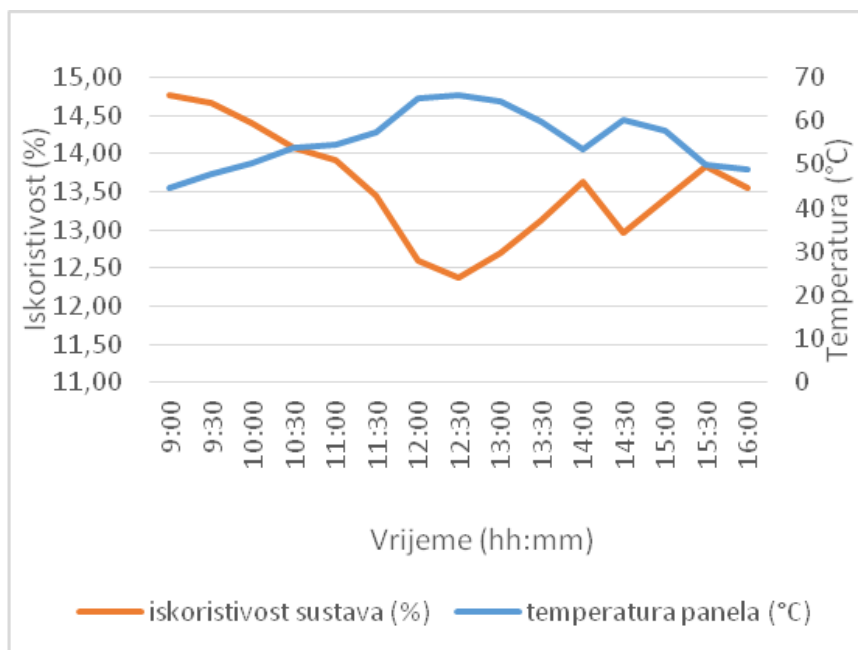
Slika 4.9 – Grafički prikaz dozračene snage, ukupne dozračne snage i snage punjenja baterija



Slika 4.10 - Grafički prikaz iskoristivosti FN modula u odnosu na temperaturu FN modula



Slika 4.11 - Grafički prikaz promjene napona i struje u određenom vremenu



Slika 4.12 - Grafički prikaz temperature i iskoristivosti FN modula u određenom vremenu

U prethodnim grafovima mogu se vidjeti sva događanja tijekom mjerenja, tako da se može vidjeti kako se napon i struja mijenjaju u funkciji vremena te iskoristivost sustava i temperatura FN modula u funkciji vremena, također se ima uvid u promjenu dozačene snage, ukupne dozačene snage te snage punjenja baterije u periodu mjerenja od 9:00 do 16:00 sati.

## 4.2. Mjerenja i prikaz rezultata za tehnologiju kadmij – telurid (CdTe)

Kao što su izvršena mjerenja s polikristalnim fotonaponskim modulima, isto tako je izvršeno mjerenje koristeći tankoslojni FN modul s fotonaponskim ćelijama na bazi kadmij – telurida.

Tankoslojni FN modul postavljen je po kutom od  $26^\circ$  u odnosu na horizontalnu plohu te u smjeru jug, kao što je bio slučaj i s polikristalnim FN modulima. Na taj način postignuti su isti radni uvjeti za oba fotonaponska sustava.

Tankoslojni FN modul spojen je na bateriju Victron Energy AGM, napona 12V i kapaciteta 60 Ah, kao što je prikazano u poglavlju 3. Kako bi se pri analizi uzeo u obzir samo utjecaj temperature na učinkovitost, FN sustav nije radio kontinuirano već „na prekide“. Na taj način se nivo napunjenosti baterije održavao približno konstantnim jer je punjenje baterije trajalo nekoliko minuta tijekom očitavanja rezultata mjerenja.

Mjerenje je izvršeno u vremenskom periodu od 9:00 do 14:00 sati, dok su rezultati mjerenja prikazani u Tablici 4.4. Očitavanja radnih parametara izvršena su svakih 30 minuta.

Osim očitavanja izmjerenih veličina izvršeni su potrebni proračuni za trenutnu dozračenu snagu, trenutnu snagu punjenja baterija, te iskoristivost tankoslojnog FN sustava.

Prema Tablici 4.4 može se zaključiti da tankoslojni fotonaponski modul na bazi kadmij – telurida ne pokazuje jasni trend smanjenja učinkovitosti pri povećanju temperature površine panela, te da su prisutne značajne oscilacije tijekom rada. Oscilacije u učinkovitosti mogu se pojaviti uslijed preciznosti mjerenja i korištene mjerne opreme, a mogu biti i specifične za vrstu materijala iz kojeg je izrađen tankoslojni fotonaponski modul. Preporuka je ponoviti proces mjerenja kako bi se detaljnije analizirao mogući uzrok uočene oscilacije u učinkovitosti, po mogućnosti u zimskom periodu kada bi utjecaj porasta temperature površine fotonaponskog modula mogao biti izražajni.

Na početku mjerenja, u 9:00 sati, učinkovitost je iznosila 6,59 % da bi se porastom temperature tijekom mjerenja učinkovitost povećavala, sve do 11:00 sati, kada počinje opadati ali uz male oscilacije (Slika 4.15).

Mjerenje tankoslojnog fotonaponskog panela, koja su provedena u okviru drugog završnog rada koji je u izradi, ali pri pomičnom radu fotonaponskog sustava (praćenje položaja sunca), pokazala su kontinuirano smanjenje učinkovitosti od početnih 7,56 % (u 8:00 sati), do konačnih 6,6 % (u 13:00 sati). Međutim, pri radu sustava u nepomičnom radu, navedeni trend

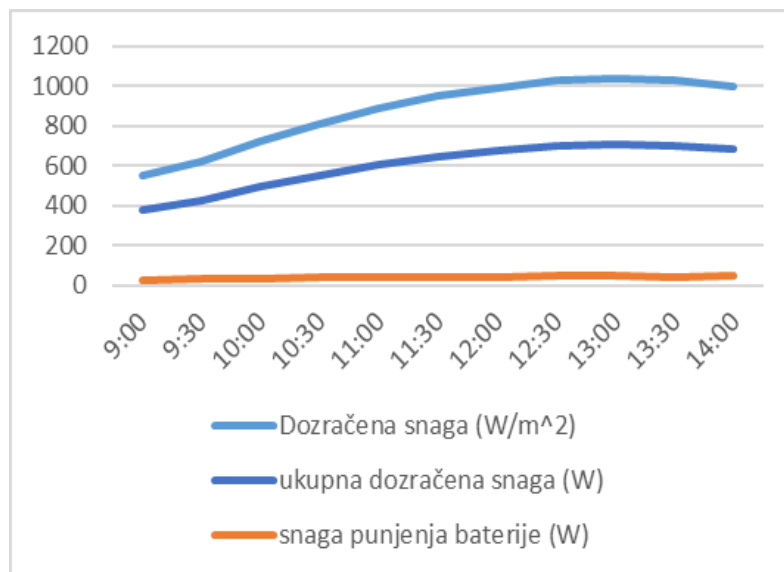
kontinuiranog smanjenja učinkovitosti nije evidentan, odnosno, rezultati su slični prikazanima u ovom završnom radu.

Tablica 4.4 – Rezultati mjerenja radnih karakteristika - utjecaj temperature na iskoristivost FN sustava – CdTe

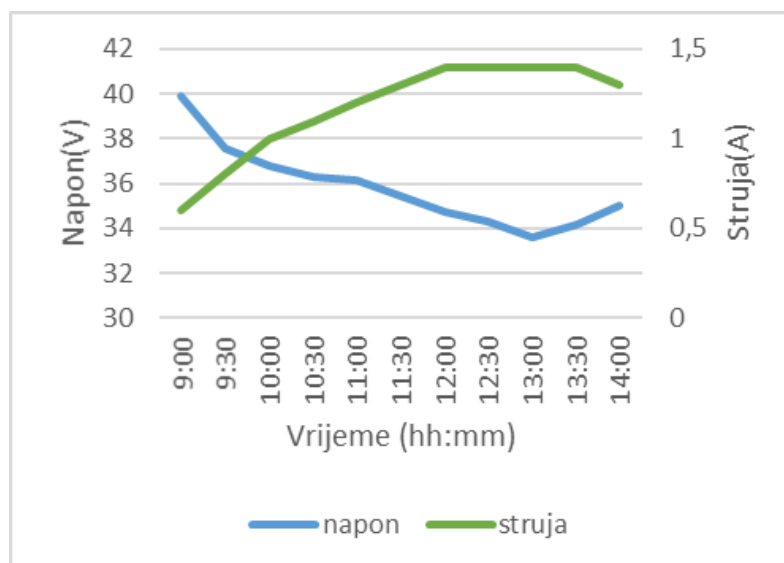
	9:00	9:30	10:00	10:30
Dozračena sunčeva energija (W/m <sup>2</sup> )	554	623	727	807
Temperatura modula (°C)	42,5	51,4	53,4	57,7
Napon FN modula (V)	39,9	37,55	36,77	36,3
Struja FN modula (A)	0,6	0,8	1	1,1
Aktivna površina panela (m <sup>2</sup> )	0,68	0,68	0,68	0,68
Trenutna dozračena snaga (W)	376,72	423,64	494,36	548,76
Snaga punjenja baterije (W)	24,84	28,93	34,24	37,06
Iskoristivost (%)	6,59	6,82	6,92	6,75
Napon baterije (V)	12,42	12,58	12,68	12,78
Struja punjenja baterije (A)	2,00	2,30	2,70	2,90

	11:00	11:30	12:00	12:30
Dozračena sunčeva energija (W/m <sup>2</sup> )	886	950	990	1027
Temperatura modula (°C)	57,5	61,7	63,8	63,3
Napon FN modula (V)	36,15	35,47	34,7	34,28
Struja FN modula (A)	1,2	1,3	1,4	1,4
Aktivna površina panela (m <sup>2</sup> )	0,68	0,68	0,68	0,68
Trenutna dozračena snaga (W)	602,48	646	673,2	698,36
Snaga punjenja baterije (W)	42,37	43,69	43,72	46,30
Iskoristivost (%)	7,03	6,76	6,49	6,63
Napon baterije (V)	12,84	12,85	12,86	12,86
Struja punjenja baterije (A)	3,30	3,40	3,40	3,60

	13:00	13:30	14:00
Dozračena sunčeva energija (W/m <sup>2</sup> )	1039	1030	1002
Temperatura modula (°C)	66,4	61,5	61,4
Napon FN modula (V)	33,59	34,16	35,01
Struja FN modula (A)	1,4	1,4	1,3
Aktivna površina panela (m <sup>2</sup> )	0,68	0,68	0,68
Trenutna dozračena snaga (W)	706,52	700,4	681,36
Snaga punjenja baterije (W)	45,22	43,99	45,29
Iskoristivost (%)	6,40	6,28	6,65
Napon baterije (V)	12,92	12,94	12,94
Struja punjenja baterije (A)	3,50	3,40	3,50



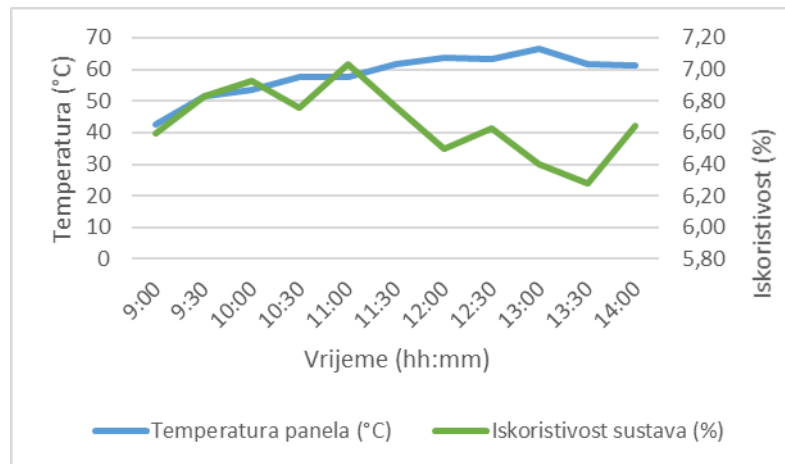
Slika 4.13 – Grafički prikaz dozračene snage, ukupne dozračne snage i snage punjenja baterija



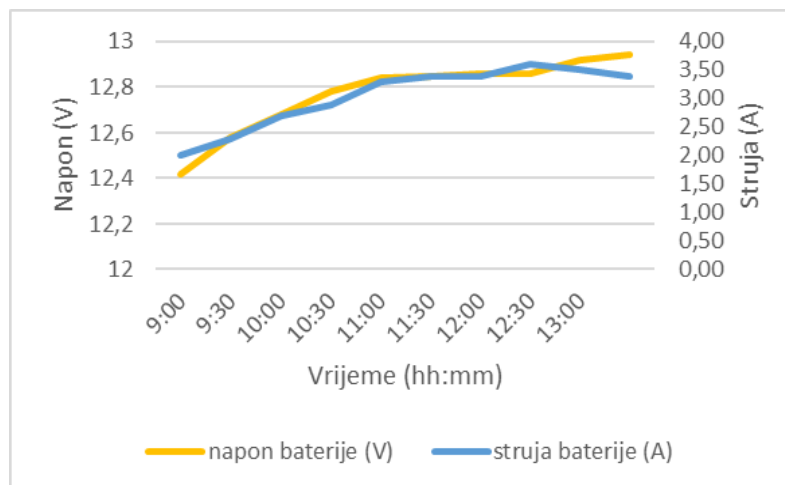
Slika 4.14 – Grafički prikaz promjene napona i struje FN modula

Na slici 4.13 prikazani su trendovi promjene dozračenih snaga te promjena snage punjenja baterije tijekom rada sustava. Prema slici 4.14 vidi se da prilikom rada napon i struja na FN

modulu se prate, u smislu da porastom struje se smanjuje napon i obrnuto. Napon kod CdTe se kretao od 34 do 40 V uz male vrijednosti jakosti struje od 0,5 do 1,5 A.



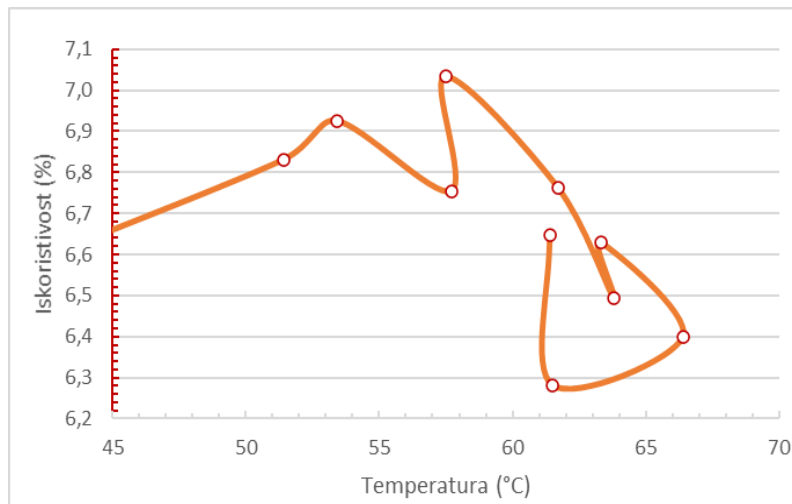
Slika 4.15 – Grafički prikaz temperature i iskoristivosti FN modula u određenom vremenu



Slika 4.16 – Grafički prikaz napona i struje baterije u određenom vremenu mjerenja

Na slici 4.16 prikazani su napon i struja punjenja baterija, pri čemu je evidentan porast i napona i struje kako se baterije pune. Prema slici 4.17 vidi se promjena iskoristivosti tankoslojnog FN modula. Slika najbolje ilustrira spomenute oscilacije učinkovitosti tijekom rasta temperature modula. Vidi se da iskoristivost na početku mjerenja, kada je FN modul najhladniji, niža u odnosu kada se započne zagrijavati. Daljnjim povećanjem temperature

iskoristivost se i dalje povećava tako da u 11:00 sati, pri temperaturi od 57,5°C doseže najvišu vrijednost od 7,03 %. Nakon toga, daljnjim povećanjem temperature iskoristivost opada, da bi pri samom kraju mjerenja, unatoč nepromjenjivoj vrijednosti temperature, učinkovitost porasla sa 6,28 na 6,65%.



Slika 4.17 – Grafički prikaz iskoristivosti FN modula u određenom vremenu mjerenja



## 5. ZAKLJUČAK

U ovom završnom radu prikazan je utjecaj temperature na koju se zagrijavaju fotonaponski moduli na efikasnost fotonaponskog sustava. Kako bi se prikazao utjecaj temperature na efikasnost fotonaponskog sustava izvršena je analiza radnih parametara tijekom rada u realnim uvjetima dvaju sustava, s fotonaponskim ćelijama od polikristalnog silicija te s fotonaponskim ćelijama od kadmij – telurida.

Na osnovu izmjerenih radnih parametara za fotonaponski sustav s fotonaponskim ćelijama od polikristalnog silicija proizlazi da se s povećanjem temperature smanjuje efikasnost fotonaponskog sustava. Tako je na primjer na početku mjerenja (u 9:00 sati), pri temperaturi površine FN modula od 44,6°C, efikasnost iznosila 14,77 %. Efikasnost sustava bila je najniža u 12:30 sati, kada je iznosila 12,38 % pri najvišoj izmjerenoj temperaturi površine FN modula od 65,8°C. Daljnjim mjerenjem radnih parametara, tijekom kojeg je temperatura FN modula kontinuirano opadala, izmjereno je kontinuirano povećanje efikasnosti FN sustava.

Na osnovu izmjerenih radnih parametara za fotonaponski sustav s fotonaponskim ćelijama od kadmij – telurida može se zaključiti da tankoslojni fotonaponski modul na bazi kadmij – telurida ne pokazuje jasni trend smanjenja efikasnosti pri povećanju temperature površine panela. Tijekom rada pojavljivale su se oscilacije vrijednosti efikasnosti unatoč kontinuiranom porastu temperature fotonaponskog modula. Na početku mjerenja, u 9:00 sati, efikasnost je iznosila 6,59 % da bi se porastom temperature tijekom mjerenja efikasnost povećavala, sve do 11:00 sati, kada započinje opadati ali uz male oscilacije. Preporuka je da se analiza rada sustava ponovi uz nova mjerenja kako bi se detaljnije analizirao mogući uzrok uočene oscilacije efikasnosti FN sustava. Konačno, mjerenja u zimskom periodu mogla bi imati značajniji utjecaj na porast temperature površine fotonaponskog modula što bi trebalo rezultirati većim promjenama u efikasnosti sustava.

## LITERATURA

1. „Investigation of the Effect Temperature on Photovoltaic (PV) Panel Output Performance“ A.R. Amelia, Y.M. Irwan, W.Z. Leow, M. Irwanto, I. Safwati, M. Zhafarina, International Journal on Advanced Science Engineering Information Technology, Vol.6 (2016) No. 5 ISSN:2088-5334 [https://www.researchgate.net/publication/309600416\\_Investigation\\_of\\_the\\_Effect\\_Temperature\\_on\\_Photovoltaic\\_PV\\_Panel\\_Output\\_Performance](https://www.researchgate.net/publication/309600416_Investigation_of_the_Effect_Temperature_on_Photovoltaic_PV_Panel_Output_Performance)
2. <https://cdn.ensolar.com/Product/pdf/Crystalline/59092be08d30e.pdf> Luxor ECO LINE P60/245 - 265 W
3. Tehnički katalog Calyxo tankoslojni CX3 modul, Fotonapon d.o.o., Dane Duića 3, HR 10000 Zagreb
4. <https://www.solar-facts-and-advice.com/cadmium-telluride.html>
5. [https://www.victronenergy.com/upload/documents/Dimensions-Battery\\_Gel\\_12\\_220.pdf](https://www.victronenergy.com/upload/documents/Dimensions-Battery_Gel_12_220.pdf)
6. [https://www.rasuni.com/products/victron-smartsolar-mppt-75-15-solar-charge-controller?\\_pos=1&\\_sid=101f0cc47&\\_ss=r](https://www.rasuni.com/products/victron-smartsolar-mppt-75-15-solar-charge-controller?_pos=1&_sid=101f0cc47&_ss=r)
7. [https://ictinternational.com/content/uploads/2019/12/LI19\\_v1609.pdf](https://ictinternational.com/content/uploads/2019/12/LI19_v1609.pdf)
8. <https://www.tridynamika.com/download/lp02-pyranometer/> piranometar LP02
9. <https://www.victronenergy.com/upload/documents/Datasheet-BMV-700-series-EN.pdf>
10. [http://www.europe-solarshop.com/document/steca/Steca\\_PR\\_2020\\_IP\\_insturction\\_EN.pdf](http://www.europe-solarshop.com/document/steca/Steca_PR_2020_IP_insturction_EN.pdf)