

UNIVERZA V NOVI GORICI  
POSLOVNO-TEHNIŠKA FAKULTETA

**IZBOLJŠAVA IZKORISTKA FOTONAPETOSTNEGA  
MODULA**

DIPLOMSKO DELO

**Matej Boltar**

Mentorja: prof. dr. Marko Zavrtanik, dr. Egon Pavlica

Nova Gorica, 2012



## **ZAHVALA**

Zahvaljujem se mentorjema prof. dr. Marku Zavrtniku in dr. Egonu Pavlici, ki sta mi pomagala s svojim znanjem, dobro voljo, potrpežljivostjo in entuziazmom, Alešu Terpinu za strokovne nasvete, Marku Plahuti in Miranu Pavlovcu za podarjene PV celice, predvsem pa staršem, sestri Maji in prijateljem za spodbudo.



## **NASLOV**

### **Izboljšava izkoristka fotonapetostnega modula**

## **IZVLEČEK**

Električna energija je bistvenega pomena za obstoj in kvalitetno življenje današnje civilizacije. Njena potrošnja konstantno narašča, glavni viri proizvodnje električne energije pa resno ogrožajo naravno okolje, kvaliteto življenja in naš obstoj. Zaradi teh dejstev je investiranje v razvoj obnovljivih virov in ekološko prijaznega pridobivanja električne energije nujno potrebno. Pridobivanje električne energije z izkoriščanjem sončne svetlobe je okolju prijazen način. Pretvorba svetlobe v elektriko poteka s pomočjo fotonapetostne celice, ki je osnovni element fotonapetostnega modula. Celica je zgrajena iz dveh različnih polprevodniških materialov, zato je učinkovitost njene pretvorbe določena s fizikalnimi lastnostmi teh materialov. Ker polprevodniki izkazujejo temperaturno odvisnost, smo v želji povečanja izkoristka analizirali, kako temperatura vpliva na njeno delovanje. Opravili smo tokovno-napetostne meritve celice pri različnih temperaturnih vrednostih in s primerjavo dobljenih rezultatov ugotovili, da s povišanjem temperature električna moč celice linearno pada. Izdelali smo tekočinsko hlajeno podlago, s katero smo dokazali, da lahko celico ohlajamo z uporabo naravnih vodnih virov, brez potrebe po dodatno dovedeni energiji. Z vodnim hlajenjem smo celici izboljšali izkoristek pretvorbe in s tem občutno povečali njeno električno moč.

## **KLJUČNE BESEDE**

fotovoltaika, fotonapetostna celica, fotonapetostni modul, fotonapetostna elektrarna, izkoristek, toplotni odvodnik, povečanje moči

## **TITLE**

### **Improvement of photovoltaic module power conversion efficiency**

## **ABSTRACT**

Electrical energy is essential for the existence and the quality of life of our civilization. Its consumption is increasing steadily and the main sources of electrical energy production are posing a serious threat to our natural environment, the quality of life and our existence. These facts call for urgent investments in the development of natural resources and an ecologically friendly production of electrical energy. The production of electrical energy by the exploitation of sunlight is an ecologically friendly method. The conversion of light into electricity takes place by means of a photovoltaic cell which is the basic element of a photovoltaic module. The cell is comprised of two different semiconducting materials. Therefore the cell conversion efficiency is determined by the physical properties of the semiconducting materials. Since semiconductors exhibit strong temperature dependence and in order to increase the electrical power, we have studied the effect of temperature on the conversion efficiency. We have performed a series of current-voltage measurements as a function of cell temperature. The measurement results clearly display that the increase of temperature linearly decreases the electric power of the cell. We have manufactured a liquid cooled surface and have been able to prove that the cell can be cooled by using natural water resources without the need for any additional supply of energy. The process of water cooling has improved the conversion efficiency of the cell and thus increased its electrical power.

## **KEYWORDS**

photovoltaics, photovoltaic cell, photovoltaic module, photovoltaic power plant, efficiency, heat sinker, power increase

## KAZALO

1	UVOD.....	1
2	ZGODOVINA RAZVOJA .....	3
3	FOTONAPETOSTNA CELICA .....	4
3.1	Princip delovanja fotonapetostnega vira.....	5
3.2	Fotonapetostni modul .....	6
3.3	Fotonapetostna elektrarna .....	8
3.4	Prednosti fotonapetostnih sistemov .....	10
4	IZKORISTEK FOTONAPETOSTNE CELICE .....	11
4.1	Vzroki za padanje izkoristka.....	12
4.2	Temperaturna odvisnost fotonapetostne celice .....	12
4.3	Prednosti hlajenega PV sistema .....	12
5	IV KARAKTERISTIKA .....	13
5.1	Napetost odprtih sponk ( $U_{oc}$ ) .....	14
5.2	Kratkostični tok ( $I_{sc}$ ) .....	14
5.3	Maksimalna moč ( $P_{max}$ ) .....	14
5.4	Napetost pri maksimalni moči ( $U_{max}$ ) .....	14
5.5	Tok pri maksimalni moči ( $I_{max}$ ) .....	14
6	IZDELAVA TOPLOTNEGA ODVODNIKA .....	15
6.1	Peltier kot toplotni odvodnik .....	16
7	SISTEM ZA KARAKTERIZACIJO FOTOVOLTAIČNIH CELIC .....	18

7.1	Halogenski reflektor .....	18
7.2	Univerzalni merilni instrument.....	19
7.3	Hladilna naprava Lauda WK230 .....	19
7.4	Thorlabs PM320E .....	20
7.5	Sončni simulator .....	21
7.6	Peltierova ploščica .....	23
7.7	Merilnik izvora Keithley 2400.....	23
7.8	Meritve s halogensko žarnico .....	24
7.8.1	Meritve IV karakteristike .....	25
7.9	Meritve s sončnim simulatorjem.....	26
7.9.1	Z interpolacijo do napetosti odprtih sponk.....	28
8	REZULTATI MERITEV .....	30
8.1	Prvi sklop meritev .....	30
8.2	Drugi sklop meritev .....	31
8.2.1	Moč .....	32
8.2.2	Izkoristek.....	33
8.2.3	Napetost pri maksimalni moči .....	34
8.2.4	Tok pri maksimalni moči .....	34
8.2.5	Napetost odprtih sponk .....	35
8.2.6	Kratkostični tok.....	36
9	ANALIZA IN DISKUSIJA REZULTATOV .....	37



10	ZAKLJUČNE UGOTOVITVE .....	39
11	LITERATURA .....	40

## KAZALO SLIK

Slika 1: Polikristalna fotonapetostna celica dimenzije 156×156 mm .....	4
Slika 2 Prerez fotonapetostne celice .....	5
Slika 3: Pasovni diagram silicijeve fotonapetostne celice .....	6
Slika 4: Fotonapetostni modul .....	7
Slika 5: Prerez fotonapetostnega modula .....	8
Slika 6: Fotonapetostna elektrarna .....	9
Slika 7: Olmedilla Photovoltaic Park .....	9
Slika 8: Tipičen potek tokovno napetostne karakteristike fotonapetostne celice .....	13
Slika 9: Spodnja stran odprtega toplotnega odvodnika .....	15
Slika 10: Zgornja stran toplotnega odvodnika .....	16
Slika 11: Peltierova ploščica kot toplotni odvodnik .....	17
Slika 12: Hladilna naprava Lauda .....	20
Slika 13: Merilnik svetlobne energije Thorlabs .....	21
Slika 14: Senzor svetlobne energije z okroglo merilno površino .....	21
Slika 15: Sončni simulator z obločno ksenonsko žarnico .....	22
Slika 16: Gola Peltierova ploščica .....	23
Slika 17: Laboratorijski merilnik izvora .....	24
Slika 18: Sistem za karakterizacijo PV celice s halogensko žarnico .....	25
Slika 19: Sistem za karakterizacijo PV celice s sončnim simulatorjem .....	28
Slika 20: Interpolacijska določitev napetosti odprtih sponk .....	29

Slika 21: Primerjava IV karakteristike ter moči, med toplo (70 °C) in hladno (19 °C) fotonapetostno celico v prvem sklopu meritev. ....	30
Slika 22: Primerjava IV karakteristike ter moči, med toplo (70 °C) in hladno (15 °C) fotonapetostno celico v drugem sklopu meritev. ....	31
Slika 23: Maksimalna moč v odvisnosti od temperature .....	32
Slika 24: Izkoristek v odvisnosti od temperature .....	33
Slika 25: Napetost pri maksimalni moči v odvisnosti od temperature.....	34
Slika 26: Tok pri maksimalni moči v odvisnosti od temperature .....	35
Slika 27: Napetost odprtih sponk v odvisnosti od temperature.....	36
Slika 28: Kratkostični tok v odvisnosti od temperature .....	36



## 1 UVOD

Fotovoltaika je veda, ki obravnava pojav pretvorbe sončnega sevanja v električno napetost. Naprava, ki to pretvorbo omogoča, se imenuje fotonapetostna celica, v angleškem jeziku Photovoltaic cell (v nadaljevanju PV celica). Tehnologija je bila razvita zaradi vojaških potreb, predvsem vesoljskega programa. Satelite napaja električna energija, pridobljena iz sončnega sevanja. Zajem in pretvorbo sončne energije v elektriko omogočajo PV celice. Brez njih bi imel satelit omejen čas delovanja. Tudi najbolj varčna vezja, bi po določenem času izpraznila baterije, kar bi povzročilo trajno odpoved izjemno dragega satelita. Težava je bila rešena z uporabo PV celic.

Uporaba PV celic je zelo razširjena. Današnji trend je gradnja velikih fotonapetostnih elektrarn, ki električno energijo pošiljajo direktno v javno omrežje. Proizvodnja PV celic se je tako drastično pocenila, da se je ta eksotična in s še vedno slabim izkoristkom ožigosana tehnologija začela spogledovati z ostalimi konvencionalnimi načini proizvodnje električne energije. Skupna instalirana moč PV elektrarn je tako na koncu leta 2011 znašala kar 67.400 MW, a predstavlja le 0.5 % svetovnih zahtev po električni energiji (Photovoltaics, 2012). Danes imajo komercialne PV celice dobrih 16 % izkoristka, ostala svetlobna energija, ki pada na površino celice, se pretvori v toploto, nekaj pa se je od njene površine odbije. Na zemeljsko površje pada ob ugodnih pogojih sončna svetloba z intenziteto  $1000 \text{ Wm}^{-2}$ . V primeru, da ima celica 16 % izkoristek, bo na takšni površini proizvedla le 160 W električne moči. Ti izkoristki so v realnosti še manjši, zaradi toplote, ki lahko med delovanjem segreje PV celico na  $70 \text{ }^\circ\text{C}$  in več. Nazivne zmogljivosti celice veljajo pri temperaturi  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ , kar je v praktičnih okoliščinah večinoma nesmiselno pričakovati.

V tej nalogi smo preučevali, kako bi lahko povečali relativno majhen izkoristek, ki ga PV celice imajo. Ena od možnosti povečanja izkoristka se ponuja z odvajanjem toplote, katera se ustvari med njenim delovanjem. Kot smo ugotovili, se z večanjem temperature manjša njena sposobnost pretvorbe svetlobne energije v električno. PV celico smo namesto na klasično podlago (steklo, umetne mase), pritrdili na toplotno prevodno podlago, katera je generirano toploto celice odvajala s pomočjo hladilne tekočine, oziroma vode. Odvedeno toploto lahko še dodatno koristno uporabimo.

Hlajen PV sistem bo pokazal smiselno uporabnost predvsem v aplikacijah kot so PV elektrarne, svoje mesto pa si bo izboril tudi na specifičnih lokacijah, kot so planinske kočje ali raziskovalne postojanke na odročnih krajih, kjer bo tak sistem poleg električne energije poskrbel tudi za toplo sanitarno vodo.

Glede na današnji trend v gradnji sončnih elektrarn, ter relativno majhnim izkoristkom PV celic, je smiselno iskati nove rešitve za povečanje dobička potencialnih vlagateljev v te sisteme. S čim manjšim posegom v naravo želimo iztržiti čimveč električne energije. Tak sistem to omogoča. Na velikih površinah sedaj zgrajenih elektrarn lahko povečamo izhodno moč, brez dodatnega širjenja sistema v prostor in brez obremenitve za naravno okolje. Prednost tega tekočinsko hlajenega sistema je v tem, da lahko za hlajenje uporabimo naravne vodne vire in da se površina celice (sistema) ne poveča, kot bi se na primer povečala ob uporabi koncentradorjev, ki na celico usmerijo dodatno svetlobo, a jo s tem tudi pregrevajo in tako krajšajo njeno življenjsko dobo. Uporaba koncentradorjev tudi poveča možnost poškodbe sistema ob močnem vetru. Takšno rešitev z vodnim hlajenjem je možno z minimalnimi posegi aplicirati na že obstoječe in delujoče sisteme.

## **2 ZGODOVINA RAZVOJA**

Raziskovalni začetki segajo v leto 1839, ko je Henri Becquerel opravljajal prva opazovanja PV pojava v tekočinah, leta 1873 sledi odkritje PV pojava v trdni snovi Selen, kmalu zatem je bila leta 1880 proizvedena prva PV celica na osnovi selena, ki je imela izkoristek med enim in dvema procentoma. Do celice s 6 procentnim izkoristkom je minilo dobrih 70 let razvoja, v letu 1955 je cena za celico moči 1 W znašala 1500 ameriških dolarjev. V letu 1958 se je začela uporaba PV celic za napajanje satelitov. Prva amorfn silicijeva celica je bila narejena v letu 1974. Uporaba PV celic se je začela tudi za podporo proizvodnji električne energije na konvencionalne načine in tako je bila leta 1982 v Kaliforniji postavljena prva PV elektrarna kapacitete 1 MW. PV moduli dobijo mesto tudi v zgradbah, kot integracija v fasade in strehe. Današnji trend je gradnja manjših PV elektrarn na strehah zgradb in v večjem obsegu na namenskih konstrukcijah, katere predstavljajo temelje velikih elektrarn. Danes je skupna moč vseh instaliranih PV elektrarn 67,4 MW (Photovoltaic History, 2011; Photovoltaics, 2012).

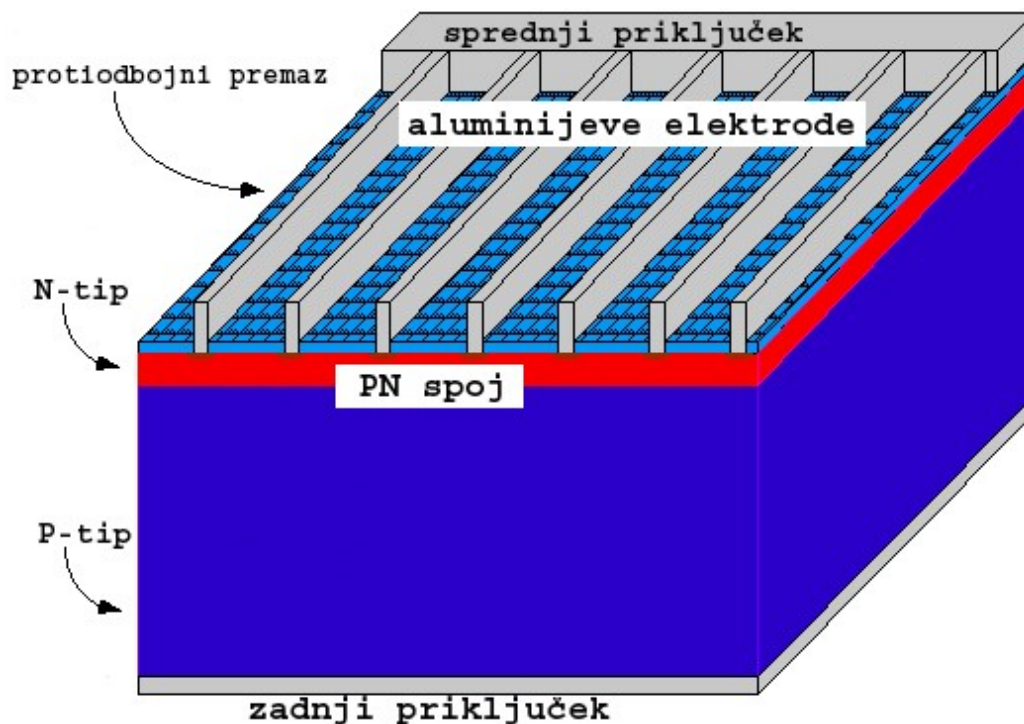
### 3 FOTONAPETOSTNA CELICA

Fotonapetostna celica je osnoven gradnik vsakega fotonapetostnega sistema. Zgrajena je iz dveh različnih plasti silicija in na zgornji strani prevlečena z protiodbojnim premazom, ki zmanjšuje refleksijo vpadne svetlobe s površine celice. Osvetljena celica proizvaja električno napetost približno 600 mV. Električni tok je pogojen z njeno površino in intenziteto svetlobe. Fotoni spodbudijo gibanje elektronov, kateri preko porabnika poženejo enosmerni električni tok. Na sliki 1 je prikazana zgornja stran, katera absorbira svetlobo. Vidne so tanke aluminijeve elektrode, združene v dva negativna električna priključka. Elektrode so oblikovane na tak način, da so svetlobno čim bolj prepustne. Na spodnji strani celice je pozitiven priključek. Konstrukcijsko so priključki narejeni in nameščeni tako, da se celice enostavno povežejo v standardizirano serijo in tako tvorijo samostojno enoto – fotonapetostni modul. Površina PV celice je odvisna od premera silicijevega kristala (ang. *silicon ingot*). Z rezanjem kristala na tanke rezine (približno 200  $\mu\text{m}$ ) dobimo osnovo za izdelavo PV celice. Njen shematski prerez je prikazan na sliki 2.



Slika 1: Polikristalna fotonapetostna celica dimenzije 156×156 mm

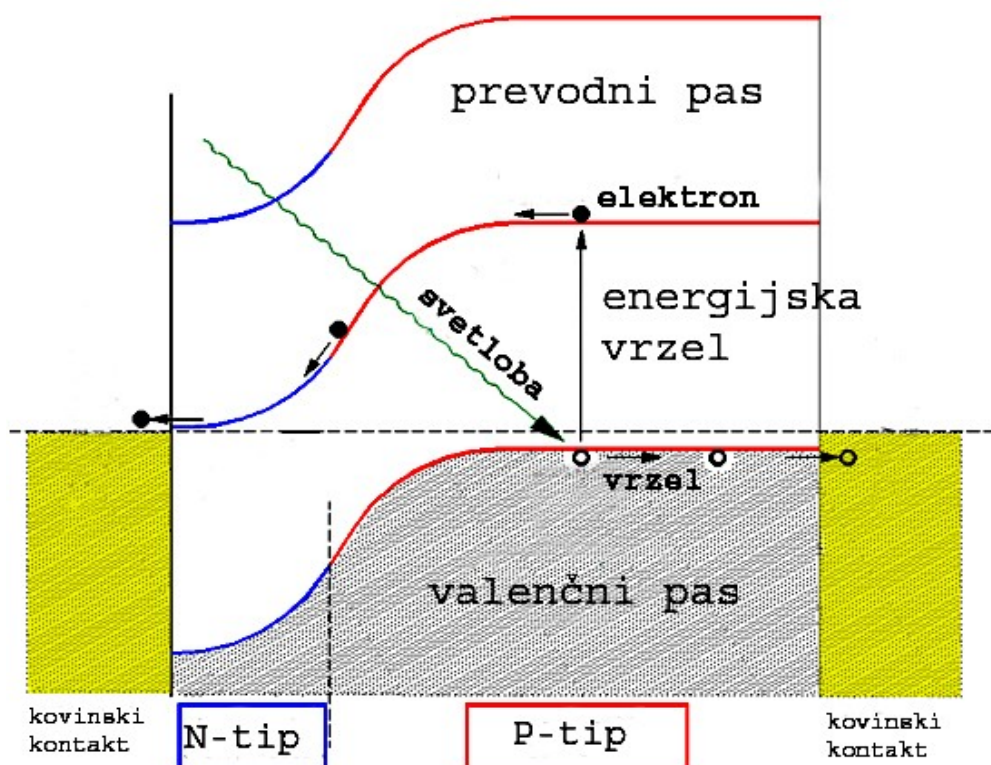




Slika 2 Prerez fotonapetostne celice. (slikovni vir: *PV Education, Design of silicon cells*).

### 3.1 Princip delovanja fotonapetostnega vira

Fotonapetostna celica je zgrajena iz dveh tankih in različnih plasti silicija. Ena plast ima primesi donorjev, kar pomeni, da ima presežek elektronov. Ta plast prevaja elektrone in jo imenujemo polprevodnik tipa N. Druga plast vsebuje primesi akceptorjev, kar pomeni, da ji primanjkujejo elektroni, oziroma ima presežek vrzeli. To je plast tipa P in prevaja vrzeli. Stik P in N tipa polprevodnika imenujemo PN spoj. Zaradi različnega dopiranja nastane v PN spoju električno polje. Ko se foton absorbira v PN spoju, izbije elektron, ki se nahaja v valenčnem pasu silicija. Energija fotona mora biti dovolj velika, da elektron preskoči energijsko vrzel med valenčnim in prevodnim pasom. Elektron skoči na višji energijski nivo, v prevodni pas in za sabo pusti prazno mesto, imenovano vrzel. Električno polje PN spoja pospeši elektrone in vrzeli izven območja PN spoja. Elektron in vrzel nadaljujeta pot po siliciju do električnih kontaktov, ki sta na različnih napetostnih potencialih. Razlika potencialov, ki je posledica električnega polja v PN spoju, požene električni tok skozi breme (slika 3).

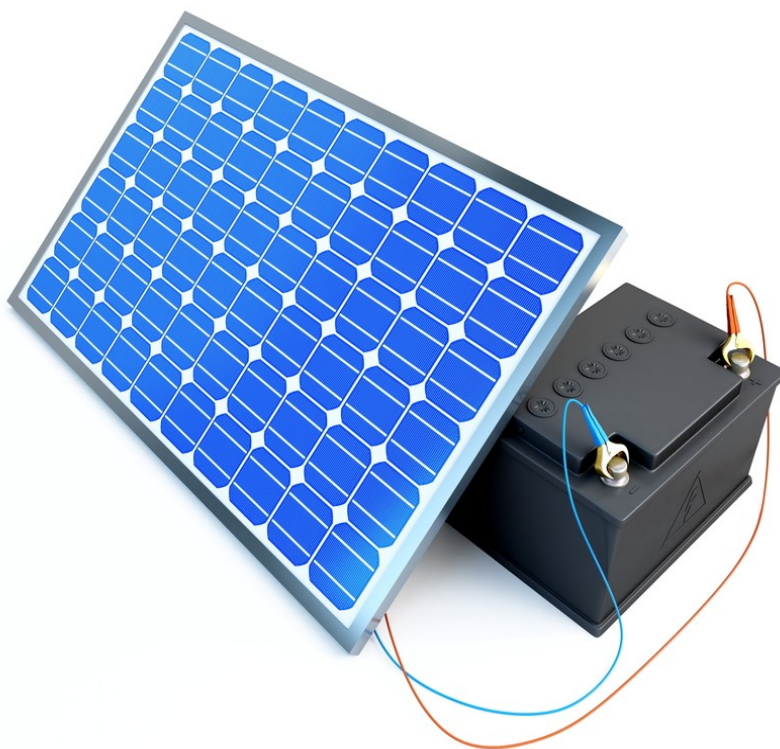


Slika 3: Pasovni diagram silicijeve fotonapetostne celice. (slikovni vir: *Wikipedia, Theory of solar cells*).

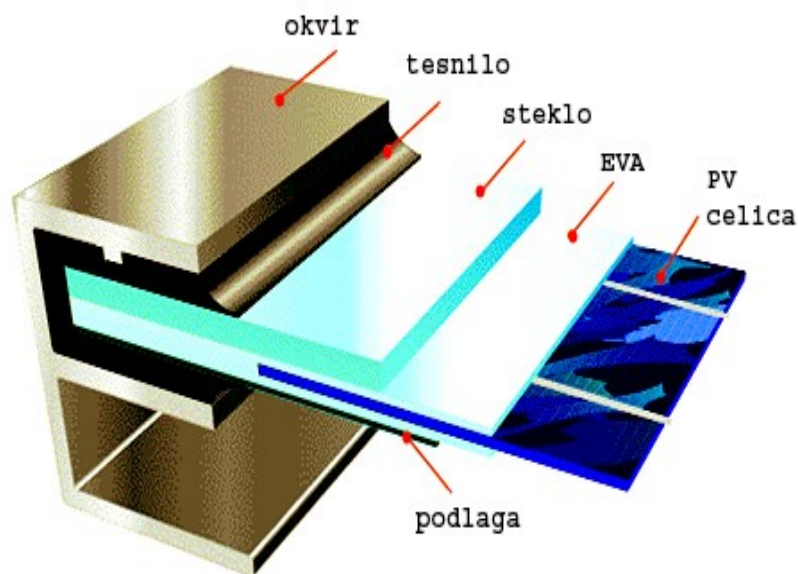
### 3.2 Fotonapetostni modul

Sama individualna celica za uporabnika ne predstavlja uporabne vrednosti, ker je njena napetost prenizka, okoli 600 mV. Celice so v ustreznem številu povezane v serijo in kot take tvorijo najmanjšo, nedeljivo, samostojno enoto PV sistema, imenovano fotonapetostni modul. Na stilizirani sliki 4 je prikazan PV modul, ki ima v serijo vezanih 60 fotonapetostnih celic. PV modul je lahko zelo majhen in zagotavlja napajanje žepnemu kalkulatorju, ali pa s svojo površino 1,5 kvadratnega metra predstavlja osnovni člen PV elektrarne. Shematski prerez PV modula je prikazan na sliki 5. PV celice so položene na podlago, katera je prevlečena s prozorno umetno maso, imenovano EVA (ethylene-vinyl-acetate). Enak sloj se nahaja tudi med PV celico in steklom. Ko so sestavni deli PV modula v proizvodnem postopku segreti, EVA trajno poveže (lamelira) večslojno strukturo modula v kompaktno, zračno nepropustno in na zunanje vplive odporno celoto. Aluminijast

profil je najpogosteje uporabljen material za okvir modula, ki mu daje dodatno mehansko trdnost in možnost pritrditve. Steklo je kaljeno, zaradi boljše odpornosti pred udarci toče. Na zadnji strani so električne priključne sponke, s katerimi modul električno povežemo na porabnik. Za domačo uporabo so moduli dimenzionirani za 12 ali 24-voltne sisteme, za sončne elektrarne pa so to moduli z višjimi delovnimi napetostmi, do 60 V.



Slika 4: Fotonapetostni modul (slikovni vir: <http://losangeles-solarpanel.info>)



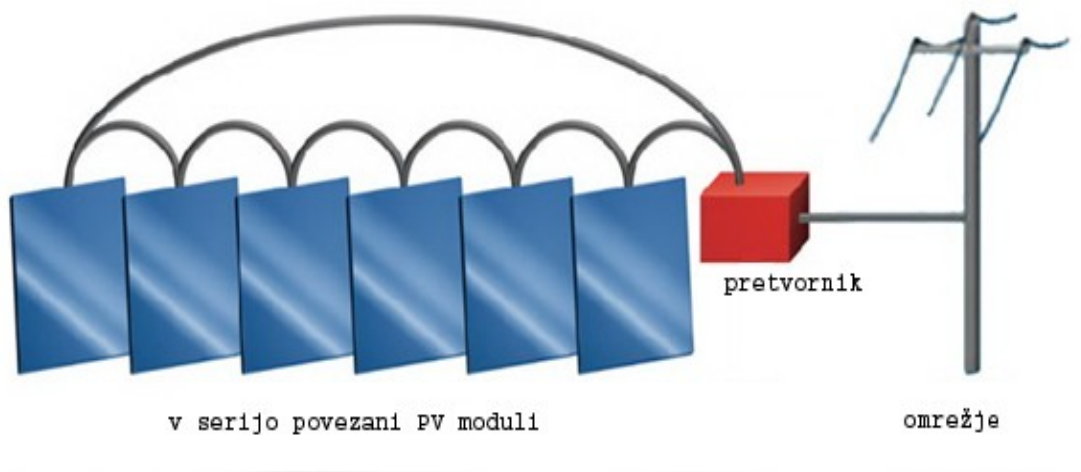
Slika 5: Prerez fotonapetostnega modula (slikovni vir: [http://www.aluminum-solar-frame.com/aluminum-frame/75\\_559.html](http://www.aluminum-solar-frame.com/aluminum-frame/75_559.html))

### 3.3 Fotonapetostna elektrarna

Današnji trend uporabe fotonapetostne tehnologije je povezovanje velikega števila PV modulov v polja, z namenom proizvodnje in direktne distribucije električne energije v javno omrežje (slika 7). Osnoven gradnik PV elektrarne je PV modul. Povezani so zaporedno v takšnem številu, da seštevek napetosti posameznih modulov ustreza vhodnim karakteristikam pretvornika (slika 6). Enosmerna napetost zaporedno vezane veje dosega velikost razreda 500 V. Preko pretvornika je spremenjena v izmenično obliko in frekvenčno sinhronizirana z javnim elektroenergetskim omrežjem. Količino oddane energije v omrežje se beleži z električnim števcem.

Olmedilla Photovoltaic Park (slika 7) je bila v letu 2008 s 60 MW instalirane električne moči največja fotonapetostna elektrarna na svetu, trenutno pa ta naslov pripada na kitajskem instalirani fotonapetostni elektrarni, Golmud Solar Park. Njena vršna moč znaša 200 MW (Photovoltaics, 2012).





Slika 6: Fotonapetostna elektrarna (slikovni vir: <http://www.photovoltaic-production.com/143/midget-revolutionists/>).



Slika 7: Olmedilla Photovoltaic Park (slikovni vir: *Wikipedia, Olmedilla Photovoltaic Park*)

### **3.4 Prednosti fotonapetostnih sistemov**

- Modularna zgradba omogoča enostavno nadgradnjo sistema.
- Nezahtevni pogoji za postavitvev.
- Možna integracija v zgradbe.
- Svetlobno prepustne izvedbe za specifične aplikacije.
- V primeru okvare ne ogroža naravnega okolja.
- Izredno nizka stroški vzdrževanja.
- Dolga življenjska doba, več kot 25 let.
- Visoka zanesljivost.
- Neslišno delovanje.
- Odsotnost vrtljivih delov.
- Subvencioniran odkup proizvedene energije.

## 4 IZKORISTEK FOTONAPETOSTNE CELICE

Izkoristek PV celice pove, kolikšen del vpadne svetlobne energije je celica sposobna pretvoriti v električno energijo. Definiran je kot razmerje maksimalne električne moči celice in moči vpadne svetlobe, s katero je obsijana. Moč vpadne svetlobe je standardizirana na vrednost  $1000 \text{ Wm}^{-2}$ . Če želimo rezultat v procentih, dobljeno vrednost množimo s 100. Izkoristek fotonapetostne celice je

$$\eta = \frac{P_{max}}{S \times 1000 \text{ Wm}^{-2}}$$

kjer je  $S$  površina celice, izražena v kvadratnih metrih in  $P_{max}$  maksimalna električna moč celice izražena v vatih (poglavje 5). Z višjim izkoristkom dobimo več električne energije ob enaki površini celice. Tipični izkoristki komercialnih PV celic, katere se danes vgrajuje v PV module, se gibljejo od 14 do 17 procentov pri standardnih testnih pogojih. Uvedba teh pogojev omogoča primerljivost izmerjenih veličin in ocenjevanje PV celice, ne glede na lokacijo meritev in tip celice. Standardni testni pogoji so določeni tako, da so podobni realnim okoliščinam, v katerih celica deluje. Moč sončnega sevanja se na poti skozi atmosfero spremeni, zaradi prašnih delcev, vodne pare in plinov, ki sestavljajo ozračje. Odvisna je tudi od tega, pod kakšnim kotom pada svetloba na zemljo. Največja intenziteta sončnega sevanja je v okolici ekvatorja in z oddaljenostjo od njega pada. Dogovorjeno je, da se za meritev svetlobne intenzitete pri standardnih testnih pogojih upošteva moč  $1000 \text{ W}$  na kvadratni meter površine. Vzroki, ki veljajo za upadanje intenzitete sončne svetlobe skozi atmosfero, veljajo tudi za spremembo svetlobnega spektra. Pot svetlobe skozi atmosfero je najkrajša na ekvatorju, zato svetlobni spekter sončnega sevanja ni enak na celotni površini zemeljskega površja. Dogovorjeno je, da se za standardne testne pogoje uporablja označba AM 1.5, ki predstavlja svetlobni spekter na zemeljski površini v pasu  $37^\circ$  severno od ekvatorja. Temperatura PV celice, določena za standardne testne pogoje je  $25^\circ \text{C}$ . Skupek teh treh pogojev imenujemo standardni testni pogoji (ang. *Standard Test Conditions – STC*). V realnih okoliščinah, kjer PV celica obratuje, so ti pogoji drugačni, zato je električna moč na sponkah celice manjša od vrednosti izmerjenih pri STC.

## 4.1 Vzroki za padanje izkoristka

Na padanje izkoristka PV celice vplivajo različni dejavniki:

- Povišana temperatura.
- Refleksija vpadne svetlobe.
- Umazanija na steklu modula.
- Lastne izgube (zasenčenost površine pod kontakti, notranja upornost).
- Staranje (temnenje) EVA plasti v modulu.

V tej nalogi smo se osredotočili na povečanje izkoristka z odvajanjem neželene toplote s PV celice.

## 4.2 Temperaturna odvisnost fotonapetostne celice

Izkoristek PV celice je temperaturno odvisen. Višanje temperature lahko razumemo kot zmanjševanje energijske vrzeli polprevodnika, kar posledično vpliva na več parametrov celice. Zgradba celice – PN stik – je podobna diodi. Celotni tok, ki teče skozi celico je tok, ki nastane zaradi pretvorbe fotonov in tok v zaporni smeri. S tem, ko se dioda (PN spoj) segreva, se viša tok v zaporni smeri (ang. *Dark current*). Zaradi tega se z višanjem temperature zmanjšuje napetost na PV celici in s tem njena električna moč.

Med normalnim delovanjem, ob sončnem poletnem dnevu, temperatura PV celice doseže več kot 70 °C. Glede na to, da proizvajalci podajajo nazivne vrednosti celice veljavne pri temperaturi 25 °C, je treba to veliko temperaturno razliko pri dimenzioniranju PV sistema upoštevati.

## 4.3 Prednosti hlajenega PV sistema

- Večja izhodna moč sistema (boljši izkoristek celice).
- Daljša življenjska doba.
- Odvedena toplota predstavlja dodatni vir energije.

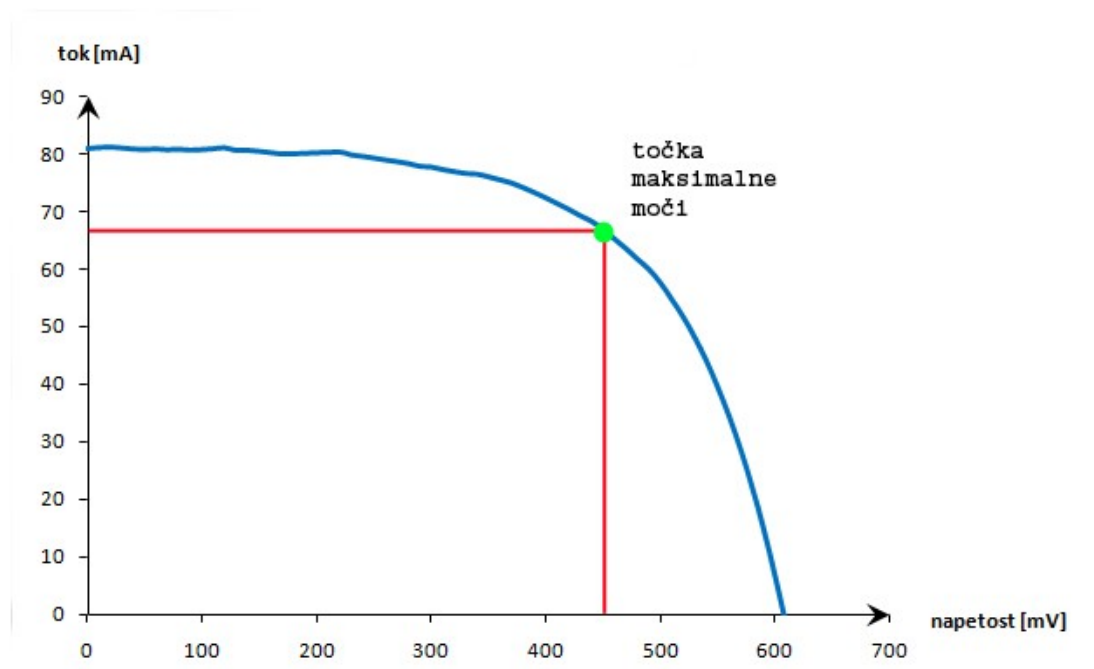


## 5 IV KARAKTERISTIKA

IV karakteristika je krivulja toka kot funkcija napetosti. Je osnoven pokazatelj delovanja PV celice. Iz IV krivulje izpeljemo vse parametre, ki so bistveni pri navajanju zmogljivosti in kvalitete celice. Slika 8 prikazuje tipičen potek IV krivulje fotonapetostne celice.

V primeru, da na PV celico ni priključeno nobeno breme, celica ne poganja električnega toka. Napetost na priključnih sponkah je maksimalna, električna moč je nična. IV krivulja se dotika abscisne osi.

Kratko sklenjene priključne sponke celice pomenijo, da celica poganja kratkostični (maksimalni) tok, napetost na sponkah in električna moč celice sta nični, IV krivulja se dotika ordinatne osi. Nekje med tema dvema skrajnima legama se nahaja točka, kjer ima produkt napetosti in toka najvišjo vrednost. Ta vrednost predstavlja maksimalno električno moč, s katero PV celica napaja popolnoma uglaseno breme.



Slika 8: Tipičen potek tokovno napetostne karakteristike fotonapetostne celice

### **5.1 Napetost odprtih sponk ( $U_{oc}$ )**

Napetost odprtih sponk je električna napetost, ki jo osvetljena celica dvigne, ko je povsem neobremenjena. To je najvišja napetost, ki jo lahko na celici izmerimo. Takoj ko je na celico priključeno breme, začne ta napetost padati po IV krivulji.

### **5.2 Kratkostični tok ( $I_{sc}$ )**

Kratko sklenjene priključne sponke celice pomenijo, da je napetost na sponkah nična in da je tok skozi celico maksimalen. Celica ne proizvaja nobene moči. Upoštevamo ga pri izbiri preseka vodnikov.

### **5.3 Maksimalna moč ( $P_{max}$ )**

To je maksimalna električna moč, ki jo celica dovede uglašnemu bremenu. Maksimalna moč je točka na IV krivulji, v kateri ima produkt toka in napetosti največjo vrednost.

### **5.4 Napetost pri maksimalni moči ( $U_{max}$ )**

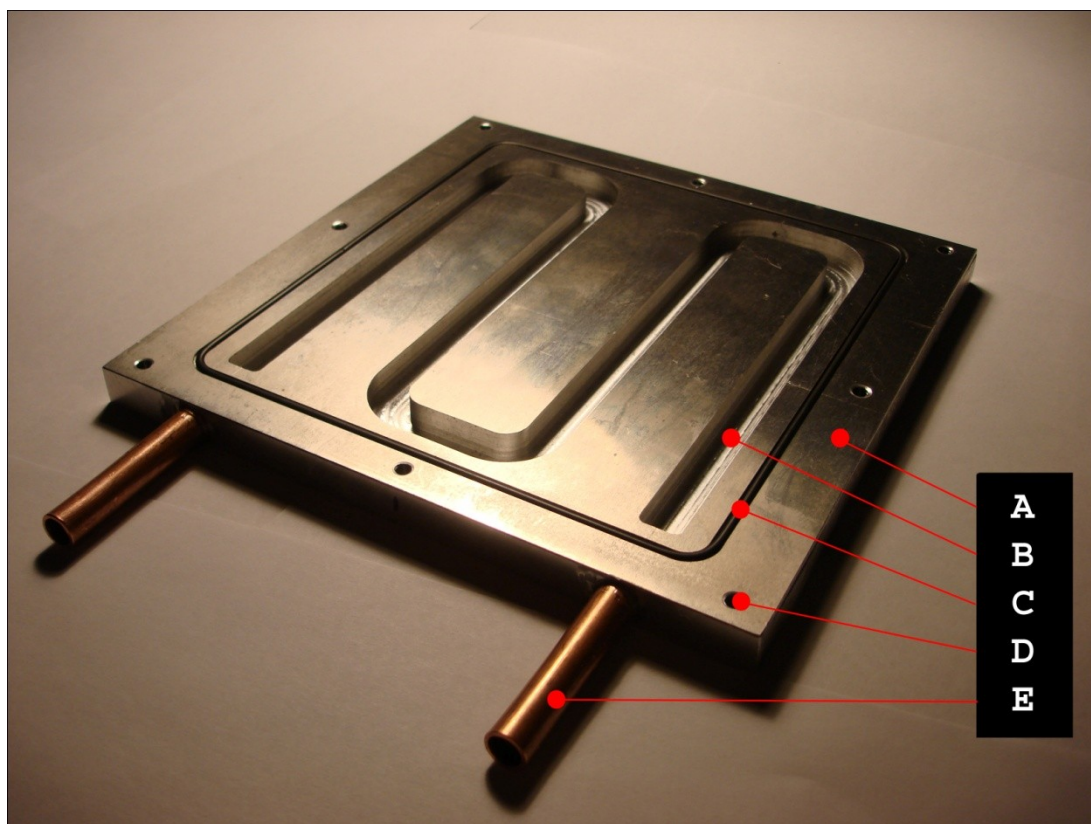
Je napetost, pri kateri celica proizvaja največjo moč. Napetost pri maksimalni moči moramo upoštevati pri izbiri bremena, da bo PV celica optimalno izkoriščena.

### **5.5 Tok pri maksimalni moči ( $I_{max}$ )**

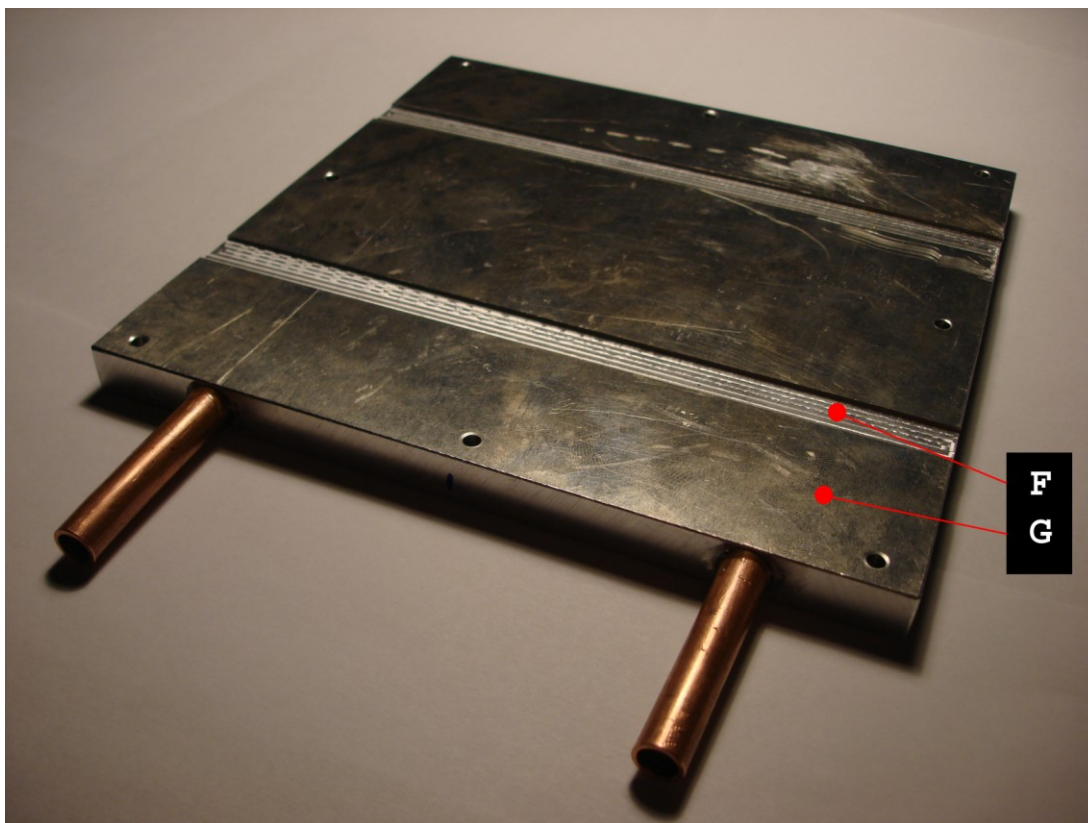
Je tok, pri katerem celica proizvaja največjo moč.

## 6 IZDELAVA TOPLOTNEGA ODVODNIKA

Toplotni odvodnik na slikah 9 in 10 je narejen iz štirih sestavnih delov. Telo odvodnika (A) je narejeno iz masivnega kosa aluminija dimenzij 156×156×10 mm, po katerem so na spodnji strani izrezkani prekati (B). Pokrov je narejen iz aluminijaste plošče debeline 2 mm. S pomočjo navojnih odprtin (D) je privijačen na telo odvodnika in zapira odprti del prekata. Med pokrovom in odvodnikom je tesnilo (C). Priključki za hladilno tekočino (voda, glikol) so narejeni iz bakrene cevi, katere so na stranskem delu povezane s prekati odvodnika (E). Površina, na katero nalega PV celica (G), je gladka in ravna. Ker ima PV celica na spodnji strani (stran ki nalega na odvodnik) dva električna priključka, je površina odvodnika v predelu teh priključkov poglobljena za debelino električnih vodnikov (F). S tem je zagotovljeno popolno naleganje celice na odvodnik. Prototipni toplotni odvodnik je izdelan na inštitutu Jožef Stefan v Ljubljani.



Slika 9: Spodnja stran odprtega toplotnega odvodnika



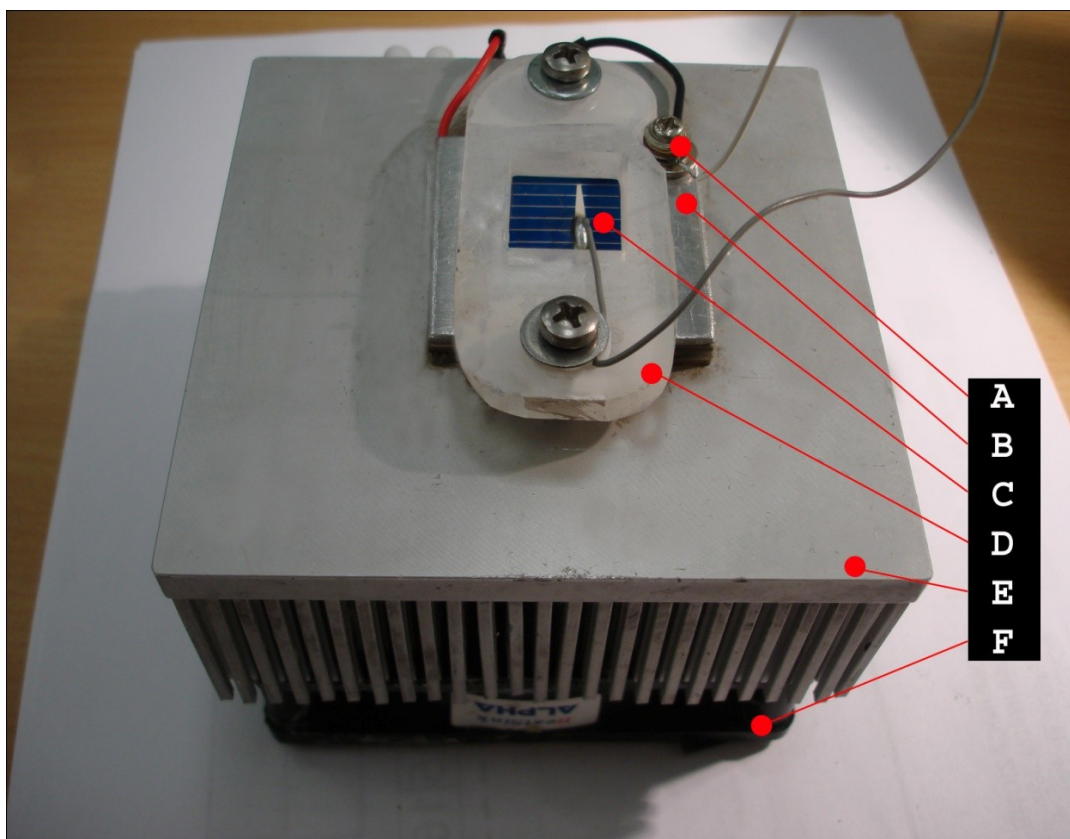
Slika 10: Zgornja stran toplotnega odvodnika

## 6.1 Peltier kot toplotni odvodnik

Peltierova ploščica (slika 16) povezana s krmilnikom deluje kot toplotni generator, ki omogoča nastavitve poljubne temperature v območju od  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Slika 11 prikazuje postavitev PV celice na Peltierovo ploščico. Površina ploščice (B) je v direktnem stiku s spodnjo stranjo PV celice (C), s katere odvzema toploto. Površina ploščice je precej manjša od površine PV celice, zato smo celico razrezali na primerno velikost. Iz pleksistekla smo izdelali masko (D) z odprtino  $2,5\text{ cm}^2$ , ki je celico pritiskala na ploščico. Na tak način je bila zagotovljena dobra toplotna prevodnost med obema površinama.

Ko skozi Peltierovo ploščico steče enosmerni tok, postane na eni strani hladna in absorbira toploto iz PV celice. Na drugi strani absorbirano toploto s pomočjo aluminijaste podlage (E) in ventilatorja (F) oddaja v prostor. Polariteta napajanja, oziroma smer električnega toka skozi ploščico določa, katera stran bo topla, oziroma hladna. Ob konstantnem toku vzdržuje ploščica konstantno temperaturno razliko med

eno in drugo stranjo. Na strani kjer je pritrjena PV celica se nahaja temperaturno tipalo (A), povezano s krmilnikom, kateri trenutno izmerjeno temperaturo primerja z nastavljenjo. Na podlagi temperaturne razlike krmilnik uravnava smer toka in širino tokovnega impulza skozi ploščico. PV celica zelo dobro prevaja temperaturo, zato je temperatura ploščice praktično enaka temperaturi celice.



Slika 11: Peltierova ploščica kot toplotni odvodnik

## **7 SISTEM ZA KARAKTERIZACIJO FOTOVOLTAIČNIH CELIC**

Sistem sestavljajo vsi merilni instrumenti, naprave in povezave med njimi, s pomočjo katerih smo izmeriti odzive fotonapetostne celice na temperaturne spremembe. Opravili smo dva sklopa meritev. Postavitev naprav v prvem sklopu simulira realen, vodno hlajen fotonapetostni sistem, medtem ko je postavitev v drugem sklopu namenjena karakterizaciji fotonapetostne celice pri različnih temperaturah.

V prvem sklopu meritev je kot izvor svetlobe uporabljena halogenska žarnica, priključena na variabilni transformator, kateri omogoča zvezno nastavitev intenzitete svetlobe. Za umeritev na standardne testne pogoje je uporabljen instrument za merjenje svetlobne jakosti Thorlabs (slika 13), z ustreznim senzorjem (slika 14). PV celica je postavljena na aluminijast toplotni odvodnik (slika 10). Breme celice predstavlja uporovna žica, njena dolžina pa različne ohmske vrednosti. Univerzalna instrumenta sta uporabljena za merjenje toka in napetosti. PV celico ohlaja toplotni odvodnik, ki je s cevmi priključen na tekočinsko hladilno napravo Lauda (slika 12). Temperatura je merjena s kontaktnim termometrom na zadnji strani celice.

V drugem sklopu meritev za izvor svetlobe uporabimo laboratorijski sončni simulator (slika 15). PV celico ohlaja Peltierova ploščica, priključena na krmilnik. Merilnik izvora Keithley (slika 17) v eni napravi združuje funkcije dveh merilnih instrumentov in spremenljivega bremena. Izmerjene podatke pošilja računalniku, kjer se prikažejo v preglednejši obliki.

Vse meritve so potekale v laboratoriju za fiziko organske snovi (LFOS) na Univerzi v Novi Gorici. Izvedene so bile na osnovnem elementu PV sistema, to je na eni sami PV celici (slika 1). PV celice so v PV modulih (slika 4) vezane v serijo, zato pridobljeni podatki veljajo tako za majhne PV sisteme, kot tudi za največje PV elektrarne.

### **7.1 Halogenski reflektor**

Nadomešča sončno svetlobo. Žarnica ima električno moč 400 W, svetlobno intenziteto 9000 lumnov, ter barvno temperaturo 2950 K. Podatki se nanašajo na komercialno Osramovo žarnico Haloline 64702 Eco.

## **7.2 Univerzalni merilni instrument**

Z dvema digitalnima univerzalnima instrumentoma smo merili IV karakteristiko. Serijsko vezan instrument je meril vrednost toka, ki ga je PV celica poganjala skozi breme. Napetost smo merili na priključnih sponkah PV celice.

## **7.3 Hladilna naprava Lauda WK230**

Je univerzalna kompresorska hladilna naprava s toplotnim izmenjevalcem plin-voda (slika 12). Kompresor s pomočjo plina ohlaja vodni zalogovnik, kapacitete približno dveh litrov. Črpalka, integrirana v napravi, skrbi za pretok ohlajene vode skozi sisteme, katere ohlaja. Temperaturno tipalo se nahaja v vodnem zalogovniku. Ko je dosežena nastavljena vrednost, kompresor ugasne. Območje hlajenja je nastavljivo v razponu od 0 °C do 40 °C. Akumulacija hladilne tekočine v izmenjevalniku ne dovoljuje hitrih temperaturnih sprememb. Električni termostat ne omogoča nastavljanja širšega razpona temperature. Temperatura vode v izmenjevalniku naprave ni enaka temperaturi toplotnega odvodnika, na katerem je postavljena PV celica. Vse te slabosti so odpravljene s Peltierovo ploščico, v drugem sklopu meritev.



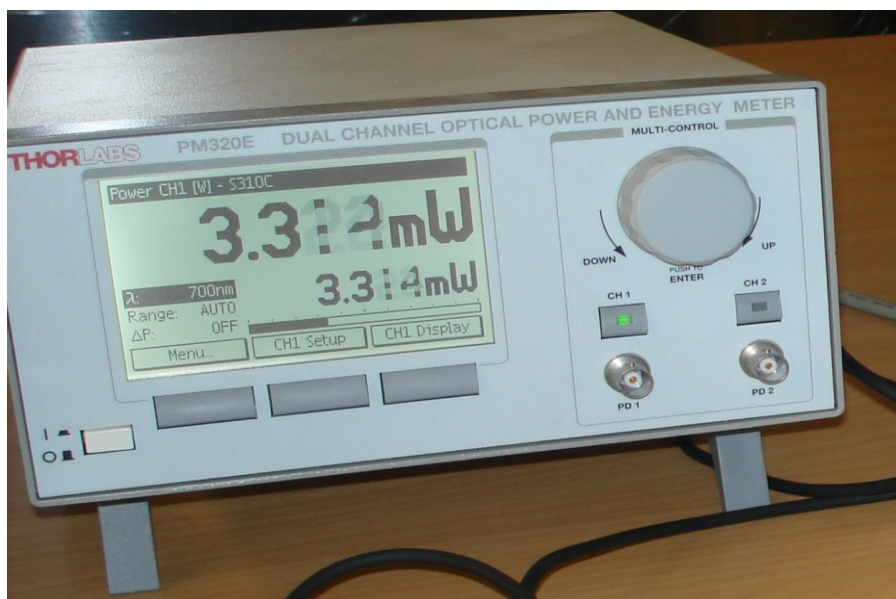


Slika 12: Hladilna naprava Lauda

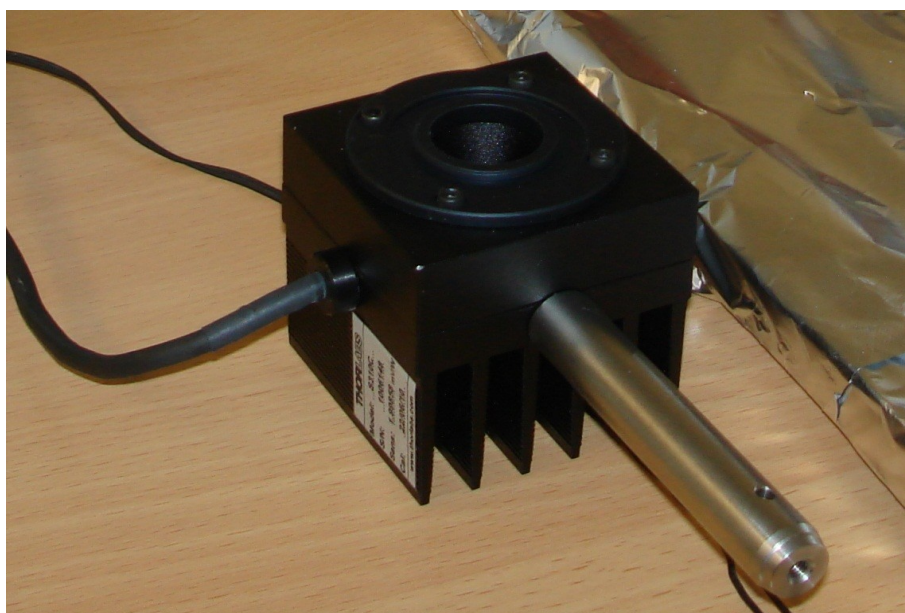
#### **7.4 Thorlabs PM320E**

Pri meritvi s halogensko žarnico nastavimo intenziteto svetlobe na standardno testno vrednost s pomočjo merilnika svetlobnega sevanja. Uporabili smo laboratorijski merilni instrument Thorlabs PM320E prikazan na sliki 13, s pripadajočim svetlobnim senzorjem Thorlabs S310C, prikazanim na sliki 14. Senzor smo postavili na površino PV celice in regulirali oddaljenost reflektorja od celice. S poznano površino senzorja in svetlobno močjo, ki jo je instrument izmeril, smo določili, kdaj je bila količina vpadne svetlobe skladna s standardnimi testnimi pogoji.





Slika 13: Merilnik svetlobne energije Thorlabs



Slika 14: Senzor svetlobne energije z okroglo merilno površino

## 7.5 Sončni simulator

Sončni simulatorji se uporabljajo za natančne in ponovljive pogoje testiranja PV celic v zaprtih prostorih. Svetlobni spekter takšnega simulatorja je zelo podoben

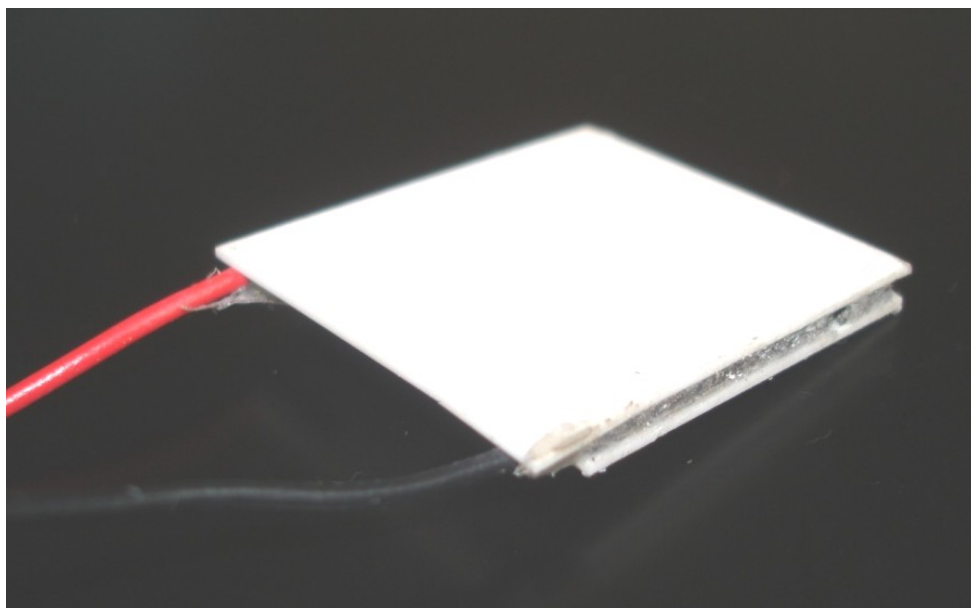
sončnemu, kar omogoča natančne in primerljive meritve. Zahtevana je tudi stabilnost intenzitete svetlobe in njenega spektra. Dobremu simulatorju med delovanjem intenziteta in spekter svetlobe ne variirata za več kot 1 %. V uporabljenem sončnem simulatorju (slika 15) predstavlja izvor svetlobe obločna ksenonska žarnica, ki ustreza omenjenim zahtevam. Žarnica dosega polno svetilnost ko je segreta. Simulator ima vgrajeno računalniško krmiljeno mehansko zaslonko, katera po potrebi zastre izhod svetlobe, brez ugašanja žarnice. Svetloba na izhodu simulatorja je kalibrirana na standardno testno vrednost  $1000 \text{ Wm}^{-2}$  in ustreza spektru 1.5 AM.



Slika 15: Sončni simulator z obločno ksenonsko žarnico

## 7.6 Peltierova ploščica

Peltierova ploščica prikazana na sliki 16 je sestavljena iz dveh tankih keramičnih ploščic, med katerima so vpeti majhni polprevodniški elementi. Enosmerni električni tok v PN spoju povzroči med obema ploščicama temperaturno razliko. Smer električnega toka skozi ploščico določa, katera stran bo hladna, oziroma topla. Z zamenjavo polaritete napajanja dosežemo hiter preklop med hlajenjem in gretjem. Je zelo zanesljiva naprava, ker nima mehanskih sestavnih delov. V povezavi s temperaturnim tipalom in krmilnikom, je Peltierova ploščica zagotavljala natančno nastavljanje želene temperature tiste strani, na kateri je bila pritrjena PV celica in temperaturni senzor (slika 11).



Slika 16: Gola Peltierova ploščica

## 7.7 Merilnik izvora Keithley 2400

Laboratorijski merilnik na sliki 17 združuje pet instrumentov v eni napravi. Deluje lahko kot izvor napetosti, izvor toka, kot merilnik napetost in merilnik toka, ter kot merilnik upornosti. Je idealen instrument za natančne meritve IV karakteristike z natančnostjo 0,012 %. V povezavi z računalnikom nudi enostavno nadaljnjo obdelavo izmerjenih veličin.



Slika 17: Laboratorijski merilnik izvora (slikovni vir: *Keithley.com*)

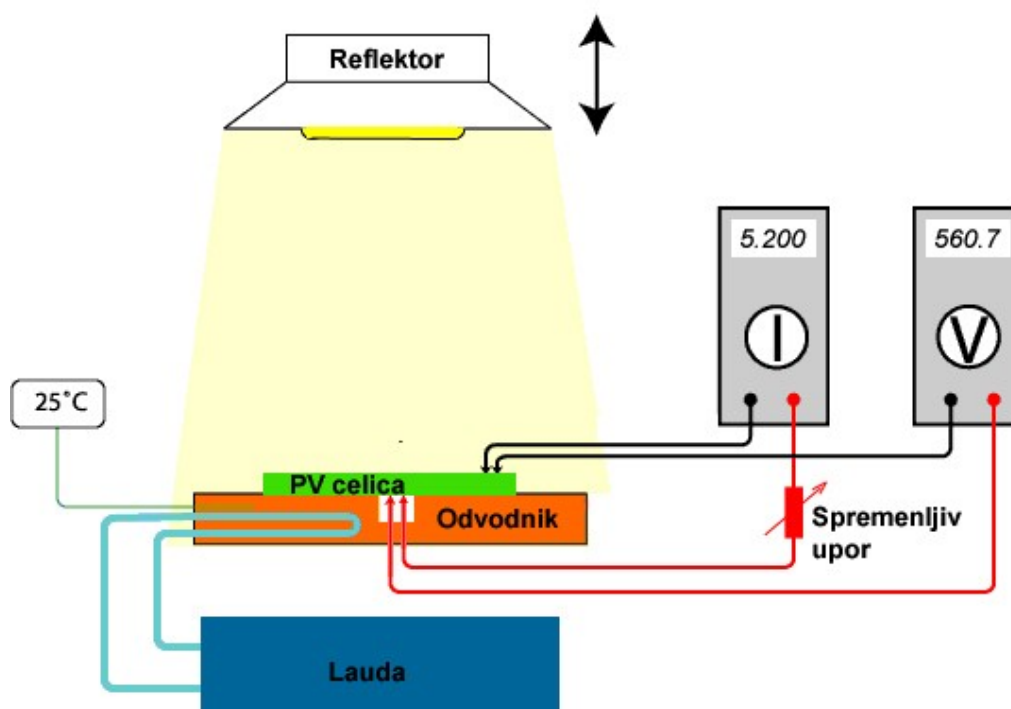
## 7.8 Meritve s halogensko žarnico

V prvem sklopu meritev je izvor sončnega sevanja simuliran s komercialno halogensko žarnico. Spekter takšne svetlobe je drugačen od spektra pri standardnih testnih pogojih, vendar to ni bistvenega pomena, ker je meritev v tem primeru osredotočena na relativno spremembo v sposobnostih PV celice, glede na njeno temperaturo.

Reflektor z omenjeno žarnico je postavljen na pomično vodilo, za lažje prilagajanje oddaljenosti od PV celice. Intenziteta vpadnega svetlobnega toka na celico je kalibrirana z laboratorijskim optičnim merilnikom in pripadajočim senzorjem na standardno testno vrednost  $1000 \text{ Wm}^{-2}$ . Toplotni odvodnik je priključen na tekočinski hladilnik Lauda. Celica je postavljena neposredno na toplotni odvodnik. Tok PV celice je merjen z ampermetrom in speljan skozi uporovno žico, ki nadomešča breme, napetost je merjena na priključnih sponkah celice. Digitalni termometer ima zunanje temperaturno tipalo, katero se dotika zadnje strani celice in meri dejansko temperaturo na površini celice. Medsebojna povezava instrumentov in naprav je razvidna na sliki 18.

V poizkusih je uporabljena ena sama sončna celica s površino  $0,024 \text{ m}^2$  ( $156 \times 156 \text{ mm}$ ), nameščena na toplotni odvodnik. Masa materiala samega odvodnika ne vpliva na meritve, ker je čas osvetljevanja dovolj dolg, da postane temperatura v nehlajenem sistemu enakomerna. Meritve IV karakteristike opravimo, ko je celica

segreta na 70 °C in jih ponovimo pri temperaturi 15 °C. Temperaturo nastavimo s termostatom na Laudi. Ohlajena tekočina s pomočjo črpalke kroži skozi toplotni odvodnik, s katerega odvzema toploto, ki jo celica proizvaja. Naprava nima možnosti hitre in natančne regulacije temperature, zaradi velike količine hladilne tekočine v napravi in histerezne zanke termostata. Po večkratnih poizkusih ugotovimo, da želene temperature PV celice 15 °C ni mogoče doseči. Z vklopom pretoka hladilne tekočine je na odvodniku in celici sicer dosežen takojšnji padec temperature, vendar se ta kmalu dvigne, ker je hladilna moč naprave premajhna. Temperatura se ustali pri 19 °C, takrat ponovimo meritev IV karakteristike. Napetost odprtih sponk celice naraste, ob zanemarljivo majhnem padcu kratkostičnega toka. Opazno se poveča maksimalna moč, ki jo celica proizvede.



Slika 18: Sistem za karakterizacijo PV celice s halogensko žarnico

### 7.8.1 Meritev IV karakteristike

Tok PV celice je speljan skozi uporovno žico nizke upornosti, katera simulira breme. Različne dolžine žice predstavljajo različno upornost in s tem povezano vrednost toka in padca napetosti. Na različnih odsekih uporovne žice (različna upornost) je



odčitana vrednost toka in napetosti, podatki se zapisujejo v Excelovo razpredelnico. Pridobljeni podatki so osnova za izdelavo grafa tokovno-napetostne karakteristike (slika 21).

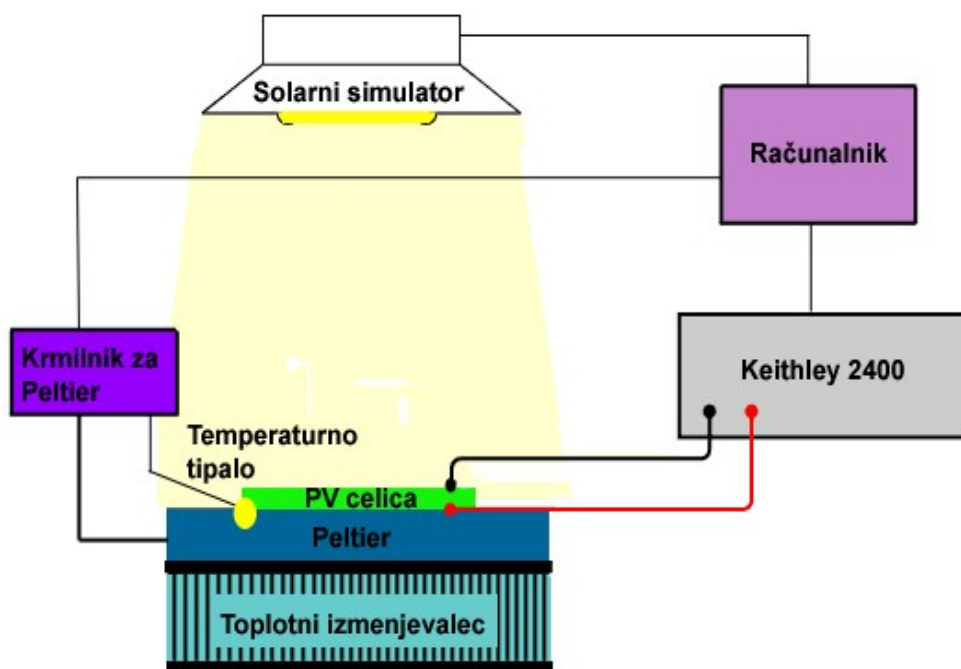
Maksimalna moč PV celice bo dosežena, ko bo breme impedančno usklajeno s celico. Takrat bo skozi breme tekel največji tok, ob najvišji napetosti. V tej točki se nahaja maksimalna moč, s katero je celica sposobna napajati breme oziroma porabnik. PV celica poganja ob nazivni osvetljenosti visok tok ( $\sim 7$  A) ob nizki napetosti ( $\sim 500$  mV), kar predstavlja težavo pri merjenju IV karakteristike. Zaradi nizke napetosti in visokega toka predstavlja vsak vodnik v tokokrogu, skupaj z notranjo upornostjo ampermetra, dodaten in moteč upor, ki vpliva na merjene rezultate, predvsem v območju kratkostičnega toka  $I_{sc}$ . Zaradi teh vzrokov ne moremo izmeriti kratkostičnega toka, ker potek IV krivulje ne doseže napetosti 0 V. Potek IV krivulje začne od napetosti, katera je višja za velikost seštevka vseh padcev napetosti v tokokrogu (slika 21). To odstopanje ne vpliva na končen rezultat meritve. V območju IV krivulje, kjer se nahaja maksimalna moč celice, sicer obstaja zaradi teh parazitnih upornosti rahel zamik od realne vrednosti, ki pa je praktično enak pri hlajeni in nehlajeni celici. Razmerje moči med hlajeno in nehlajeno celico je zato realno.

## 7.9 Meritve s sončnim simulatorjem

V drugem sklopu meritev smo zaradi želje po čim natančnejših in realnejših rezultatih sončno svetlobo nadomestili z laboratorijskim sončnim simulatorjem, oziroma umetnim soncem. Svetloba, ki jo tak izvor seva, je spektralno zelo podobna sončni svetlobi. Ker ima simulator omejeno površino, ki jo lahko obseva skladno s standardnimi testnimi pogoji, smo meritve opravili na manjši PV celici, katero smo dobili z rezanjem celice na manjše dele. PV celici se delovna karakteristika ne spremeni, če ji zmanjšamo površino, spremeni se le tok. Ugotovimo, da se z zmanjšanjem površine celice za 50 % v enakem razmerju zmanjša tudi tok. Površino celice smo prilagodili na velikost  $15 \times 17$  mm, ki je bila primerna za postavitve na Peltierovo ploščico in je ustrezala površini, ki jo simulator lahko osvetli, upoštevajoč STC. Želena temperaturo smo vnesli v računalnik, ki je v povezavi s krmilnikom

natančno vzdrževal nastavljeno temperaturo na Peltierovi ploščici in s tem temperaturo PV celice.

PV celico smo med poizkusom osvetljevali s sončnim simulatorjem, medtem ko je bila priključena na merilnik izvora Keithley, s katerim smo zelo natančno izmerili tokovno-napetostno krivuljo (slika 22). PV celica je instrument občutila kot spremenljiv upor, kateri je nadomeščal breme, istočasno pa je meril tok in napetost na celici. Peltierova ploščica je v povezavi s krmilnikom omogočala nastavitve temperature v korakih po eno stopinjo Celzija. Medsebojna povezava instrumentov in naprav je razvidna na sliki 19. Meritve IV karakteristike smo opravili v temperaturnem območju od  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ , v korakih po  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Izmerjene veličine so bile osnova za izračun maksimalne moči ( $P_{\text{max}}$ ) in izkoristka celice. Iz IV karakteristike je razvidna vrednost kratkostičnega toka ( $I_{\text{sc}}$ ), napetosti pri maksimalni moči ( $U_{\text{max}}$ ) in toka pri maksimalni moči ( $I_{\text{max}}$ ). Meritev smo opravili primerjalno dvakrat, na dveh različnih koščkih PV celice. Na slikah št. 23 do 28 je to v legendi grafa označeno kot »prva« in »druga meritev«. Rezultati meritev kažejo skoraj identično obnašanje obeh celic.



Slika 19: Sistem za karakterizacijo PV celice s sončnim simulatorjem

Meritev IV karakteristike je izvedena na merilniku izvora Keithley, s prednastavljenimi parametri. Podatki meritve se zapisujejo v računalnik, spremenijo se v obliko prepoznavno za program Excel, s katerim narišemo potek IV karakteristike izmerjene PV celice. Izvedenih je 81 korakov, v katerih instrument vsiljeno napetost dviguje v korakih po 10 mV, od napetosti -100 mV do +700 mV in ob tem meri tokovni odziv PV celice v prevodni in zaporni smeri. Ker z nastavljenimi koraki IV krivulja ne pokaže natančne vrednosti napetosti odprtih sponk ( $U_{oc}$ ), je ta izražena s pomočjo interpolacije.

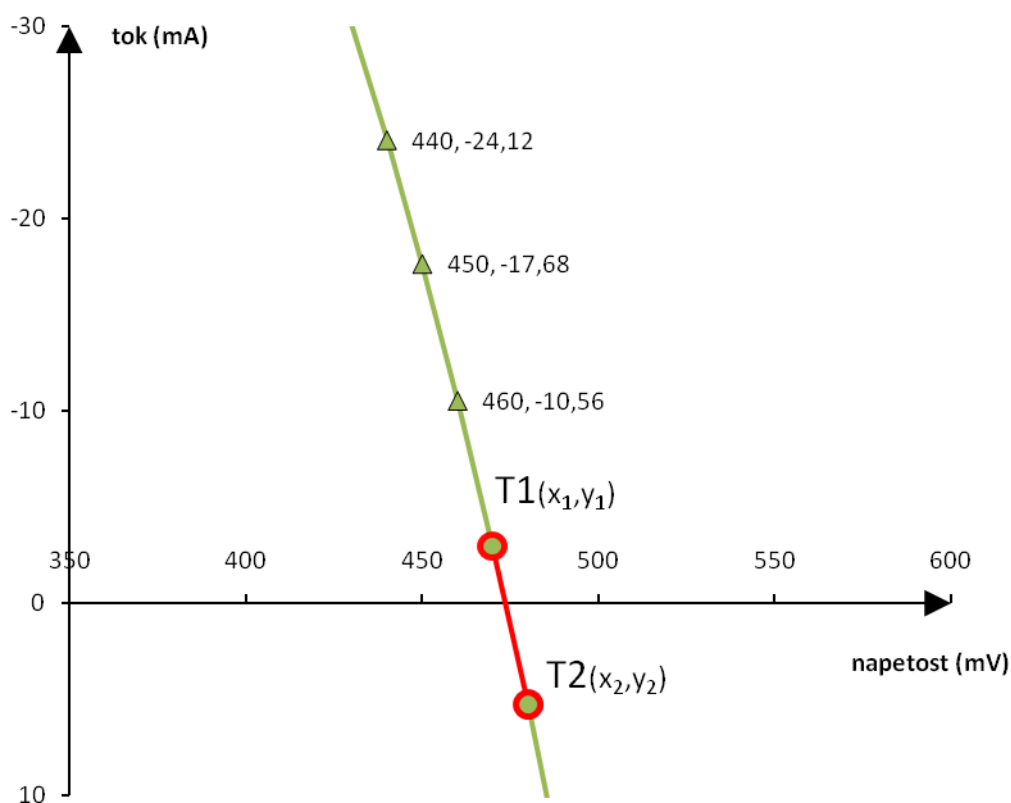
### 7.9.1 Z interpolacijo do napetosti odprtih sponk

Interpolacijo izvedemo zaradi določitve napetosti odprtih sponk. Zanima nas, kdaj bo premica sekala y os (slika 20), pri kateri bo vrednost napetosti enaka napetosti odprtih sponk  $U_{oc}$ . Takrat ima tok vrednost nič (krivulja seka x os, vrednost  $y=0$ ). Meritve se izvajajo v korakih po 10 mV, zato je malo verjetno, da bo tok imel vrednost nič ravno na enem izmed teh korakov. Točka T1 ima nad x osjo napetost označeno z  $x_1$  in tok z  $y_1$ , točka T2 pod x osjo ima napetost označeno z  $x_2$  in tok z  $y_2$ .



To sta najbližji znani vrednosti toka in napetost nad in pod x osjo. Z naslednjo enačbo ugotovimo, kje bo premica sekala x os, tam bo tok imel vrednost nič ( $y=0$ ). Vrednost  $x$  v enačbi predstavlja napetost odprtih spenk.

$$x = x_2 - \frac{y_2 \times (x_1 - x_2)}{y_2 - y_1}$$



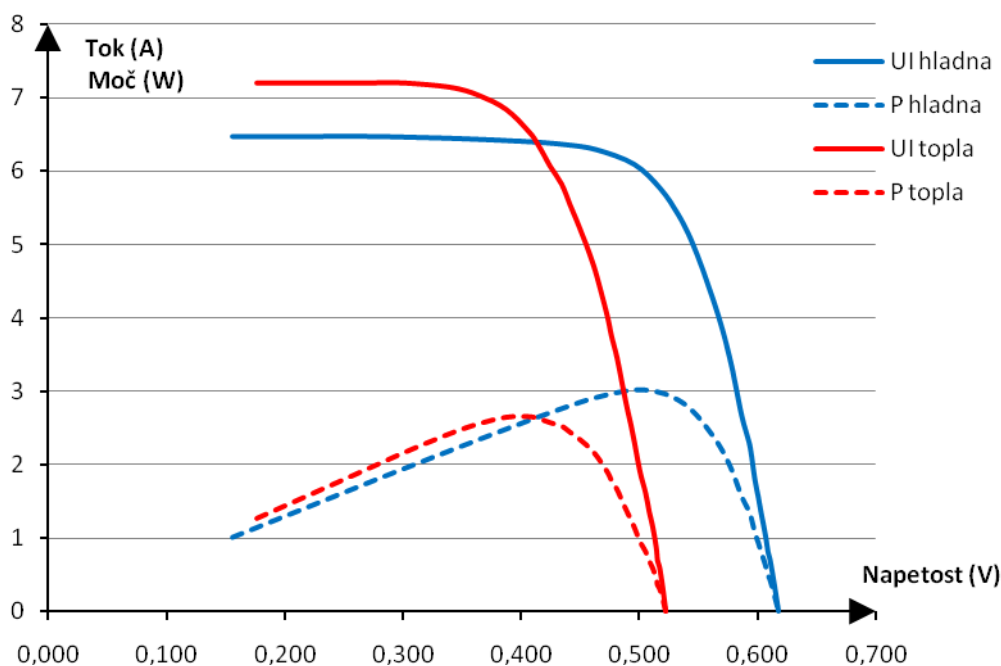
Slika 20: Interpolacijska določitev napetosti odprtih spenk. Sečišče abscisne osi med točko T1 in T2 ima vrednost napetosti odprtih spenk.

## 8 REZULTATI MERITEV

Izpostavimo rezultate meritev, kjer bo lepo razviden doprinos ohlajene celice v primerjavi z nehlajeno. Temperatura 15 °C je izbrana iz predpostavke, da celico ohlajamo z naravnimi viri, brez uporabe dodatne energije. Zanima nas primerjava tokovno-napetostne karakteristike ter moči, med hlajeno in nehlajeno PV celico, ki v realnih delovnih pogojih na poletni dan doseže in preseže 70 °C.

### 8.1 Prvi sklop meritev

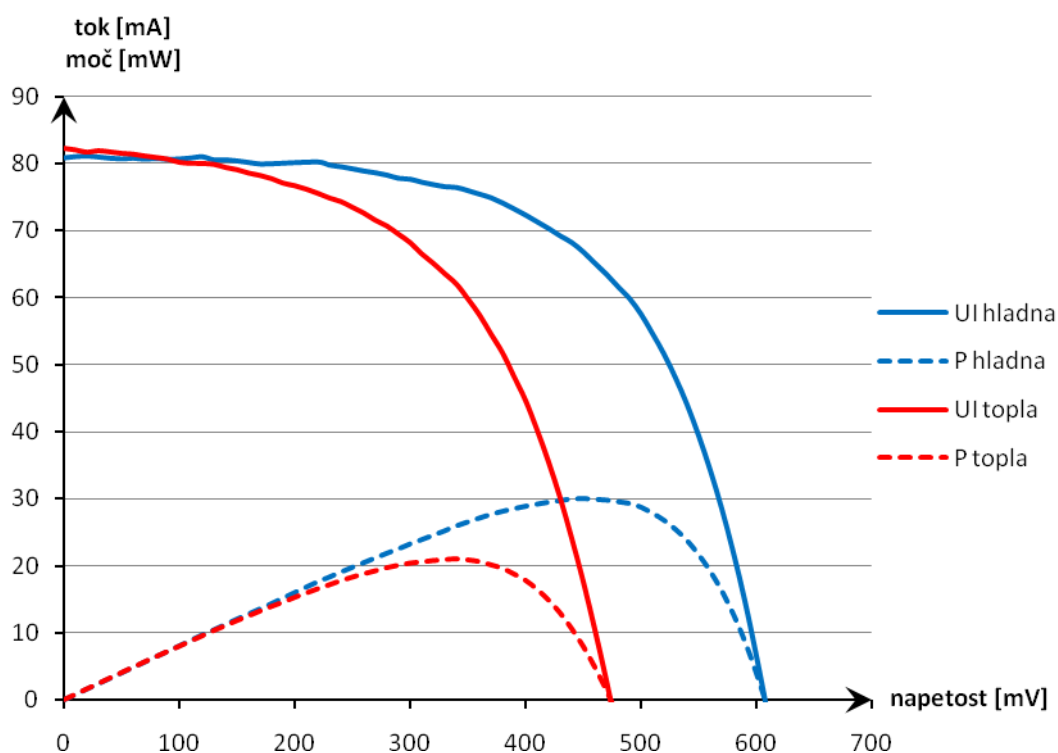
V prvem sklopu meritev instrumenti pokažejo 3,026 W proizvedene električne moči, pri celici ohlajeni na 19 °C. Segreta na 70 °C proizvede 2,655 W. Padeč moči je 0,26 % na vsako stopinjo Celzija povišane temperature. Temperatura 15 °C ni dosežena, zaradi prešibke hladilne naprave. Najnižja temperatura, ki je bila s tekočinskim hladilnim sistemom dosežena, je imela vrednost 19 °C. Za nižjo temperaturo bi potrebovali zmogljivejšo hladilno napravo, zato so ti rezultati le informativni.



Slika 21: Primerjava IV karakteristike ter moči, med toplo (70 °C) in hladno (19 °C) fotonapetostno celico v prvem sklopu meritev.

## 8.2 Drugi sklop meritev

V drugem sklopu meritev, s sončnim simulatorjem kot virom svetlobe, s Peltierovo ploščico kot toplotnim odvodnikom in z laboratorijskim merilnim instrumentom, dobimo verodostojnejše rezultate. Slika 22 prikazuje tokovno-napetostno karakteristiko in krivuljo moči, pri hlajeni in nehlajeni PV celici. Pri temperaturi 15 °C je proizvedena moč 30,05 mW, ko doseže temperaturo 70 °C je njena moč le še 21,08 mW. Padec moči je 0,65 % na vsako stopinjo Celzija povišane temperature, oziroma 29,85 % na celotnem temperaturnem razponu.

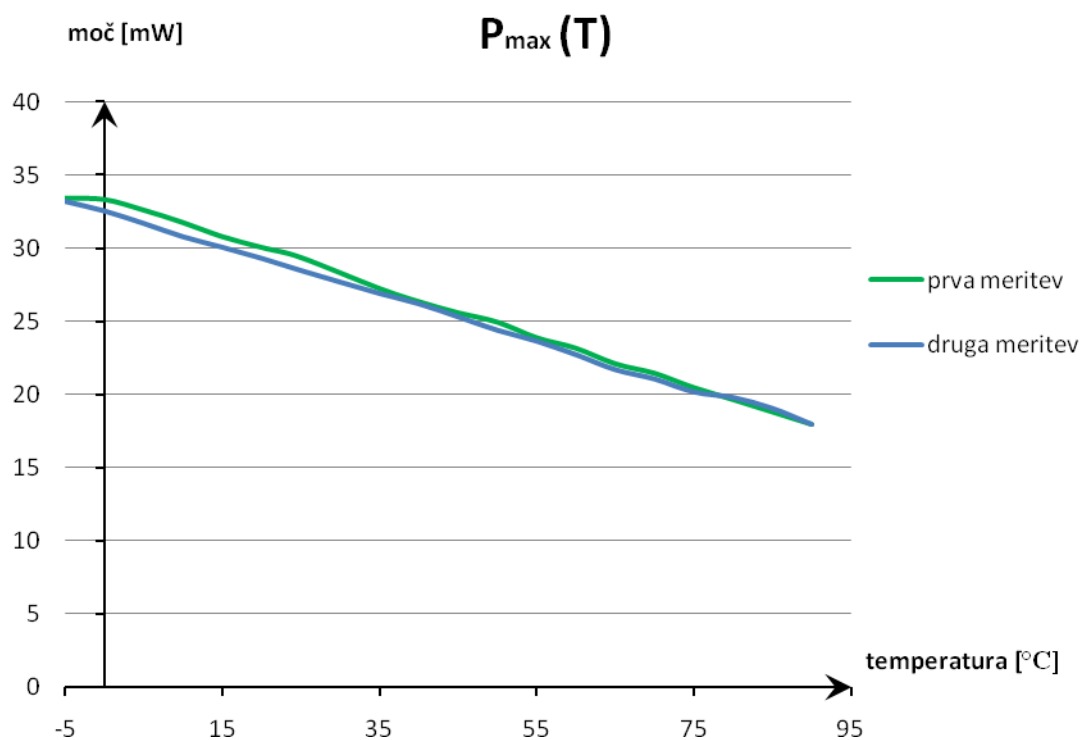


Slika 22: Primerjava IV karakteristike ter moči, med toplo (70 °C) in hladno (15 °C) fotonapetostno celico v drugem sklopu meritev.

Oprema in merilni instrumenti so v drugem sklopu meritev omogočali natančne nastavitve temperature in natančno merjenje električnih veličin, zato smo želeli izmeriti odziv PV celice na širšem temperaturnem območju. Meritve smo ponavljali ob spremembah temperature od -5 do 90 °C v korakih po 5 °C.

### 8.2.1 Moč

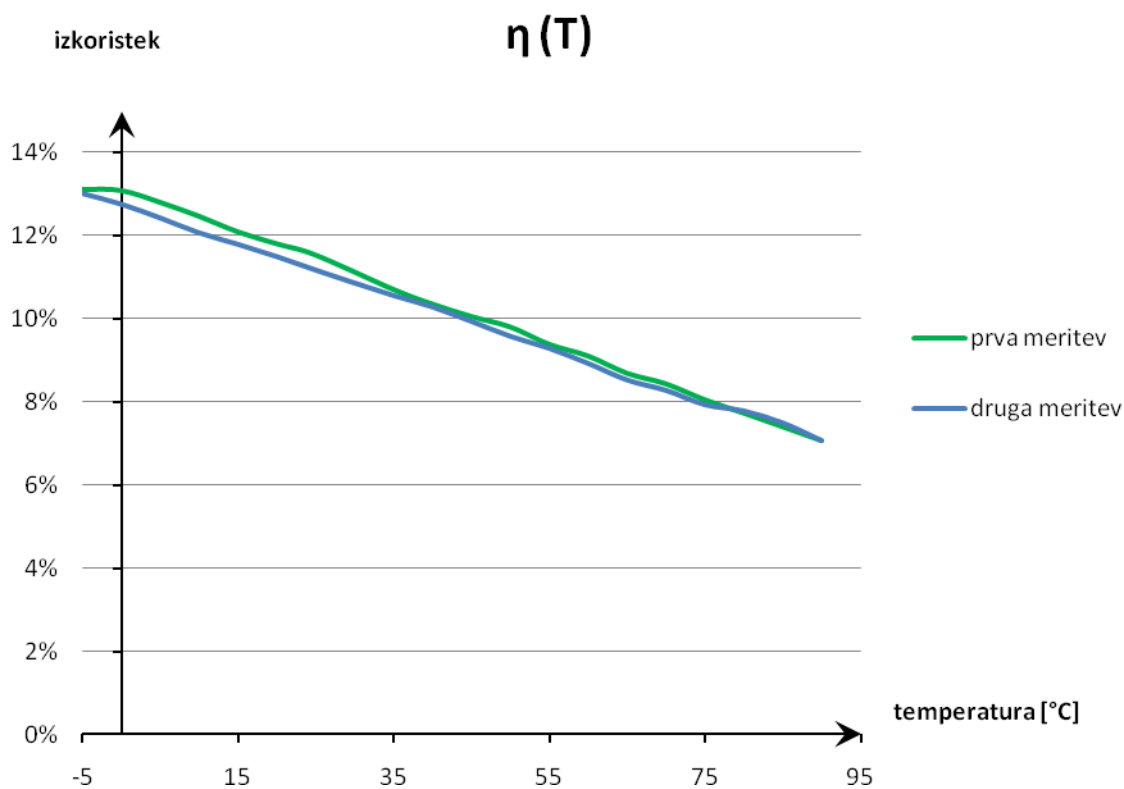
Moč je produkt napetosti in toka. Maksimalna moč je izračunana kot produkt maksimalne vrednosti toka pri maksimalni vrednosti napetosti. Takrat PV celica proizvaja maksimalno moč. Ta podatek je osnova pri izračunu izkoristka celice. Pri temperaturi  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  je električna moč celice  $33,31\text{ mW}$ , pri  $90\text{ }^{\circ}\text{C}$  pa  $17,99\text{ mW}$ . Ob vsaki stopinji Celzija povišane temperature pade moč celice za  $0,65\%$ , oziroma  $46\%$  na celotnem temperaturnem razponu. Ker smo meritve opravili dvakrat, na dveh PV celicah, vzamemo njuno povprečno vrednost. Slika 23 prikazuje padanje moči celice ob naraščanju temperature.



Slika 23: Maksimalna moč v odvisnosti od temperature

### 8.2.2 Izkoristek

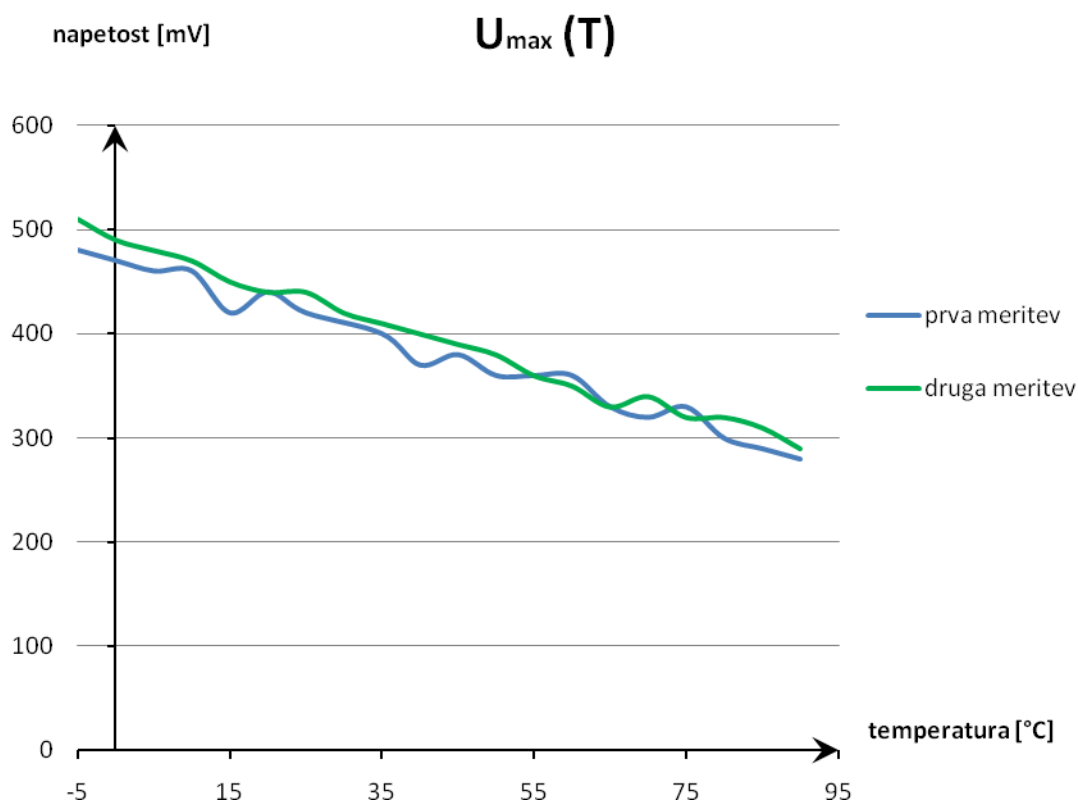
Slika 24 prikazuje padanje izkoristka v odvisnosti od temperature. Izračunamo, da izkoristek pade za 0,65 % na vsako stopinjo Celzija povišane temperature. Ker smo meritve opravili dvakrat, na dveh PV celicah, vzamemo njuno povprečno vrednost. Pri temperaturi  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  je izkoristek celice 13,06 %, pri temperaturi  $90\text{ }^{\circ}\text{C}$  pa je izkoristek 7,06 %. Izkoristek in maksimalna moč celice sta v enaki odvisnosti od temperature, ker je izkoristek neposredno odvisen od električne moči, ki jo celica pretvori iz svetlobnega sevanja.



Slika 24: Izkoristek v odvisnosti od temperature

### 8.2.3 Napetost pri maksimalni moči

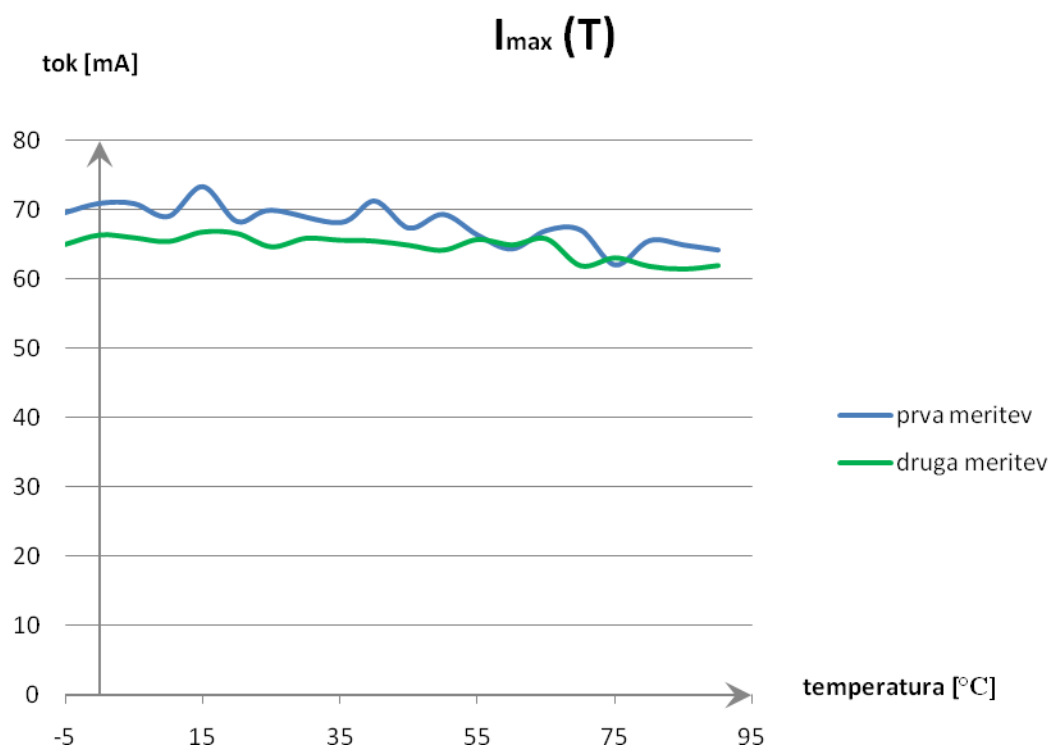
To je napetost pri kateri celica proizvaja največjo moč. Napetost pri maksimalni moči pade za 0,58 % na vsako stopinjo Celzija povišane temperature. Pri temperaturi  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  ima vrednost 495 mV, pri  $90\text{ }^{\circ}\text{C}$  pa 285 mV. Ker smo meritve opravili dvakrat, na dveh PV celicah, vzamemo njuno povprečno vrednost.



Slika 25: Napetost pri maksimalni moči v odvisnosti od temperature

### 8.2.4 Tok pri maksimalni moči

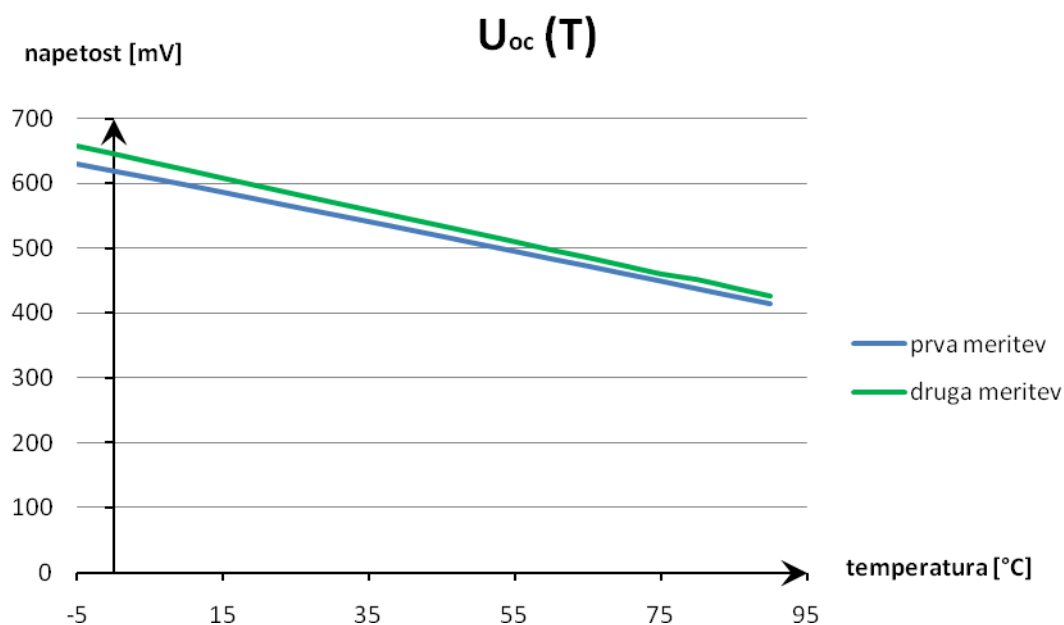
To je tok ki steče skozi breme, ko celica proizvaja maksimalno moč. Je maksimalen tok, ki lahko teče skozi uglašeno breme. Pri temperaturi  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  je ta tok 67,3 mA, pri temperaturi  $90\text{ }^{\circ}\text{C}$  pa 63,17 mA. Tok pri maksimalni moči pade za 0,07 % na vsako stopinjo Celzija povišane temperature. Ker smo meritve opravili dvakrat, na dveh PV celicah, vzamemo njuno povprečno vrednost.



Slika 26: Tok pri maksimalni moči v odvisnosti od temperature

### 8.2.5 Napetost odprtih sponk

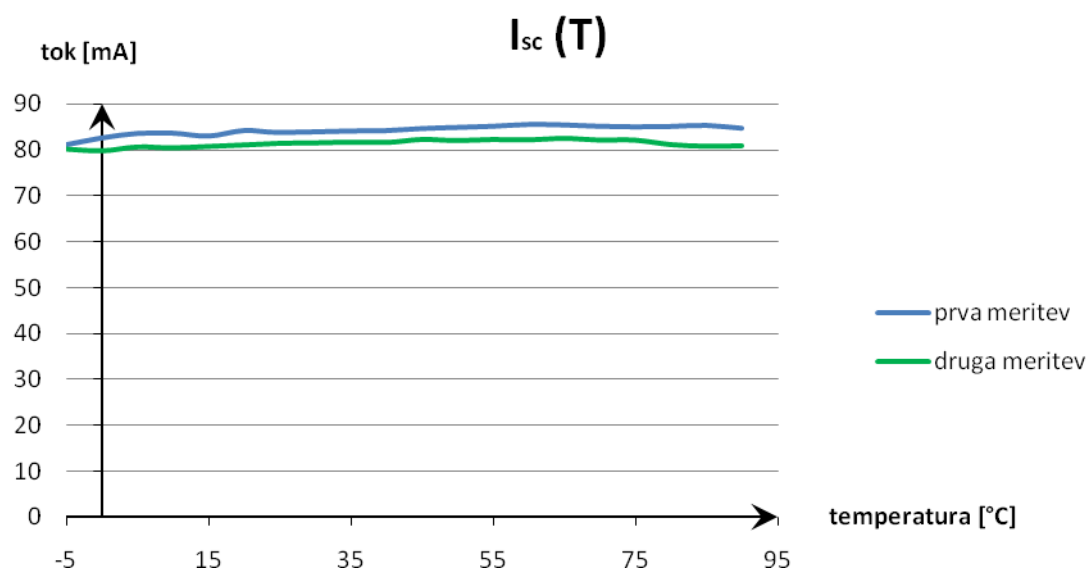
To je napetost, ki jo izmerimo na priključnih sponkah, ko na celico ni priključeno nobeno breme. Tok ne teče, celica ne proizvaja nobene moči. Pri temperaturi  $-5\text{ °C}$  je ta napetost  $643\text{ mV}$ , pri temperaturi  $90\text{ °C}$  pa  $420\text{ mV}$ . Na vsako stopinjo Celzija povišane temperature pade napetost za  $2,28\text{ mV}$  oziroma za  $0,45\%$ . Ker smo meritve opravili dvakrat, na dveh PV celicah, vzamemo njuno povprečno vrednost.



Slika 27: Napetost odprtih sponk v odvisnosti od temperature

### 8.2.6 Kratkostični tok

Kratkostični tok je edini parameter PV celice, ki z naraščanjem temperature rahlo raste. Pri temperaturi minus 5 °C ima vrednost 80,68 mA, pri temperaturi 90 °C pa 82,82 mA. Izračunamo naraščanje kratkostičnega toka za 0,02 % na vsako stopinjo Celzija povišane temperature. Uporabljena je povprečna vrednost obeh meritev.



Slika 28: Kratkostični tok v odvisnosti od temperature



## 9 ANALIZA IN DISKUSIJA REZULTATOV

V obeh sklopih meritev nas je zanimala temperatura celice pri 15 °C, ker je to ocenjena temperatura rečnih virov, katerih vodo lahko brez dodatno vložene energije uporabimo za hlajenje PV modulov. Temperatura 70 °C predstavlja temperaturo segretega PV sistema na poletni dan. Meritve so pokazale, da je električna moč, ki jo hlajen PV sistem proizvaja, skoraj za tretjino večja kot pri nehlajenem.

Na slikah 23 in 24 vidimo, da maksimalna moč in posledično izkoristek fotonapetostne celice z naraščanjem temperature linearno padata. V celotnem merjenem temperaturnem območju pade električna moč celice za 46 %, kar pomeni, da pade njen izkoristek za 0,65 % ob vsaki stopinji Celzija povišane temperature. Ugotovili smo, da kratkostični tok na povišanje temperature ne kaže spremembe (slika 28), celo minimalno narašča za 0,02 % na vsako stopinjo Celzija povišane temperature, medtem ko napetost odprtih sponk pade za 0,45 % na vsako stopinjo Celzija povišane temperature (slika 27), kar je skladno z lastnostmi PN spoja. To nam potrjuje dejstvo, da je temperaturna odvisnost celice posledica temperaturne odvisnosti silicija, iz katerega je celica zgrajena.

Med meritvami smo naleteli na dve težavi. Zelo nizka napetost celice ob visokem toku povzroči napake pri meritvah, ker notranja upornost univerzalnega merilnega instrumenta, povezovalni vodniki in njihova kontaktna upornost, predstavljajo v danih pogojih dovolj velike upore, da padci napetosti na njih niso več zanemarljivi. Druga težava je bila natančno določanje in vzdrževanje konstantne temperature celice med meritvijo. Velika količina toplotne energije, odvzete s površine celice, je vplivala na temperaturo hladilne tekočine v zalogovniku naprave. Posledično se je v toplotni odvodnik postopoma vračala vedno toplejša tekočina, ker prešibka hladilna naprava ni zmogla vzdrževati nastavljenе temperature. Velika količina tekočine v zalogovniku in histerezna zanka termostata naprave nista dopuščali hitrih in natančnih nastavitvev temperature. Zaradi omenjenih težav so izmerjene vrednosti v prvem sklopu meritev (slika 21) netočne in so v nalogi omenjene zgolj informativno.

Oba problema smo odpravili v drugem sklopu meritev (poglavje 7.9), kjer smo zmanjšali velikost celice in za vzdrževanje temperature uporabili Peltierovo ploščico, ki je bila dovolj zmogljiva, da je bila temperatura celice med meritvijo točna in

konstantna. Ugotovili smo, da se je z zmanjšanjem površine celice v enakem razmerju zmanjšal tudi tok, napetost celice pa je ostala enaka.

Vse ugotovitve in izmerjeni rezultati v diplomski nalogi, so uporabni pri ocenjevanju izboljšave izkoristka fotonapetostnih elektrarn. Električna moč celotne elektrarne je v enaki temperaturni odvisnosti, kot je električna moč pri eni sami fotonapetostni celici.

Golmud Solar Park, trenutno največja fotonapetostna elektrarna na svetu, ki pri standardnih testnih pogojih proizvaja moč 200 MW, se v poletnem obdobju močno segreva in doseže temperaturo 70 °C. V tistem trenutku proizvaja le še 141,5 MW električne energije. Izgube zaradi povišane temperature znašajo 58.5 MW. V primeru, da bi na takšno elektrarno aplicirali hladilni sistem, ki bi ohranjal njeno nazivno moč, bi lahko z električno energijo oskrbovali dodatnih 10000 gospodinjstev.

## 10 ZAKLJUČNE UGOTOVITVE

Meritve so pokazale občutni doprinos električne moči pri hlajeni PV celici. Za tržno zanimiv, hlajen fotonapetostni modul, bi bilo potrebno združiti PV celice in toplotni odvodnik (tekočinsko hlajeno podlago) v kompaktno celoto, ki ne bi smela biti pretežka, predraga in preobčutljiva na zunanje dejavnike. Dimenzijsko tak modul ne bi bil večji od klasičnega. Toplotni odvodnik bi bil istočasno tudi podlaga za celice in nosilna konstrukcija PV modula.

Drugače zasnovan toplotni odvodnik bi bilo možno namestiti na že obstoječe PV sisteme, brez velikih posegov in brez prekinitve delovanja sistema.

Izdelava prototipnega odvodnika za eno PV celico ni bila ekonomsko problematična, za serijsko proizvodnjo hlajenih PV modulov pa bi bilo potrebno nadaljnje raziskave usmeriti v optimizacijo uporabljenih materialov.

Množične uporabe takšnega sistema še ni bilo zaslediti, niti ni bilo zaslediti ponudnikov, ki bi take sisteme izdelovali. Tak sistem bo v prihodnosti zagotovo našel svoje mesto na specifičnih lokacijah, tudi v primeru, da bi natančna ekonomska analiza pokazala nerentabilnost. V planinskih in raziskovalnih postojankah, odročnih počitniških hišicah, jadrnicah, v avtodomih in podobno, bi bila višja cena upravičena s koristjo, ki bi jo tak sistem uporabniku ponujal.

Z meritvami predstavljenimi v tej nalogi smo dokazali, da je na takšno tehnološko rešitev smiselno usmeriti pozornost. Prihodnost potrebuje zmogljive, zanesljive in ekološke vire električne energije. Tak sistem bi vse to omogočal.

Na potrošniškem trgu igra ekonomija glavno vlogo. Optimizacija uporabljenih materialov toplotnega odvodnika, v kombinaciji z enostavnimi konstrukcijskimi rešitvami, bi omogočala cenovno ugodno proizvodnjo in s tem uspešnost takšnega sistema.

## 11 LITERATURA

**Luque, A., Hegedus, S.** (2003). Handbook of Photovoltaic Science and Engineering. Institute of Energy Conversion, University of Delaware, USA

**Air Mass 1,5.** Reference Solar Spectral Irradiance. Pridobljeno 10.5.2012 s svetovnega spleta: <http://rredc.nrel.gov/solar/spectra/am1.5/>

**Cullen, Richard A.** Maximum power point tracking. Pridobljeno 10.6.2011 s svetovnega spleta: [http://www.blueskyenergyinc.com/uploads/pdf/BSE\\_What\\_is\\_MPPT.pdf](http://www.blueskyenergyinc.com/uploads/pdf/BSE_What_is_MPPT.pdf)

**Ekološke Inovacije.** Fotovoltaika in njen zgodovinski razvoj. Pridobljeno 12.4.2011 s svetovnega spleta: [http://ekoino.savudrija.net/3\\_1.htm](http://ekoino.savudrija.net/3_1.htm)

**Herrmann, W.** (2010). How temperature cycling degrades photovoltaic module performance. Pridobljeno 29.10.2010 s svetovnega spleta: <http://spie.org/x41305.xml?ArticleID=x41305>

**Keithley Source Measurement Unit Instruments.** Pridobljeno 8.3.2012 s svetovnega spleta: <http://www.keithley.com>

**King, D., Kratochvil, J., Boyson, W.** (1997). Temperature coefficients for PV modules and arrays. Pridobljeno 10.6.2011 s svetovnega spleta: <http://photovoltaics.sandia.gov/docs/PDF/IEDFB5~1.pdf>

**List of Photovoltaic Power Stations.** Wikipedia. Pridobljeno 12.3.2012 s svetovnega spleta: [http://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_photovoltaic\\_power\\_stations](http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_photovoltaic_power_stations)

**Makrides, G., Georghiou, G., Zinsser, B., Werner, J.** Temperature behaviour of different photovoltaic systems. Pridobljeno 17.6.2011 s svetovnega spleta: <http://www.pvtechnology.ucy.ac.cy/pvtechnology/publications/PVSEC17ucyipe.pdf>

**Perez, R., Schultze, B.** (1995) PV Performance Test. Pridobljeno 23.4.2010 s svetovnega spleta: [http://72.52.208.92/~gbpprorg/guerrilla.net/reference/power\\_systems/solar/pvtest.pdf](http://72.52.208.92/~gbpprorg/guerrilla.net/reference/power_systems/solar/pvtest.pdf)

**Photovoltaics.** Wikipedia. Pridobljeno 28.3.2012 s svetovnega spleta:

<http://en.wikipedia.org/wiki/Photovoltaics>

**Photovoltaic History.** Sunlight Electric. Pridobljeno 12.4.2011 s svetovnega spleta:

<http://sunlightelectric.com/pvhistory.php>

**Photovoltaic Cell Conversion Efficiency.** U.S. Department of Energy. Pridobljeno 16.4.2012 s svetovnega spleta:

[http://www.eere.energy.gov/basics/renewable\\_energy/pv\\_cell\\_conversion\\_efficiency.html](http://www.eere.energy.gov/basics/renewable_energy/pv_cell_conversion_efficiency.html)

**PV Education.** Pridobljeno 16.4.2012 s svetovnega spleta:

<http://www.pveducation.org/pvedrom>

**Theory of Solar Cells.** Wikipedia. Pridobljeno 12.3.2012 s svetovnega spleta:

[http://en.wikipedia.org/wiki/Theory\\_of\\_solar\\_cells](http://en.wikipedia.org/wiki/Theory_of_solar_cells)

Slikovni material pri katerem vir ni izrecno naveden je avtorsko delo Mateja Boltarja.