

# Recikliranje solarnih panela

---

**Kraljević, Mihael**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2015**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:945637>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-23**

*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU  
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET**

**Diplomski studij**

**RECIKLIRANJE SOLARNIH PANELA**

**Diplomski rad**

**Mihael Kraljević**

**Osijek, 2015.**

# SADRŽAJ

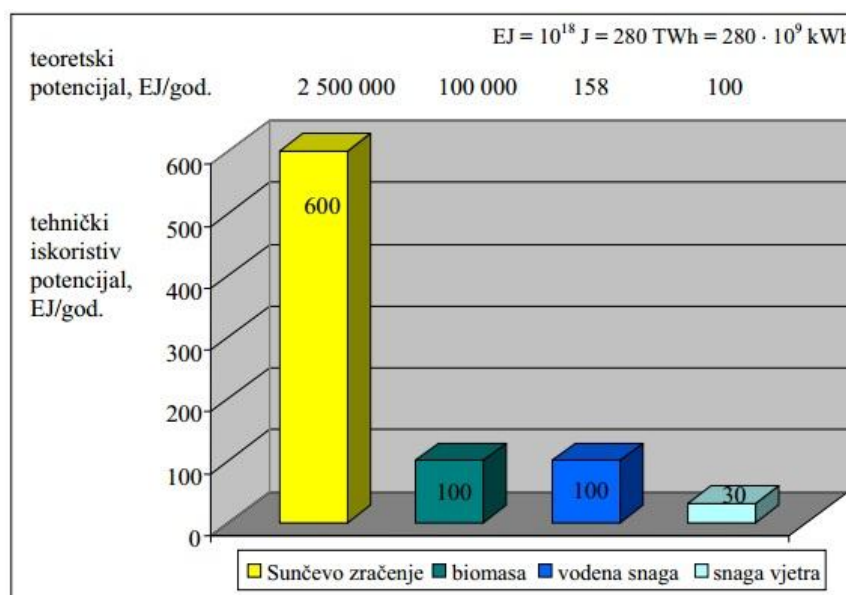
1. UVOD .....	1
1.1. Zadatak rada .....	3
2. SOLARNI PANELI .....	4
2.1. Općenito o solarnim panelima .....	4
2.2. Povijesni pregled primjene solarnih panela .....	5
2.3. Fizikalna osnova solarnih panela .....	6
3. IZRADA SOLARNIH PANELA .....	11
3.1. Materijali za izradu solarnih panela .....	11
3.1.1. Silicij .....	11
3.1.2. Galij arsenid (GaAs) .....	12
3.1.3. Kadmij telurid (CdTe) .....	12
3.2. Tipovi solarinih panela .....	12
3.2.1. Monokristalni silicijski paneli .....	12
3.2.2. Polikristalni silicijski paneli .....	14
3.2.3. Tankoslojni fotonaponski paneli .....	16
4. RECIKLIRANJE SOLARNIH PANELA .....	20
4.1. Recikliranje solarnih panela na bazi silicija .....	27
4.2. Recikliranje solarnih panela na bazi kadmij telura .....	31
4.3. Troškovi i ostvarivanje dobit nakon recikliranja solarnih panela .....	33
5. ZAKLJUČAK .....	37
6. LITERATURA .....	38
SAŽETAK .....	41
ABSTRACT .....	41
ŽIVOTOPIS .....	42

## 1. UVOD

Sunce kao izvor elektromagnetskog zračenja koje prolazi kroz atmosferu, također je i neiscrpan obnovljivi izvor energije. Pruža energiju neophodnu za održavanje života, pokreće atmosferu i različitim sustavima gibanja oblikuje vrijeme i klimu. Danas se smatra da je Sunce nastalo od nakupine međuzvezdanog plina koja se počela sažimati zbog gravitacijskog privlačenja. Uzmemo li u obzir da Sunce samo u jednoj sekundi oslobodi više energije nego što je naša civilizacija tijekom svojeg razvoja iskoristila, važnost istraživanja energije Sunca i pretvorbe energije sunčeva zračenja u korisne oblike energije poprima sasvim novu dimenziju s velikom mogućnošću rješavanja problema energetske krize, koja je u svijetu sve prisutnija [1].

Tehnički potencijal energije sunčeva zračenja koji ozrači neku građevinu (zgradu), nekoliko je puta veći od potreba takve zgrade za energijom. Na tržištu već postoje tehnički uređaji i oprema kvalitetne tehničke razine, s prihvatljivom cijenom, za pretvorbu energije sunčeva zračenja u električnu, toplinsku ili u energiju hlađenja. Time je postignuta udobnost boravka u takvoj zgradi, smanjen je uvoz energenata, osigurana je sigurna opskrba i znatno je smanjen negativan utjecaj na okoliš iz energetskog sektora.

Teoretski potencijal energije sunčeva zračenja daleko je veći od ostalih obnovljivih izvora energije, kao na primjer biomase, snaga vode i snage vjetra, koji su također samo posljedica ili neki oblik pretvorbe sunčeve energije. Tehnički iskoristiv potencijal sunčeve energije, dakle onaj koji se danas tehnički i tehnološki može iskoristiti za pretvorbu energije sunčeva zračenja u električnu, toplinsku ili energiju hlađenja, još je uvijek veći od ukupne svjetske potrošnje energije. (Slika 1.1.)



**Slika 1.1.** Teoretski i tehnički potencijal obnovljivih izvora energije [1]

Hrvatska je zemlja raznolikog prirodnog bogatstva i ljepote, još uvijek čistog okoliša, čiste vode i zraka te čistog mora, s 1185 velikih i malih otoka. Stoga opskrba električnom energijom pomoću fotonaponskih panela i toplinske energije za grijanje i pripremu potrošne tople vode pomoću solarnih toplinskih sustava, nema alternative, poglavito za male i velike otoke, priobalje, zaobalje, a i cijelu Hrvatsku [1].

Fotonaponski moduli donose električnu energiju u ruralna područja gdje ne postoji električna mreža te na taj način povećavaju samu životnu vrijednost tih područja. Fotonaponski sustavi će nastaviti u budućnosti razvoj u smjeru ključnog čimbenika u proizvodnji električne energije za kućanstva i zgradarstvo općenito. Na kraju životnog vijeka fotonaponski moduli se mogu gotovo u potpunosti reciklirati, a to će biti objašnjeno u narednim poglavljima. Od početka uspostave sustava poticanja (1. srpanj 2007.) do 31. prosinca 2013. godine 676 ugovora je stupilo na snagu, što znači da je za 676 povlaštenih proizvođača Hrvatski operator tržište energije (HROTE) isplaćivao poticajnu cijenu za proizvedenu električnu energiju: prema Tarifnom sustavu (NN broj: 33/07) za 178 povlaštena proizvođača i prema Tarifnom sustavu (NN broj: 63/12, 121/12 i 144/12) za 498 povlaštena proizvođača.

**Tablica 1.** Broj i ukupna instalirana snaga svih aktivnih ugovora o otkupu električne energije po tehnologijama do 31.12.2013. [2]

<i>Tehnologija</i>	<i>Broj</i>	<i>Instalirana snaga [kW]</i>
<b>Sunčane elektrane</b>	639	19,496
<b>Hidroelektrane</b>	4	1,340
<b>Elektrane na biomasu</b>	3	6,690
<b>Elektrane na bioplin</b>	11	11,135
<b>Vjetroelektrane</b>	14	254,250
<b>Elektrane na deponijski plin</b>	1	2,500
<b>Kogeneracijska postrojenja</b>	4	11,493
<b>Ukupno:</b>	676	306,904

Od postrojenja prikazanih u tablici 1. 672 postrojenja koriste obnovljive izvore energije ukupno instalirane snage 295,411 kW dok su 4 kogeneracijska postrojenja ukupne instalirane snage 11,493 kW. Prema tablici 1. to je ukupno 306,904 kW instalirane snage u elektranama koje koriste obnovljive izvore energije i kogeneracije u sustavu poticaja i koje su priključene na hrvatski elektroenergetski sustav na dan 31. prosinca 2013. godine [2].

## **1.1. Zadatak rada**

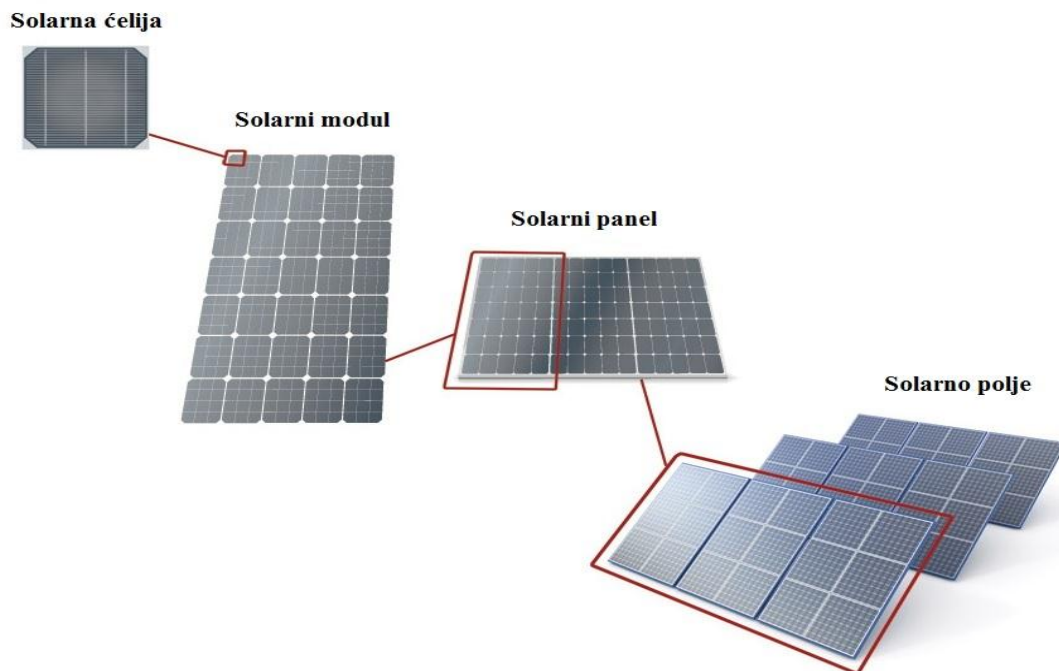
Zadatak ovog diplomskog rada je opisati strukturu materijala kod solarnih panela, opisati temeljne pojmove koji se odnose na solarne fotonaponske panele, njihov princip rada, te vrste solarnih fotonaponskih panela i mogućnosti njihovog recikliranja.

## 2. SOLARNI PANELI

### 2.1. Općenito o solarnim panelima

Optimalni način iskorištavanja solarne energije svakako je grijanje vode ili neke druge tekućine za upotrebu u domaćinstvima. Elementi koji iskorištavaju energiju Sunca za grijanje vode nazivaju se solarni kolektori i uobičajeno se postavljaju na krovove kuća i zgrada. Solarni kolektori prikupljaju sunčevu energiju i predaju je radnom mediju koji struji u zatvorenom krugu između kolektora i spremnika tople vode te koji preko izmjenjivača predaje prikupljenu toplinsku energiju.

Drugi način iskorištavanja energije Sunca je koncentriranje solarne energije pomoću sistema zrcala i stvaranje velike količine toplinske energije koja se kasnije u standardnim generatorima pretvara u električnu energiju. Ovakva postrojenja mogu biti vrlo velika i uobičajeno se grade u pustinjama, a služe za komercijalnu proizvodnju električne energije. Solarni fotonaponski paneli su treći i najpoželjniji način iskorištavanja energije Sunca, ali zbog slabe efikasnosti i visoke cijene trenutno se ne koriste u velikoj mjeri. Solarna fotonaponska ćelija (slika 2.1.) je poluvodički uređaj koji pretvara sunčevu energiju izravno u električnu pomoću fotoelektričnog efekta. Grupe ćelija tvore solarne module, grupe solarnih modula tvore solarne panele, a grupe solarnih panela tvore solarno polje [3].



*Slika 2.1.* Prikaz solarne ćelije [4]

Solarni paneli direktno pretvaraju solarnu energiju u električnu energiju. Solarni paneli uobičajeno se koriste tamo gdje nije moguće dovesti neki drugi izvor energije, primjerice na

satelitima, na znakovima uz ceste i slično. Dodatno se koriste za napajanje energijom malih potrošača kao što su džepna računala.

## 2.2. Povijesni pregled primjene solarnih panela

Prvi solarni (silicijev) panel otkrio je 1941. godine Russell Ohl, no njegova djelotvornost pretvorbe bila je ispod 1 %. Skupina istraživača u Bell Laboratories u New Yorku (Pearson, Fuller i Chapin) 1954. godine izradila je silicijev solarni panel s djelotvornošću od 6 % i prvi solarni modul pod imenom Bellova solarna baterija. Kako je proizvodna cijena prvih solarnih panela bila vrlo visoka, oni svoju prvu komercijalnu primjenu 1958. godine nisu našli na Zemlji, nego u svemirskim istraživanjima na satelitima, (slika 2.2.).



*Slika 2.2.* Prikaz solarnih panela na svemirskom satelitu [5]

Tu je njihova cijena bila prihvatljiva, u odnosu na sve ostale visoke troškove. Tad se prvi put uočilo da ne postoje neograničene zalihe fosilnih goriva te da treba potražiti i razviti nove, obnovljive energetske izvore.

Unatoč znatnijim ulaganjima u istraživanje i razvoj solarne fotonaponske tehnologije u posljednjih desetak godina, danas je cijena solarnih ćelija, odnosno fotonaponskih sustava, i dalje visoka i oni su komercijalno konkurentni drugim uobičajenim izvorima električne struje samo u određenim područjima primjene, tj. tamo gdje nema u blizini električne mreže. Međutim, vodeći svjetski energetičari, a i najveće naftne tvrtke, procijenili su da će upravo fotonaponska tehnologija u 21. stoljeću dominirati u zadovoljavanju potreba za električnom energijom, zbog opadanja raspoloživih zaliha konvencionalnih goriva.



U posljednjih nekoliko godina svjedoci smo dosad nezapamćenog godišnjeg porasta u proizvodnji solarnih ćelija i modula od preko 60 %, a jedinični kapaciteti pojedinih novosagrađenih proizvodnih pogona već prelaze 50 MW. U prijelaznom razdoblju od desetak godina otvara se novo tržište za fotonaponske sustave u građevinarstvu, gdje oni, kao građevni elementi, mogu nadomjestiti klasične krovove i fasade u novim zgradama (tzv. BIPV) ili poboljšati toplinsku izolaciju na postojećim objektima, generirajući pritom električnu energiju za potrošnju na licu mjesta ili za isporuku električnoj mreži [6]. U pojedinim zemljama, a i u našoj, ozakonjene su stimulatивne financijske mjere za otkup u mrežu tako proizvedene električne energije, što omogućuje snažan poticaj za sve veće korištenje i primjenu novih obnovljivih izvora energije.

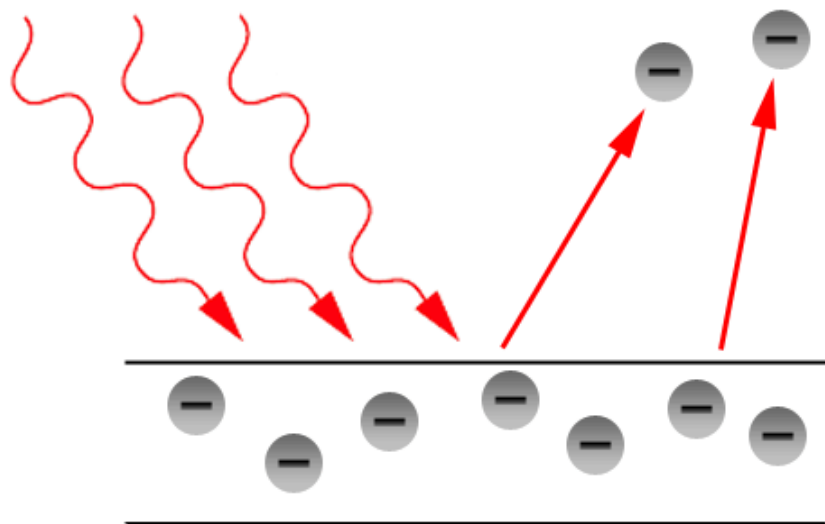
### **2.3. Fizikalna osnova solarnih panela**

Fotoelektrični efekt je bio zagonetka u fizici do početka 20. stoljeća, a njegovo otkriće je odigralo ključnu ulogu u razvoju moderne fizike jer je nedvosmisleno pokazao kvantnu prirodu procesa u mikrosvijetu. Heinrich Rudolf Hertz je 1887. godine otkrio, ali ne i objasnio fotoelektrični efekt. Fotoelektrični efekt otkrio je francuski fizičar Alexandre-Edmond Becquerel 1839. godine.

Nakon Becquerelova otkrića prošlo je više od 40 godina da bi tek 1883. godine Charles Fritts načinio prvu pravu solarnu ćeliju deponirajući na poluvodički selen tanki sloj zlata. Tako je ostvario potencijalnu barijeru na kontaktu metal-poluvodič.

Fotoelektrični efekt je pojava kada svjetlost određene valne dužine padne na površinu metala (npr. cinka, natrija ili bakra) i iz njega izbija elektrone (slika 2.3.). Najvažnija osobina fotoelektričnog efekta je povezana s ovisnošću fotoelektričnog efekta o valnim dužinama i intenzitetu svjetlosti kojom se osvjetljava metalna ploča. Ukoliko je valna duljina manja od neke granice (koja ovisi o vrsti tvari), intenzitet efekta (količina el. naboja koji se pojavljuje na ploči) raste s povećanjem intenziteta.

Međutim, ako valna dužina svjetlosti prelazi tu granicu, fotoelektrični efekt nestaje, bez obzira koliko intenzivna bila svjetlost. Druga opažena osobina efekta je vezana za gibanje električnih naboja koji napuštaju metalnu ploču. To gibanje se može zaustaviti ako se električni naboji koče vanjskim električnim poljem.



*Slika 2.3.* Prikaz fotoelektričnog efekta [7]

Solarne ćelije su zasnovane na fotoelektričnom efektu. Sastoje od dva različito nabijena poluvodiča P i N tipa između kojih, kada su izloženi Sunčevom svjetlu, pojavljuje se elektromotorna sila, tj. napon. Solarna ćelija postaje poluvodička dioda, tj. PN-spoj, i ponaša se kao ispravljački uređaj koji propušta struju samo u jednom smjeru. Solarna energija stiže na Zemlju u obliku fotona. Prilikom pada na površinu solarne ćelije ti fotoni predaju svoju energiju ćeliji i na taj način izbijaju negativno nabijene elektrone iz atoma i nastaju parovi elektron-šupljina. Ako apsorpcija nastane daleko od PN-spoja, nastali par ubrzo se rekombinira. Nastane li apsorpcija unutar, ili blizu PN-spoja, unutrašnje električno polje, koje postoji u osiromašenom području, odvaja nastali elektron i šupljinu. Elektron se giba prema N-strani, a šupljina prema P-strani. Zbog skupljanja elektrona i šupljina na odgovarajućim suprotnim stranama PN-spoja - dolazi do pojave elektromotorne sile na krajevima solarne ćelije. Kada se solarna ćelija osvjetli, kontakt na P-dijelu postaje pozitivan, a na N-dijelu negativan. Ako su kontakti ćelije spojeni s vanjskim trošilom, poteći će električna struja, a solarna ćelija postaje izvorom električne energije [7]. Princip rada fotonaponske ćelije prikazan je na slici 2.4.

Fotonaponski sustavi koriste ćelije za pretvorbu sunčevog zračenja u električnu energiju. Pretvorba sunčeve energije u električnu u fotonaponskim instalacijama je najprepoznatljiviji način korištenja sunčeve energije. Prema kvantnoj fizici svjetlost ima dvojni karakter. Svjetlost je čestica i val. Čestice svjetlosti nazivaju se fotoni. Fotoni su čestice bez mase i gibaju se

brzinom svjetlosti. Energija fotona ovisi o njegovoj valnoj duljini odnosno o frekvenciji, a možemo je izračunati Einsteinovim zakonom koji glasi:

$$E = h \cdot \nu \quad (2-1)$$

gdje je:

$E$  – energija fotona (eV)

$h$  – Planckova konstanta, glasi  $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$  Js

$\nu$  – frekvencija fotona (Hz)

U metalima i općenito u materiji, elektroni mogu postojati kao valentni ili slobodni. Valentni elektroni vezani su uz atom, dok se slobodni elektroni mogu slobodno gibati. Da bi od valentnog elektrona nastao slobodni, on mora dobiti energiju koja je veća ili jednaka energiji vezanja. Energija vezanja predstavlja energiju kojom je elektron vezan za atom u nekoj od atomskih veza.

U slučaju fotoelektričnog efekta elektron potrebnu energiju dobiva od sudara s fotonom. Dio energije fotona troši se da bi se elektron oslobodio od utjecaja atoma za koji je vezan, a preostali dio energije pretvara se u kinetičku energiju, sada već slobodnog elektrona. Slobodni elektroni dobiveni fotoelektričnim efektom nazivaju se još i fotoelektroni. Energija koja je potrebna da se valentni elektron oslobodi utjecaja atoma naziva se rad ( $W_i$ ), i ovisi o vrsti materijala u kojem se dogodio fotoelektrični efekt. Jednadžba koja opisuje ovaj proces glasi:

$$h \cdot \nu = W_i + E_{kin} \quad (2-2)$$

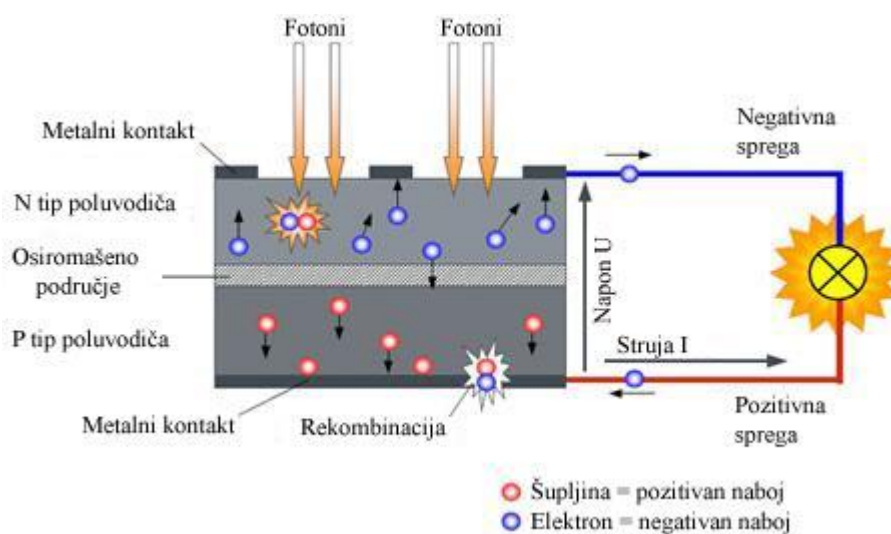
gdje je:

$h \cdot \nu$  – energija fotona (eV)

$W_i$  – rad (J)

$E_{kin}$  – kinetička energija emitiranog fotona (J)

Iz gornje jednadžbe vidljivo je da se elektron neće moći osloboditi ako je energija fotona manja od rada izlaza. Fotoelektrična konverzija u PN spoju. PN spoj (dioda) je granica između dva različito dopirana sloja poluvodiča; jedan sloj je P-tipa (višak šupljina), a drugi N-tipa (višak elektrona). Na granici između p i n područja javlja se spontano električno polje, koje djeluje na generirane elektrone i šupljine i određuje smjer struje.



*Slika 2.4.* Princip rada fotonaponske ćelije [8]

Da bi dobili električnu energiju fotoelektričnim efektom trebamo imati usmjereno gibanje fotoelektrona, odnosno struju. Sve nabijene čestice, a tako i fotoelektroni gibaju se usmjereno pod utjecajem električnog polja. Električno polje koje je ugrađeno u sam materijal nalazi se u poluvodičima i to u osiromašenom području PN spoja (diode). Za poluvodiče je naglašeno da uz slobodne elektrone u njima postoje i šupljine kao nosioci naboja koje su svojevrsan nusprodukt pri nastanku slobodnih elektrona.

Šupljina nastaje svaki put kada od valentnog elektrona nastane slobodni elektron i taj proces naziva se generacija, dok se obrnuti proces, kada slobodni elektron popuni prazno mjesto - šupljinu, zove rekombinacija. Ako parovi elektron-šupljina nastanu daleko od osiromašenog područja moguće je da rekombiniraju, prije nego što ih razdvoji električno polje. Parovi koji nastanu uz osiromašeno područje ili u njemu bivaju privučeni, i to šupljine prema P strani poluvodiča, te elektroni prema N strani poluvodiča.

Zbog toga se fotoelektroni i šupljine u poluvodičima, nagomilavaju na suprotnim krajevima i na taj način stvaraju elektromotornu silu. Ako na takav sustav spojimo trošilo, poteći će struja i dobiti ćemo električnu energiju. Na ovakav način sunčane ćelije proizvode napon oko 0,5 do 0,7 V uz gustoću struje od oko nekoliko desetaka mA/cm<sup>2</sup> ovisno o snazi sunčevog zračenja, ali i o spektru zračenja [9].

Korisnost fotonaponske sunčeve ćelije definira se kao omjer električne snage koju daje fotonaponska sunčeva ćelija i snage sunčevog zračenja. Matematički se to može formulirati relacijom:

$$\eta = \frac{P_{el}}{P_{sol}} = \frac{U \cdot I}{E \cdot A} \quad (2-3)$$

gdje je:

$P_{el}$  - izlazna električna snaga (W)

$P_{sol}$  – snaga Sunčevog zračenja (W/m<sup>2</sup>)

$U$  – efektivna vrijednost izlaznog napona (V)

$I$  – efektivna vrijednost izlazne struje (A)

$E$  – specifična snaga zračenja (npr. W/m<sup>2</sup>)

$A$  – površina fotonaponske ćelije (m<sup>2</sup>)

Korisnost fotonaponskih sunčevih ćelija kreće se od svega nekoliko postotaka do četrdesetak posto. Ostala energija koja se ne pretvori u električnu uglavnom se pretvara u toplinsku i na taj način grije ćeliju. Općenito porast temperature solarne ćelije utječe na smanjene korisnosti fotonaponske ćelije. Standardni izračuni energetske učinkovitosti za sunčeve fotonaponske ćelije predstavljaju se na sljedeći način: Energetska učinkovitost pretvorbe kod sunčeve fotonaponske ćelije ( $\eta$  "eta"), je postotak energije od upadne svjetlosti koja zapravo završi kao električna energija. To se izračunava u točki najveće snage,  $P_m$ , podijeljeno sa zračenjem ulaznog svjetla ( $E$ , u W/m<sup>2</sup>), sve pod standardnim uvjetima testiranja (STC) i površinom fotonaponskih sunčevih ćelija ( $A_C$  u m<sup>2</sup>) [9].

$$\eta = \frac{P_m}{E \cdot A_C} \quad (2-4)$$

STC (standart test conditions) prema kojem je referentno Sunčevo zračenje 1000 W/m<sup>2</sup>, spektralna distribucija 1.5, a temperatura ćelije 25 °C [25].

### 3. IZRADA SOLARNIH PANELA

#### 3.1. Materijali za izradu solarnih panela

Poluvodiči s energetskeg procjepom između 1 i 1,5 eV imaju najveći potencijal za izgradnju učinkovite ćelije. Različiti materijali imaju različite učinkovitosti i cijenu. Materijal koji se najčešće koristi za izradu fotonaponske solarne ćelije je kristalni silicij koji se još dijeli prema vrsti kristala i veličini kristala na: monokristalni silicij, polikristalni silicij, trakasti silicij. Drugi materijali koji se koriste za izradu ćelija su: kadmij telurid i bakar-indij-selen. Mnoge trenutno dostupne solarne ćelije izrađene su od komada materijala rezanog u pločice debljine između 180 do 240 mikrometara koje se tada obrađuju poput ostalih poluvodiča. Drugi materijali su napravljeni kao slojevi tankog filma, organski pigmenti ili organski polimeri koji se deponiraju na potporne supstrate. Treća grupa je napravljena od nanokristala i korištena kao kvantne točke.

##### 3.1.1. Silicij

Silicij je kemijski element koji se u periodnom sustavu elemenata označava simbolom Si, atomski (redni) broj mu je 14, dok mu atomska masa iznosi 28,0855. Silicij je četvervalentni prijelazni metal, znatno manje reaktivan od ugljika u istoj skupini. Drugi je najzastupljeniji element na Zemlji (25,7 % zemljine mase, iza kisika), te se najčešće pronalazi u obliku kremena, odnosno silicijevog dioksida. Silicij ima važnu primjenu u industriji: u elementarnom stanju se koristi kao poluvodič u različitim elektroničkim napravama, integriranim krugovima i mikročipovima.

Budući da ostaje poluvodič na znatno višoj temperaturi od germanija, njegova je uloga u elektronici nezamjenjiva. Silicij se u prirodi ne nalazi u elementarnom stanju, već u obliku silicijeva (IV) oksida (kvarc) i mnogobrojnih silikata. Čisti silicij ima dijamentnu strukturu, tvrd je i krt. Ima visoko talište i vrelište [10].

Poluvodič je i vodljivost mu se povećava s porastom temperature, ali i prisutnošću malih količina drugih atoma u njegovoj strukturi. Tada govorimo o poluvodičima s nečistoćama (dopirani poluvodiči). Ako su nečistoće atomi elemenata 13. skupine, radi se o poluvodičima p-tipa, a ako su to atomi 15. skupine, radi se o poluvodičima n-tipa. Atomi nečistoća zamjenjuju u strukturi atome silicija, a sama se struktura pri tome ne mijenja. Budući da atomi nečistoća i atomi silicija imaju različiti broj valentnih elektrona, vodljivost se znatno povećava. Silicij ne reagira s kiselinama, a s lužinama tvori silikate oslobađajući vodik.

### 3.1.2. Galij arsenid (GaAs)

Galij arsenid (GaAs) je poluvodič pogodan za upotrebu u višeslojnim i visoko učinkovitim solarnim ćelijama. Širina vrpce solarnih ćelija je pogodna za jednoslojne solarne ćelije. Ima visoku apsorpciju pa je potrebna debljina od samo nekoliko mikrona da bi apsorbirao sunčeve zrake. Zbog visoke cijene koristi se u svemirskim programima i u sustavima s koncentriranim zračenjem gdje se štedi na ćelijama. Projekti koncentriranog zračenja su još u fazi istraživanja. Galij indijum fosfidna/galij arsenid (GaInP)/GaAs dvoslojna ćelija ima iskoristivost od 30 % i koristi se u komercijalne svrhe za svemirske aplikacije. Ovaj tip ćelije može pretvoriti  $1000 \text{ W/m}^2$  sunčevog zračenja u 300 W električne energije sa površinom ćelija od  $1 \text{ m}^2$  [11].

### 3.1.3. Kadmij telurid (CdTe)

Kadmij telurid je spoj elementa: metala kadmija i polumetala telurija. Pogodan za upotrebu u tankim fotonaponskim modulima zbog fizikalnih svojstava i jeftinih tehnologija izrade. Usprkos navedenim prednostima zbog kadmijeve otrovnosti i sumnje na kancerogenost nije u širokoj upotrebi. Ovaj tip ćelije može pretvoriti  $1000 \text{ W/m}^2$  sunčevog zračenja u 160 W električne energije sa površinom ćelija od  $1 \text{ m}^2$  u laboratorijskim uvjetima [7].

## 3.2. Tipovi solarih panela

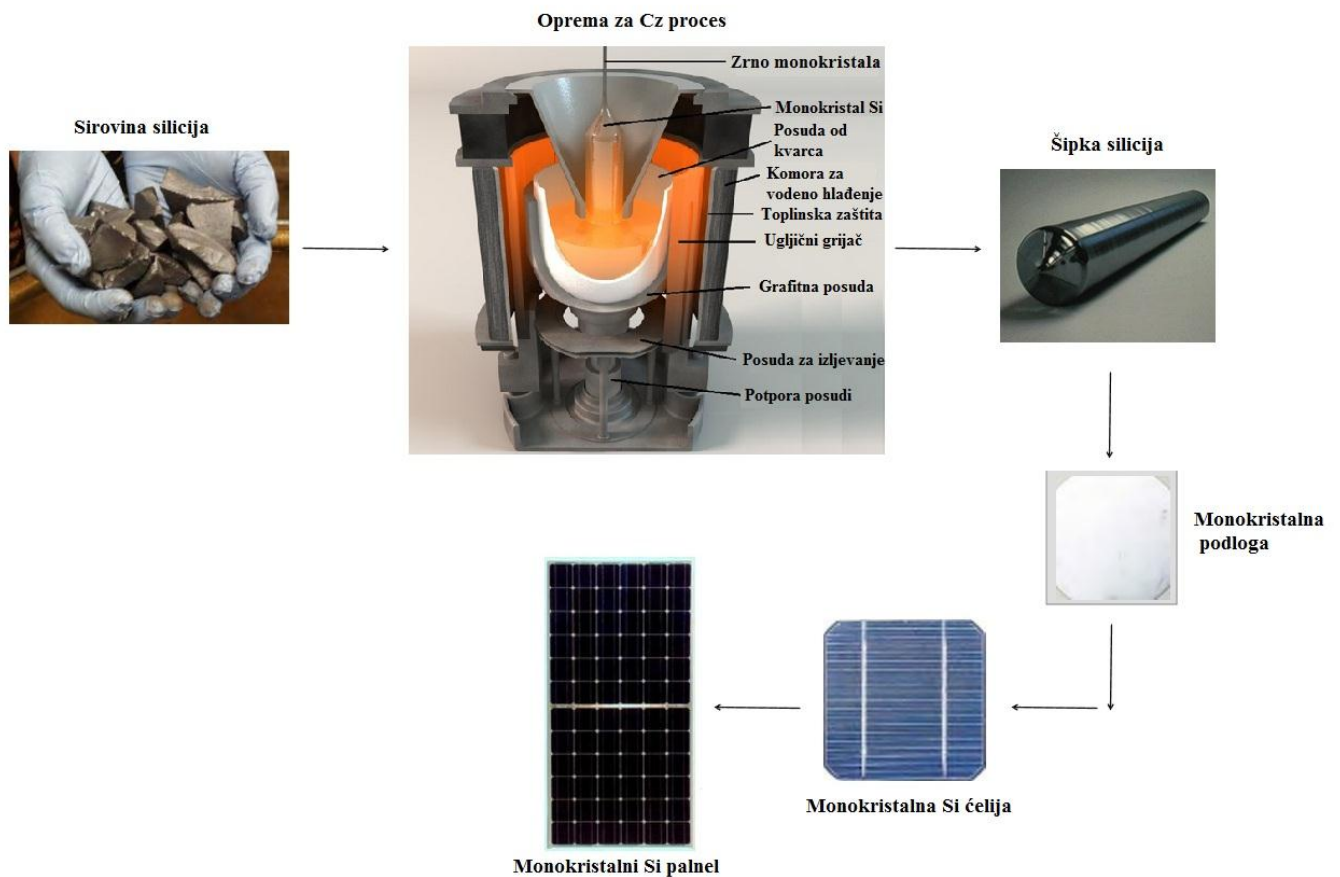
### 3.2.1. Monokristalni silicijski paneli

Prvi silicijski solarni panel izrađen je od monokristala silicija dobivenog Czochralskijevim procesom sredinom prošlog stoljeća. Monokristalni silicij (mono-Si) jedan je od glavnih materijal koji se koriste prilikom izrade solarne panela, također se koristi i u elektroničkoj industriji. Učinkovitost monokristalnih silicijskih fotonaponskih panela iznosi 13 do 19 % [30]. Kristalna rešetka mono-Si građena je tako da među zrcima kristala ne postoji granica između krajeva. Mono-Si može se dobiti Czochralskijevim (Cz) procesom koji je dobio ime po poljskom znanstveniku Janu Czochralski, koji je 1916. otkrio ovaj proces promatrajući kristalizaciju metala [12].

Oprema za Cz proces se sastoji od vakuumske komore u kojoj se u posudi za taljenje tali monokristalni ili polikristalni silicij. Zatim se zrno kristala uranja u talinu i polako diže prema površini taline dok se pritom zrno kristalizira. Prilikom izvlačenja zrna kristala treba voditi računa da se izvlači okomito na površinu. Za male mase 1 do 2 kg koriste se visoko vakuumski

uvjeti, dok je danas za mase 100 do 200 kg izrađena posebna oprema za izvlačenje pod protokom plina argona.

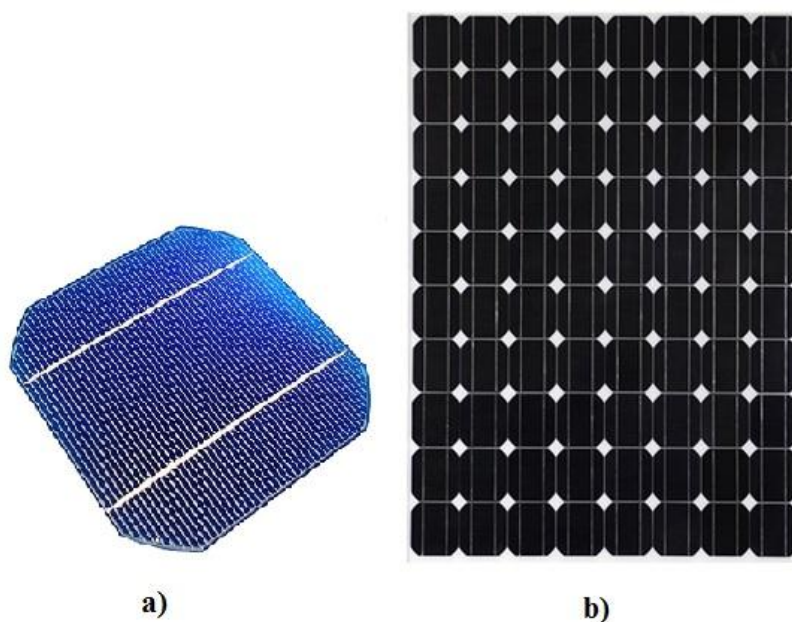
U fotonaponskoj industriji tlak argona postavlja se na 5 do 50 mbar, dok se u elektronici koristi i atmosferski tlak. Nakon stabiliziranja temperature zrno se spušta u talinu i standardnom brzinom izvlačenja zrna monokristala dosežu se željeni promjeri 0,5 do 1,2 mm/min. Promjeri kristala za uporabu u fotonaponskim ćelijama iznose između 200 i 300 mm. Razlog tako velikog promjera je struja kratkog spoja koja može doseći 6 A po ćeliji. Promjer kristala na kraju postaje konusan zbog povećanja brzine izvlačenja i postepenog smanjenja promjera. U 80 % slučajeva koristi se Cz proces prilikom kojega se vrši dopiranje borom i fosforom, a duljina kristala na kraju procesa iznosi između 200 i 400 cm [13].



**Slika 3.1.** Prikaz Czochralskijevog procesa proizvodnje mono-Si panela [14]



Na slici 3.2. prikazana je monokristalna silicijeva fotonaponska ćelija (a) i panel (b).



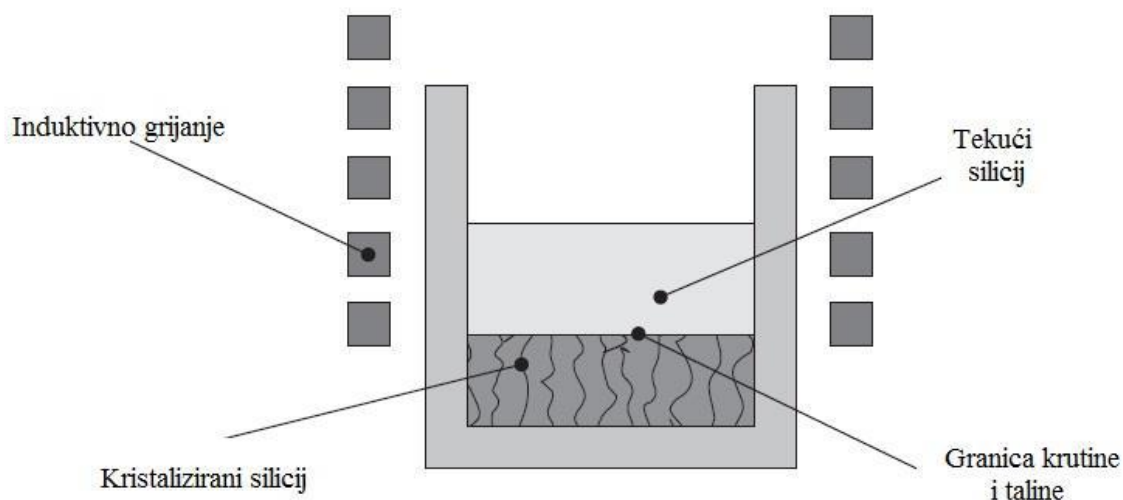
*Slika 3.2.* Monokristalna silicijeva ćelija (a) i panel (b) [15]

### 3.2.2. Polikristalni silicijski paneli

Polikristalni silicij kao i monokristalni služi kao osnova fotonaponske tehnologije. U odnosu na monokristalni silicij, polikristalni silicij ima nižu cijenu i ploču kvadratnog oblika koja je kod monokristalnog silicija zaobljena. Učinkovitost polikristalnih silicijskih fotonaponskih panela iznosi 11 do 15 % [30].

Primjena polikristalnog silicija većinom je u fotonaponskoj industriji, dok se jedan manji dio koristi u elektronici zbog toga što se prilikom izrade javljaju nepravilnosti u strukturi. Postoji dva različita načina izrade polikristalnog silicija, a to su proces blok lijevanja i Bridgmanov proces koji je opisan u nastavku.

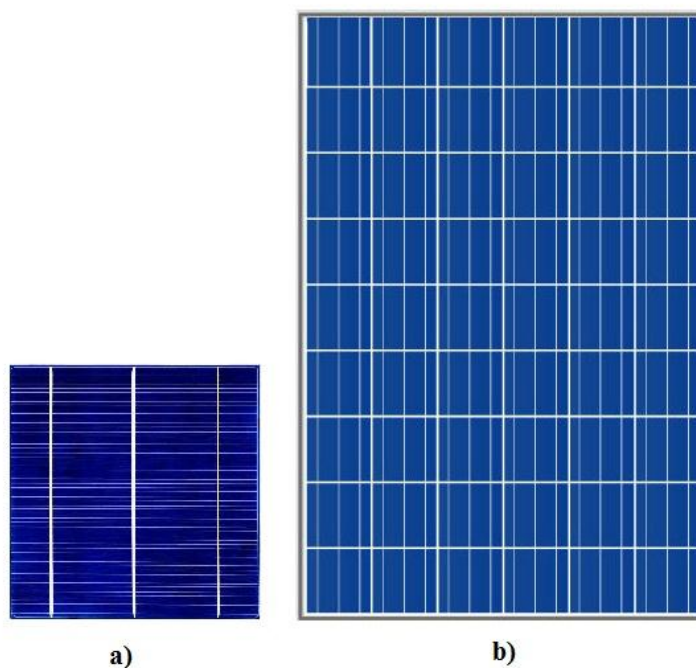
U Bridgmanov procesu posuda od kvarca obložena je silicijevim nitridom ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) koji služi kao sloj za sprječavanje ljepljenja za posudu (slika 3.3.). Nakon taljenja silicija dobiva se polikristalna šipka.



**Slika 3.3.** Bridgmanov proces proizvodnje polikristalnog silicija za fotonaponske panele [13]

Izmicanjem posude s izvora topline u kojoj se nalazi talina silicija dolazi do smanjenja temperature ispod točke taljenja ( $1410\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) i u najdonjem dijelu posude dolazi do kristalizacije. Prosječna brzina kristalizacije za Bridgmanovu proces je oko  $1,5\text{ cm/h}$ , veće brzine mogu izazvati puknuće šipke [13].

Prednosti polikristalnog silicija za izradu fotonaponskih panela u odnosu na monokristalni je manja cijena i nove tehnologije izrade panela. Na slici 3.4. prikazana je polikristalna silicijeva fotonaponska ćelija (a) i panel (b).



**Slika 3.4.** Polikristalna silicijeva ćelija (a) i panel (b) [16]

### 3.2.3. Tankoslojni fotonaponski paneli

Tankoslojni fotonaponski paneli sastavljaju se od fotonaponskih ćelija u kojima se nalaze uzastopni slojevi atoma ili molekula. Prilikom izrade tankoslojnih fotonaponskih ćelija koristi se puno manje materijala za izradu jer im se debljina kreće od 1 do 10  $\mu\text{m}$  dok su silicijske fotonaponske ćelije debljine 100 do 300  $\mu\text{m}$ . Tankoslojne fotonaponske ćelije zbog svoje fleksibilnosti i automatiziranog načina izrade mogu se polagati na znatno jeftinije materijale kao što su: plastika, staklo...

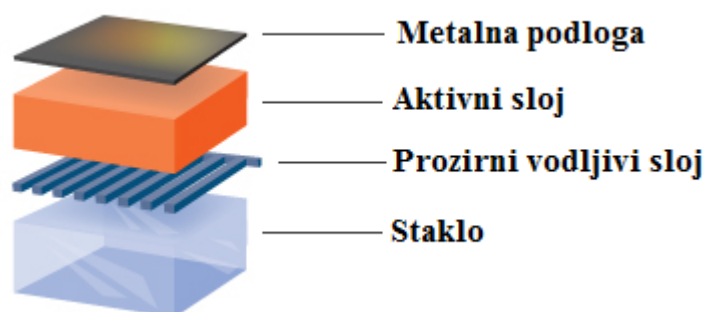
Cijena same izrade tankoslojnih fotonaponskih panela znatno je niža u odnosu na izradu monokristalnih i polikristalnih silicijskih panela pa bi u budućnosti mogli imati značajnu ulogu na tržištu fotonaponskih sustava.

Tankoslojne fotonaponske panele možemo podijeliti na sljedeće tipove:

- ***Tankoslojni amorfni silicijski paneli***

U amorfnim materijalima, položaji atoma imaju nepravilnu strukturu, a amorfne tvari imaju manju gustoću od kristala. Za razliku od kristalnih silicijskih ćelija, silicij se ne primjenjuje u tekućem stanju, nego u stanju pare. Tako debljina sloja iznosi sto puta manje nego kod monokristalnih ili polikristalnih ćelija, stoga su troškovi proizvodnje manji u skladu sa cijenom materijala i moduli su pogodniji. Tankoslojne ćelije imaju velik koeficijent apsorpcije plavog svjetla, pa imaju prednost u oblačnom vremenu.

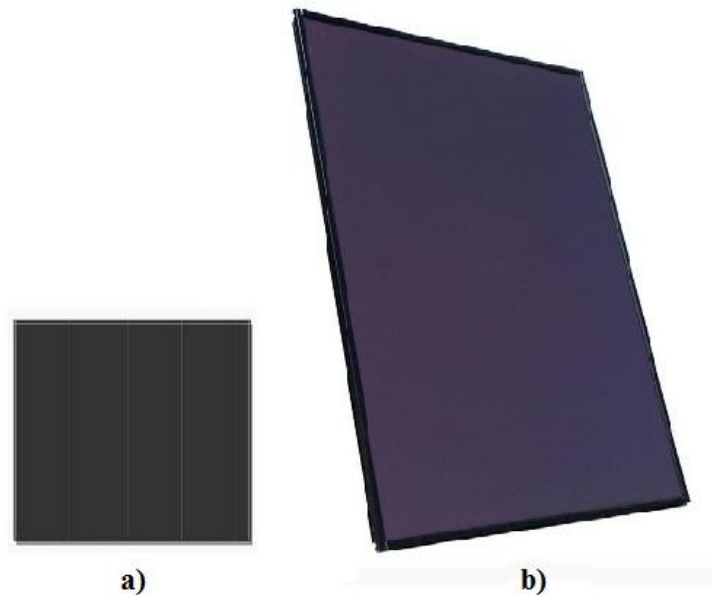
Ovaj tip ćelije pruža homogenu sliku, jer površina je jednobojna tamnosmeđa ili crna. Struktura amorfne silicijske fotonaponske ćelije od prikazana je na narednoj slici (slika 3.5.).



**Slika 3.5.** Struktura amorfne silicijske ćelije [17]

Nedostatak ćelija od amornog silicija je u njihovoj niskoj efikasnosti. Učinkovitost tankoslojnih silicijskih ćelija je oko 6 do 8 %, što je manje u usporedbi s drugim tipovima ćelija

[26]. Amorfni silicijski paneli prvenstveno se koriste kod sustava gdje je potrebna mala snaga (satovi, digitroni i sl.) ili kao element fasade. Na slici 3.6. prikazana je solarna fotonaponska ćelija od amornog silicija (a) i panel (b).



*Slika 3.6.* Fotonaponska ćelija od amornog silicija (a) i panel (b) [18]

- ***Tankoslojni kadmij telurid paneli***

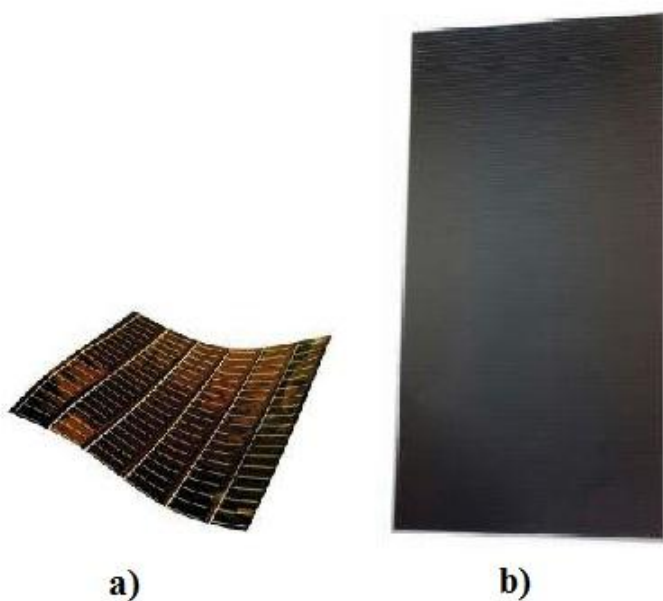
Kadmij telurid (CdTe) ćelije su osnova tehnologije koja ima veliki komercijalni utjecaj u proizvodnji energije iz obnovljivih izvora. Monolitski moduli velike površine predstavljaju dugoročnu održivost, konkurentne rezultate i sposobnost privlačenja kapitalnih investicija. CdTe ćelije su zbog svojih svojstava izvrstan materijal za zemaljsku pretvorbu fotonaponske energije.

CdTe je poluvodič skupine II<sup>B</sup> do VI<sup>A</sup> sa izravnom optičkom širinom pojasa koja skoro optimalno odgovara solarnom spektru za fotonaponsku pretvorbu energije. Širina pojasa ( $E_g = 1,5 \text{ eV}$ ) i visoki koeficijent apsorpcije ( $5 \cdot 10^5 \text{ cm}$ ) znače da se može očekivati visoki kvantni prinos u širokom rasponu valnih duljina, od ultraljubičastog svjetla do širine pojasa CdTe ( $\lambda \sim 825 \text{ nm}$ ). Fotoni kraće valne duljine, sa energijom manjom od  $E_g$ , se apsorbiraju blizu CdTe površine, što ovaj materijal čini dobrim za apsorpcijski sloj solarnih ćelija [13]. Na slici 3.7. prikazana je struktura CdTe ćelije.



**Slika 3.7.** Struktura CdTe ćelije [17]

Tvrtka *First Solar* 2014. godine postigla je rekordnu učinkovitost fotonaponskog panela od CdTe ćelija koja je iznosila 16,1 %. Budući da CdTe ima optimalnu širinu pojasa, očekuje se postizanje učinkovitosti u praksi u iznosu od 20 % [19]. Na slici 3.8. prikazana je solarna fotonaponska ćelija od CdTe materijala (a) i panel (b).



**Slika 3.8.** Fotonaponska ćelija od CdTe (a) i panel (b) [19]

Kadmij je teški metal koji nastaje kao nusproizvod rafiniranja cinka, te njegova proizvodnja ne ovisi o zahtjevima fotonaponskog tržišta. Fotonaponski paneli od CdTe pružaju korisnu i sigurnu upotrebu kadmija koji bi se u protivnom skladištio za buduću upotrebu ili odlagao kao otrovan otpad. Veliki porast u CdTe fotonaponskom sektoru potencijalno može smanjiti globalne emisije kadmija zamjenom ugljena i nafte kao materijala za proizvodnju energije.

- **Tankoslojni bakar indij galij dislenidni paneli**

Tankoslojni bakar indij galij dislenidni paneli  $\text{CuInGa(S,Se)}_2$  (CIGS) imaju najveću učinkovitost među materijalima tankog filma oko 24 %. Metode za izradu CIGS panela obuhvaćaju procese u vakuumu koji uključuju i umjetno isparavanje i raspršivanje. Jedna od proizvodnji isparavanjem je nanošenje bakra galija indija na metalnu podlogu te u daljnjem postupku nanosi sloj selenove prašine te nastaje CIGS ćelija. Druga proizvodnja izvodi se zajedničkim isparavanjem bakra, indija, galija i selena na vrućoj podlozi. Na slici 3.9. prikazana je struktura CIGS ćelije.



**Slika 3.9.** Struktura CIGS ćelije [17]

Sa CIGS tehnologijom došlo je do razvoja hibridnog modela fotonaponskog panela koji se ponaša skoro kao monokristalni, što znači da ima veću razinu učinkovitosti, ali zato se loše ponaša u visoko temperaturnim uvjetima kao i kristalni paneli. Hibridni paneli omogućuju 40 % veću stopu pretvorbe sunčeva zračenja nego obični tankoslojni moduli. Jedna od glavnih prednosti CIGS panela u odnosu na panele od kristalnog silicija je ta da zasjenjeni modul ne prestaje raditi već radi sa smanjenim kapacitetom.

## 4. RECIKLIRANJE SOLARNIH PANELA

Recikliranje predstavlja ponovnu uporabu iskorištenih, odnosno odbačenih materijala i proizvoda u istu ili različitu svrhu, s ili bez prethodne dorade [20]. Može se reći da je to oponašanje kruženja tvari u prirodi. Uloga recikliranja je poglavito ekonomska i ekološka, a osnovne prednosti su:

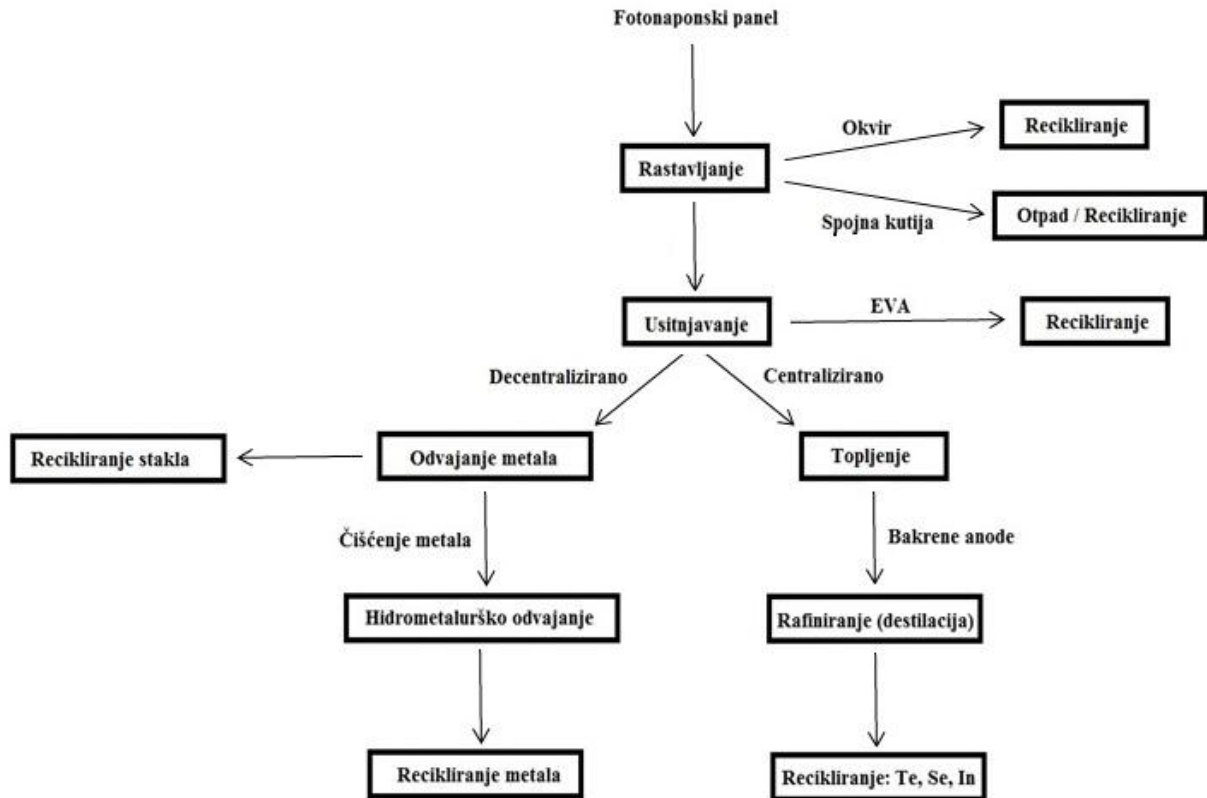
- Čuvanje zaliha neobnovljivih (primarnih) izvora sirovina preradom odbačenih materijala (tzv. sekundarnih sirovina)
- Ušteda energije pri dobivanju materijala iz sekundarnih sirovina. U odnosu na dobivanje iz primarnih sirovina uštede iznose od 60 % kod čelika, 85 % kod bakra, te 95 % kod aluminija
- Zaštita okoliša smanjivanjem količine deponiranog otpada u okolinu

Uporaba zanemarive količine štetnih i opasnih tvari kao i dugotrajan vijek uporabe glavni su temelji koji idu u prilog primjeni solarnih fotonaponskih sustava. Instalirani kapaciteti fotonaponskih sustava kontinuirano se povećavaju. Prvi slučajevi dotrajalih fotonaponskih panela već su tu, a u budućnosti očekujemo povećanje količine dotrajalih panela koje će biti potrebno prikladno reciklirati. Recikliranje osim smanjenja onečišćenja okoliša zbog smanjenja otpadnih materijala pridonosi i smanjenju potrošnje električne energije koja je potrebna u procesu dobivanja tih sirovina [21].

Fotonaponski paneli sadrže materijale koji se mogu reciklirati i upotrijebiti u proizvodnji novih fotonaponskih panela ili drugih novih proizvoda. Proces recikliranja za mono-kristalne i poli-kristalne fotonaponske panele, kao i za fotonaponske panele s tankim filmom usavršen je do te mjere da je primjeren za široku industrijsku uporabu. S recikliranjem pridobivamo materijale kao što su staklo, aluminij, kao i poluvodičke materijale. Recikliranje također smanjuje utjecaj na okoliš. Naravno, uz uštedu energije i resursa, također je važno spriječiti gubitak ili odbacivanje rijetkih ili otrovnih elemenata i spojeva.

Životni se vijek može podijeliti na tri glavne faze: proizvodnja, uporaba i kraj životnog vijeka. Životni vijek fotonaponskih modula može se smatrati ograničenim – oni se istroše tijekom razdoblja od 25 do 30 godina, a određeni elementi propadaju zbog zamora materijala. Najčešći oštećenja na fotonaponskim panelima su lom stakla, delaminacija, električni kvarovi i neadekvatna konstrukcijska tehnologija. Međutim, zbog procesa trajnog poboljšavanja, postojeći sustavi zamjenjuju se panelima koji su učinkovitiji. Posljedica toga je da distributeri demontiraju

fotonaponske panele i vraćaju ih proizvođačima na popravak ili recikliranje sirovina koje se potom ponovno iskorištavaju u proizvodnom procesu. Na slici 4.1. prikazan je postupak recikliranja fotonaponskih panela.



**Slika 4.1.** Postupak recikliranja fotonaponskih panela [23]

Fotonaponski paneli sadrže materijale kao što su: silicij, olovo, krom, čijim se recikliranje smanjuje potražnja za primarnim sirovim materijalima. U smislu gospodarenja otpadom potrebno je razlikovati tri vrste sustava. S obzirom na najviše korištene proizvodne tehnologije, fotonaponski moduli mogu se podijeliti u tri različita tipa: monokristalni, polikristalni i tankoslojni moduli.

U odnosu na kristalne module tankoslojni moduli manje su učinkoviti i kraće traju, stoga se kod njih problemi u pogledu gospodarenja otpadom pojavljuju češće nego kod drugih vrsta modula. Uporaba polikristalnih modula sve je raširenija, a njihovi troškovi proizvodnje značajno su pali u posljednjih tri do pet godina. U reciklažnom procesu moduli se najprije rastavljaju i usitnjavaju, nakon čega slijedi uklanjanje i odvajanje stakla i metalnih okvira čiji otpadni materijali se recikliraju i vraćaju u proizvodnju kao ponovno obradive komponente.



Uporaba silicija koji se nalazi između plastičnih folija u ćelijama provodi se termičkim procesom. Laminat se stavlja u fluidizirani sloj pijeska pri 450 °C, plastični se EVA (etil vinil acetat) slojevi skidaju spaljivanjem, a premazi se stružu sa silicijskih pločica. Spaljivanjem plastičnih slojeva dolazi do ispuštanja otrovnih plinova. Tako pročišćene i odvojene sirovine vraćaju se u proces proizvodnje drugih modula.

Prema ovom postupku, plastične folije se ne recikliraju, već se ponovno koriste u sadržaju materijala drugih komponenti. Moduli ostaju funkcionalni čak i nakon kraja svog korisnog životnog vijeka jer vremenske prilike štetno djeluju prije svega na izolatore, prednji i stražnji dio modula, električne kontakte i kabele. U pogledu tankoslojnih panela, ponovno iskoristive sirovine mogu se reciklirati jednostavnijom tehnikom. Amorfni silicij se može izravno spaliti, a staklo naknadno iskoristiti. Što se tiče drugih tankoslojnih tehnologija (CdTe ili CIS), sama prisutnost kemijski vezanih teških metala u njima iziskuje povećan nadzor nad cjelokupnim životnim vijekom, kao i relativno bolje regulirano gospodarenje otpadom [22].

Posljednjih godina su prvi fotonaponski sustavi doživjeli kraj radnog vijeka i recikliraju se u *Deutsche Solar AG* pilot sustavu. Do 2015. godine značajan je broj fotonaponskih sustava doživio kraj svog životnog vijeka te se očekuje naglo povećanje količine fotonaponskog otpada.

Od 2002. godine traje zajednički projekt koji financira Njemačko savezno ministarstvo okoliša, u kojem istraživači iz *Deutsche Solar AG* i *TU Bergakademie Freiberg* rade na poboljšanju recikliranja fotonaponskih modula tako da ono bude učinkovito i prihvatljivo za okoliš. Suvremena tehnologija omogućuje recikliranje otpada iz proizvodnje, potpuno istrošenih panela i slomljenih panela, čime se postižu učinkovitost recikliranja od 95 %.

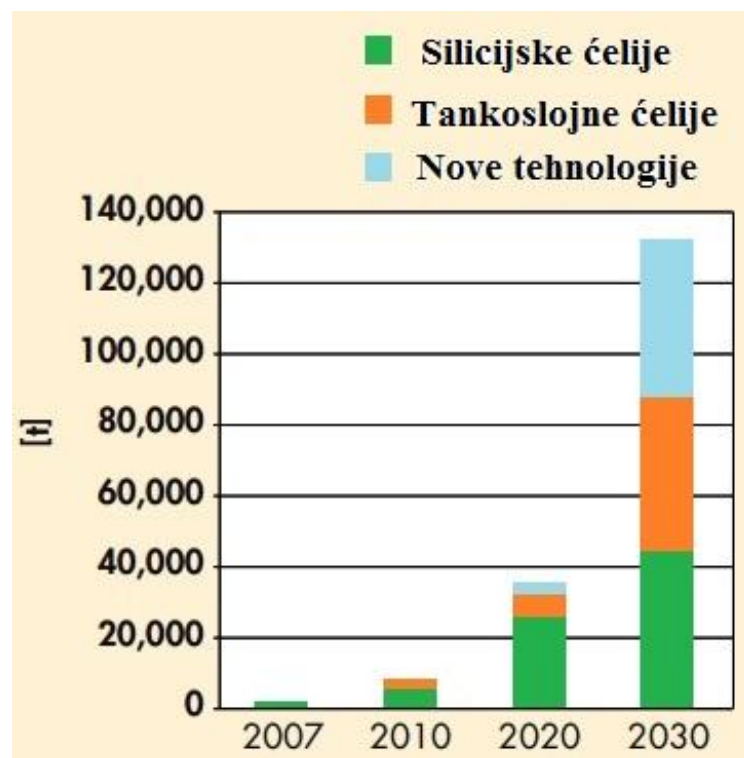
Prvo svjetsko postrojenje za recikliranje fotonaponskih modula od kristalnog silicija, koje se bavi spaljivanjem plastičnih materijala izgrađeno je u Freiburgu i pušteno u pogon 2004. godine. Preostalo staklo, metali i metalni otpad prosljeđuju se postrojenjima za recikliranje otpada. Preostali fotonaponski paneli podvrgavaju se dodatnim kemijskim postupcima u kojima se pročišćeni silicij reciklira za proizvodnju novih ćelija. Kako bi se stari moduli optimalno pripremili potreban je sveobuhvatan sustav recikliranja visoke kvalitete u cijelom lancu proizvodnje iz energije Sunca. Tvrtka *Solar Industry* je osnovala udrugu *PV Cycle* kao zajedničku inicijativu kako bi se takav sustav razvio na razini Europske unije. U Berlinu 2010. godine održana je Međunarodna konferencija o recikliranju fotonaponskih panela te od tada EPIA (Europsko udruženje fotonaponske industrije ) kontrolira i nadzire zakonske regulative Europske unije o elektroničkom otpadu.

Sa brzim rastom broja fotonaponskih sustava također se povećava i otpad koji nastaje zbog dijelova fotonaponskog sustava te je vrlo važno postaviti sustav recikliranja navedenog.

Ovo se događa zbog činjenice da snažan rast i visoke cijene u industriji zahtijevaju nove, jeftine izvore solarnog silicija.

Recikliranje fotonaponskih panela u europskim zemljama riješeno je pomoću udruženja *PV Cycle* čija je osnovna zadaća obvezati fotonaponsku industriju da se pobrine za fotonaponske module nakon isteka njihova trajanja. *PV Cycle* u cijelosti je financiran od proizvođača i uvoznika fotonaponskih modula u Europi i ima za cilj organizirati mrežu za slanje i preuzimanje fotonaponskih modula te popularizirati njihovu reciklažu kako bi solarne elektrane zaista bile izvor čiste energije. Od pokretanja 2007. broj članova je s 27 porastao na 236 u 2011. godini [24].

Zbog dugog radnog vijeka modula teško je odrediti točnu količinu otpada koju je stvorila fotonaponska industrija, ali u EU 2008. godine iznosila je oko 3800 tona. Do 2030. godine očekuje se porast na 130 000 tona (slika 4.2.).



**Slika 4.2.** Procijenjena količina materijala prema tehnologiji panela [24]

Danas se oko 90 % fotonaponskog otpada sastoji od silicijskih ćelija, a ostalih 10 % čine tankoslojne ćelije, što uključuje CIS, CdTe, amorfne i mikrokristalne tehnologije. Međutim, udio tankoslojnih ćelija će se povećati na 20 % do 2020. godine. Dotad će količina otpada nastala iz novih tehnologija biti zanemariva. Nove tehnologije u budućnosti bi mogle npr. sadržavati module s novim materijalima ili organskim ćelijama – što je dosad još uvijek u fazi razvijanja ili

koncepta, a do 2030. bi se udjeli različitih tehnologija mogli izjednačiti što vidimo u tablici 4.1. koja prikazuje sastav raznih fotonaponskih panela.

**Tablica 4.1.** Sastav silicijskih i tankoslojnih fotonaponskih panela [24]

	<b>Kristalni silicij (c-Si)</b>	<b>Amorfni silicij (a-Si)</b>	<b>CIS (bakar indij diselenid)</b>	<b>CdTe (kadmij telurid)</b>
<b>Udio u %</b>				
<b>Staklo</b>	74	90	85	95
<b>Aluminij</b>	10	10	12	<0,01
<b>Silicij</b>	3	<0,1		
<b>Polimeri</b>	6,5	10	6	3,5
<b>Cink</b>	0,12	<0,1	0,12	0,01
<b>Olovo</b>	<0,1	<0,1	<0,1	<0,01
<b>Bakar (kabeli)</b>	0,6		0,85	1,0
<b>Indij</b>			0,02	
<b>Selen</b>			0,03	
<b>Telurid</b>				0,07
<b>Kadmij</b>				0,07
<b>Srebro</b>	<0,006			<0,01

Do danas fotonaponske tvrtke nisu uspjevale postići zadovoljavajuće udjele čistih materijala prilikom recikliranja starih solarnih panela. To se naziva „*downcycling*“, što kao posljedicu ima slabu prodaju, velike troškove odlaganja koji se moraju pokriti dodatnim naknadama.

Troškovi učinkovitosti recikliranja panela najviše ovisi o tome da li je postignuta visoka kvaliteta recikliranja („*upcycling*“). Recikliranje na razini proizvoda ima prednosti u smislu energetske bilance čak i ako je tehnički nemoguće rastaviti sve dijelove u čiste sirove materijale, potrebno je uvesti kompromise kako bi se ograničili troškovi.

Međutim, veći troškovi dobavljanja i recikliranja moraju se uzeti u obzir prilikom recikliranja tankoslojnih solarnih ćelija, zbog male količine poluvodičkih materijala koje sadrže. Recikliranje smanjuje proizvodnju primarnih materijala (što zahtijeva više energije i štetnih emisija) i tako dokazuje ekološke i ekonomske karakteristike fotonaponskih sustava.

Utjecaj na okoliš i CO<sub>2</sub> bilanca se mogu odraditi analizom životnog ciklusa fotonaponskog panela. Faktor doprinosa opisuje omjer dobivene i potrošene energije sa uobičajenim radnim vijekom od 25 godina. Faktor doprinosa iznosi između 5 i 50, ovisno o stanju panela i u pravilu je veći za tankoslojne panele u odnosu na panele s kristalnim silicijem.

Istraživači su razvili održivi sustav recikliranja fotonaponskih sustava te nakon kratkog osnovnog ispitivanja, proces odvajanja premješten je u Freiberg pilot sustav. U trenutnom projektu se razvijaju metode ponovne upotrebe solarnog silicija koje imaju najmanji utjecaj na okoliš. Cilj je smanjiti otrovnost i okolišni utjecaj otopine za jetkanje, čime će se smanjiti i troškovi odlaganja ostalih otopina. S druge strane, bolji procesi jetkanja omogućavaju veći svjetlosni doprinos i tako i veću učinkovitost novih solarnih panela.

Originalni zadatak recikliranja neoštećenih panela je odbačen zbog male debljine suvremenih ćelija (< 180 μm) i oštećenja modula koje nastaje prilikom rastavljanja i transporta, tako da više nisu bili profitabilni. Stoga se oštećeni solarni paneli skupljaju i čiste, tako da se proizvodi čisti silicij. Dalje se rastapaju u polikristalne šipke, za koje se proizvode nove podloge. Ovim se procesom izbjegava izvlačenje silicija iz kvarca visoke čistoće [24].

Prvi pilot sustav za recikliranje svih standardnih solarnih panela radi još od 2002. godine i obrađuje širok spektar solarnih panela koje koriste različite tehnologije i dolaze od različitih proizvođača. Novi procesi se uglavnom koriste za recikliranje standardnih fotonaponskih panela od monokristalnog, polikristalnog i amorfne silicija. Solarni paneli od različitih proizvođača zahtijevaju obradu specifično podešenu za njihov sustav slojeva.

Rad pilot sustava još uvijek koristi značajne količine energije i sirovih materijala. Ručno odvajanje i niski protok za rezultat daju relativno visoke troškove. Sa energetske optimiziranim i automatiziranim sustavima, utjecaj na okoliš od termalnog procesa i procesa razdvajanja bi se trebao smanjiti na jednu trećinu.

Slomljeni silicij koji se dobije u automatskom sustavu se kasnije otapa i koristi za proizvodnju novih fotonaponskih solarnih panela. U usporedbi sa starim modulima iz 1980-ih, učinkovitost novih modula je i do 50 % veća, a u usporedbi sa proizvodnjom modula od novih podloga, proizvodnja od recikliranih podloga štedi ogromne količine energije i značajno smanjuje troškove u odnosu na nove podloge.

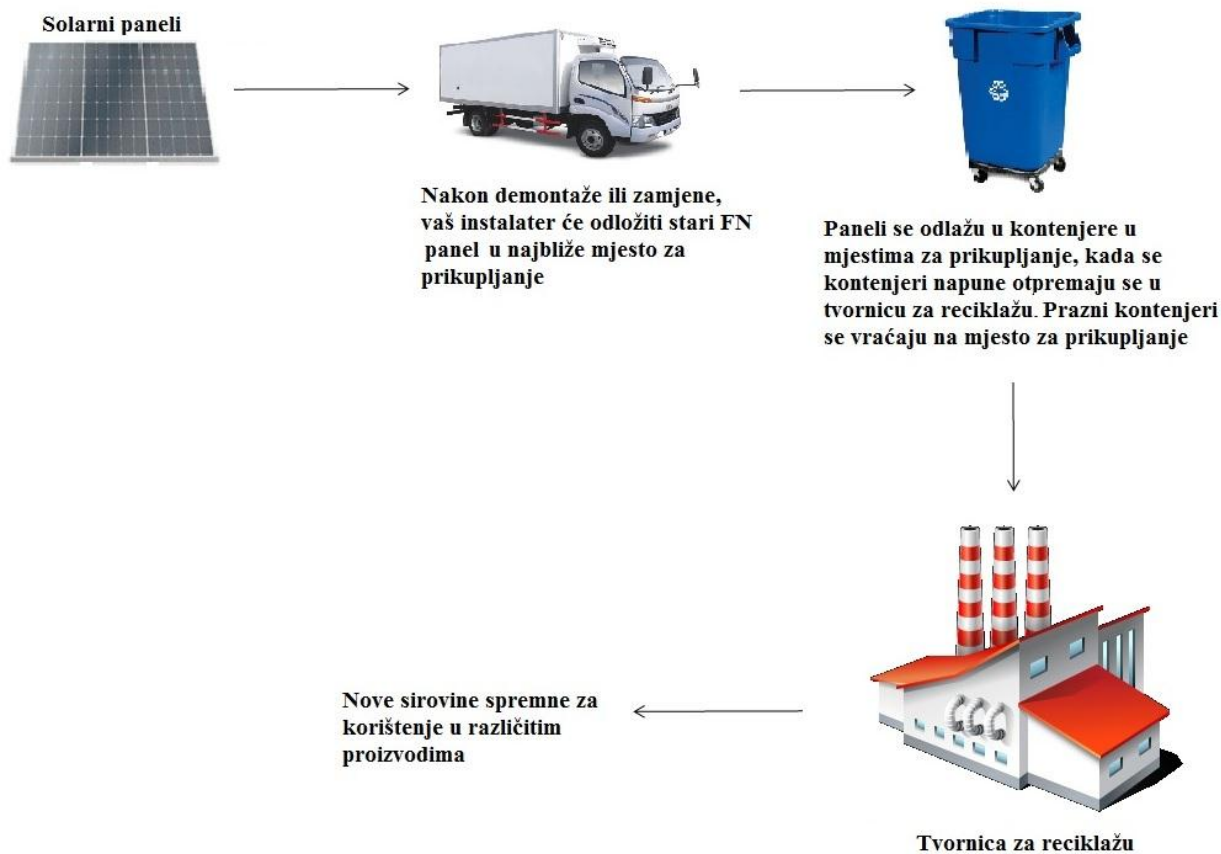
Zajednički projekt razvija učinkovitiji proces recikliranja koji će imati manji utjecaj na okoliš na industrijskoj razini. Poboljšana metoda recikliranja može obrađivati nove tehnologije panela, teško oštećene panele i tankoslojne panele u visoko kvalitetne proizvode. Također je razvijena metoda za uspješno jetkanje solarnih ćelija, slomljenih solarnih ćelija kako bi se dobili novi proizvodi poput finog silicija.

Standardizirani i automatizirani postupci recikliranja omogućuju ekonomski i ekološki optimalan rezultat. Istraživači konstantno poboljšavaju i optimiziraju metode recikliranja kako bi odgovarale specifičnim tehnologijama izrade panela koji nas očekuju u budućnosti. Materijali i spojevi koji se koriste u proizvodima uvelike utječu na mogućnosti recikliranja i troškove procesa. Stoga je prilikom razvijanja novih tehnologija bitno razmotriti kako se ovi materijali i spojevi mogu rastaviti i reciklirati na ispravan i odgovarajući način na kraju njihovog radnog vijeka.

*PV Cycle* prikuplja istrošene fotonaponske panele u svim zemljama Europske unije i zemljama članicama EFTA-e (engl. European Free Trade Association) – Švicarskoj, Islandu, Norveškoj i Lihtenštajnu. Najviše iskorištenih modula dolazi iz zemalja koje imaju razvijenu fotonaponsku industriju poput Njemačke, Španjolske i Italije. Nakon prikupljanja moduli se isporučuju tvrtkama koje se bave reciklažom, a s kojima je *PV Cycle* u partnerstvu.

Prikupljanje iskorištenih panela provodi se na dva načina, ovisno o količini panela. Ako je riječ o malim količinama do 40 panela (slika 4.3.), tada je praksa da se potraži najbliže mjesto za prikupljanje fotonaponskih panela i nakon demontaže ili zamjene instalater stare fotonaponske panele odvozi u najbliže mjesto za prikupljanje i odlaže ih u za to namijenjene kontejnere. Kada se kontejneri napune, otpremaju se u tvornice na reciklažu.

Kada je riječ o velikim količinama modula, odnosno više od 40, treba izravno kontaktirati s *PV Cycleom* kako bi se saznao raspored prikupljanja, a jedan od partnera udruženja dolazi po module izravno na lokaciju i otprema ih na reciklažu [25].

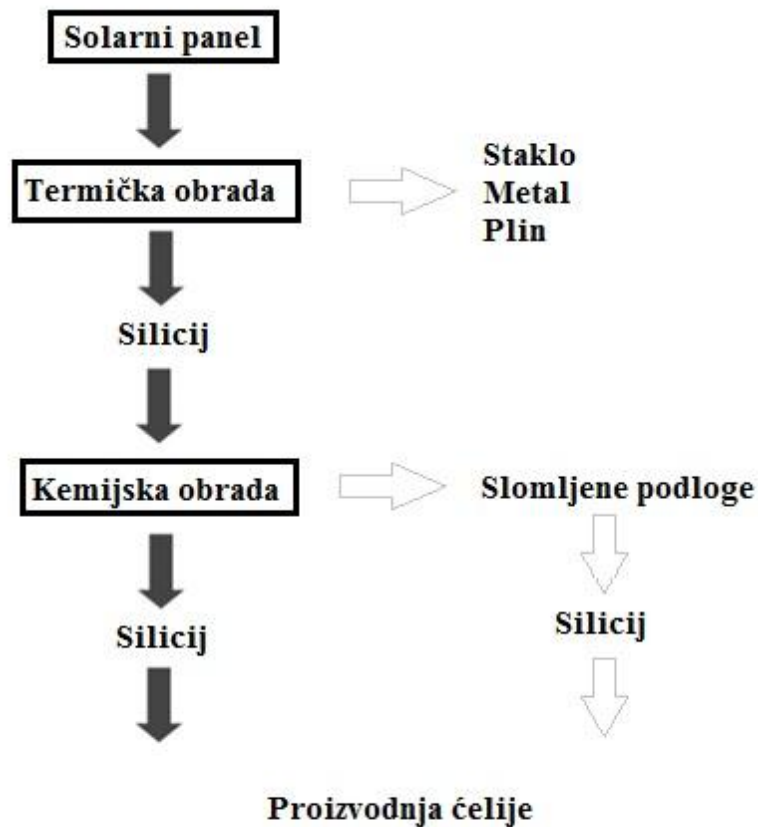


**Slika 4.3.** Postupak prikupljanja malih količina iskorištenih panela [25]

#### **4.1. Recikliranje solarnih panela na bazi silicija**

Recikliranjem solarnih panela na bazi silicija kao krajnji produkt dobije se staklo, metali, plastika i silicij. Današnjom tehnologijom može se reciklirati oko 80 % fotonaponskog panela. Proces samog recikliranja fotonaponskog panela počinje skidanjem i rastavljanjem aluminijskog okvira od ostatka panela. Postupak skidanja najčešće se izvodi ručno zbog različitih dimenzija i spojeva okvira. Nakon skidanja okvira skida se i razvodna kutija.

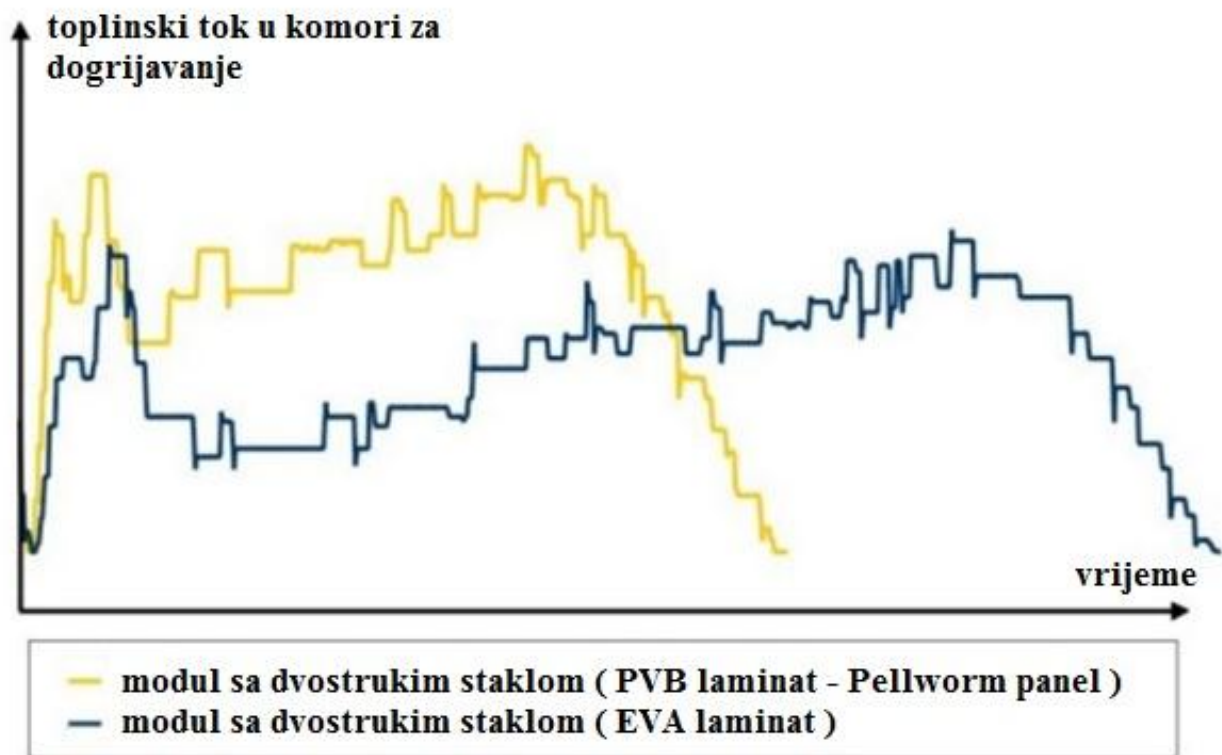
Fotonaponski panel bez okvira i razvodne kutije sastoji se samo od silicijske ćelije laminirane u sloj EVA. Na slici (slika 4.4.) prikazan je dijagram toka recikliranja fotonaponskih panela tvrtke *Deutsche Solar AG*. Proces se sastoji od dva glavna koraka. Prvo se spaljuje laminat kako bi se olakšalo ručno rastavljanje. Kod ćelija od kristalnog silicija, metalizacija, antirefleksijski sloj i p-n spojevi se uklanjaju jetkanjem. Recikliranje solarne ćelije se može izvršiti jetkanjem na tehničkoj razini, a površinski sloj se često može prilagoditi zahtjevima kupca.



*Slika 4.4.* Dijagram toka recikliranja fotonaponskih solarnih panela tvrtke *Deutsche Solar AG* [26]

Kontrola procesa termičke obrade uvelike ovisi o dizajnu panela. Vrsta laminata i dimenzije panela utječu na tijek procesa. Toplinski tok u komori za dogorijevanje ovisi o ispušnim plinovima koji nastaju tijekom termičke obrade.

Krivulje na slici 4.5. prikazuju razlike u tijeku procesa tako da uspoređuju panel s otoka Pellworm i panel drugog proizvođača sa dvostrukim staklom. Pellworm paneli sadrže PVB (polivinil butiral) laminat, a drugi paneli imaju EVA laminat. Iako se dimenzije obje vrste panela značajno razlikuju, količina laminata, stakla i nehrđajućeg čelika tijekom oba termička procesa su skoro jednake. Kao što se vidi na slici 4.5., emisije plinova tijekom oba ciklusa peći se značajno razlikuju.



*Slika 4.5.* Toplinski tok u komori za dogorijevanje tijekom termičke obrade panela s otoka Pellworm u usporedbi sa panelima sa dvostrukim staklom drugog proizvođača [26]

Tijekom prvog termičkog koraka se spalio laminat Pellworm panela, ćelije su se oslobodile i paneli se mogu rastaviti na dijelove:

- netaknute ćelije
- slomljene ćelije
- okviri od nehrđajućeg čelika
- staklo

Male dimenzije Pellworm panela i relativno velika debljina ugrađenih ćelija od 0,4 mm kao rezultat su dali 84,9 % netaknutih ćelija.

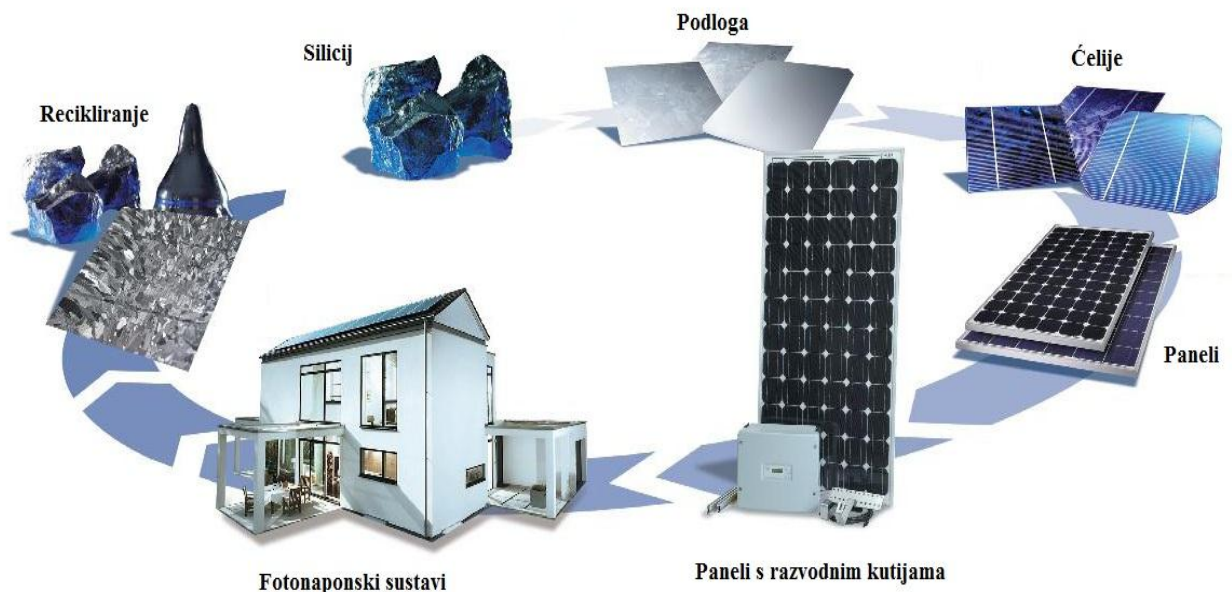
Kemijska obrada uključuje odvajanje metalizacije, otapanje antirefleksijskog sloja i jetkanje silicijskih podloga kako bi se odvojio n-dopirani emiter. U nekoliko selektivnih koraka jetkanja su uklonjeni svi slojevi pomoću nekoliko mineralnih kiselina i mješavina kiselina. Postupke jetkanja potrebno je prilagoditi za različite tehnologije ćelija koje se koriste za izradu solarnih panela. Ne postoji univerzalni postupak koji se može općenito primijeniti. Za različite ćelije potrebno je prilagoditi i različite korake procesa.



Na primjer, dio Pellworm ćelija sadrži srebrnu metalizaciju koju je trebalo ukloniti jetkanjem pomoću kiseline. Veći dio ćelija je prekriven aluminijem koji zahtijeva obradu lužinom. Režimi procesa su se trebali razviti na takav način da se održi visoka elektronička kvaliteta podloge.

Prije početka sljedećeg koraka jetkanja, cjelovitost sloja koji se postupno skida važan je za prethodnu obradu. Jedino se na takav postupan način jetkanja može doći do sljedećeg sloja. U prvom koraku prilikom recikliranja podloge važno je da ne dođe do kontakta s otporom mjerenja i određivanja debljine. Prosječni otpor materijala je u rasponu od 1,8 do 2,9  $\Omega\text{cm}$  dok je debljina podloge u rasponu od 400 do 450  $\mu\text{m}$ . Jedan od najvećih problema Pellworm panela je taj što su ručno izrađene aluminijske žice ultrazvučno spojene (zavarene). Tako su nastale duboke pukotine u podlozi koje su ispunjene aluminijem. Takvu podlogu prilikom recikliranja potrebno je dugo vremena jetkati u otopini natrijeva hidroksida (NaOH). Osnovni zadatak bio je optimizirati temperaturu jetkanja, vrijeme i kiselost kako bi se samo skinuo silicij onoliko koliko je potrebno. Prejaka otopina za jetkanje može proutrokovati jame i samim time pojačati razliku u građi površine. U iznimnim slučajevima mogu se formirati i rupe odnosno probušiti podloga [26].

Na narednoj slici (slika 4.6.) prikazana je shema procesa recikliranja fotonaponskog panela na bazi silicija.



**Slika 4.6.** Shema procesa recikliranja fotonaponskih panela na bazi silicija [27]

Rezultati procesa recikliranja njemačkog fotonaponskog sustava instaliranog na otoku Pellworm nakon 23 godine radnog vijeka panela prikazani su u tablici 4.2. Ukupna količina panela za recikliranje iznosi 15 795, sastavljeni su od 315 900 ćelija instalirane snage 252 720  $W_p$  s učinkovitosti od 8 %. Za izgradnju novih solarnih panela instalirane snage 237 589  $W_p$  s učinkovitosti od 13 % koristit će se isključivo reciklirani materijali od starih solarnih panela. To znači da će se za izradu novih panela iskoristiti 94 % starih panela. Osim 3 263 t nehrđajućeg čelika prodano je i 487 kg slomljenih ćelija za recikliranje i 149 kg silicijskih šipki dobivenih nakon recikliranja.

**Tablica 4.2.** Analiza recikliranja njemačkog fotonaponskog sustava instaliranog na otoku Pellworm [26]

	<b>Ulaz panela</b>	<b>Izlaz panela</b>	<b>Iskoristivost</b>	<b>Kumulativna iskoristivost</b>
<b>Broj panela</b>	15 795	241 514	76,4 %	74,4 %
<b>Broj ćelija</b>	315 900	177 454	74,5 %	56,1 %
<b>Snaga u <math>W_p</math></b>	270 095	237 788	88,0 %	
<b>Učinkovitost</b>	8 do 9 %	12 do 14 %		

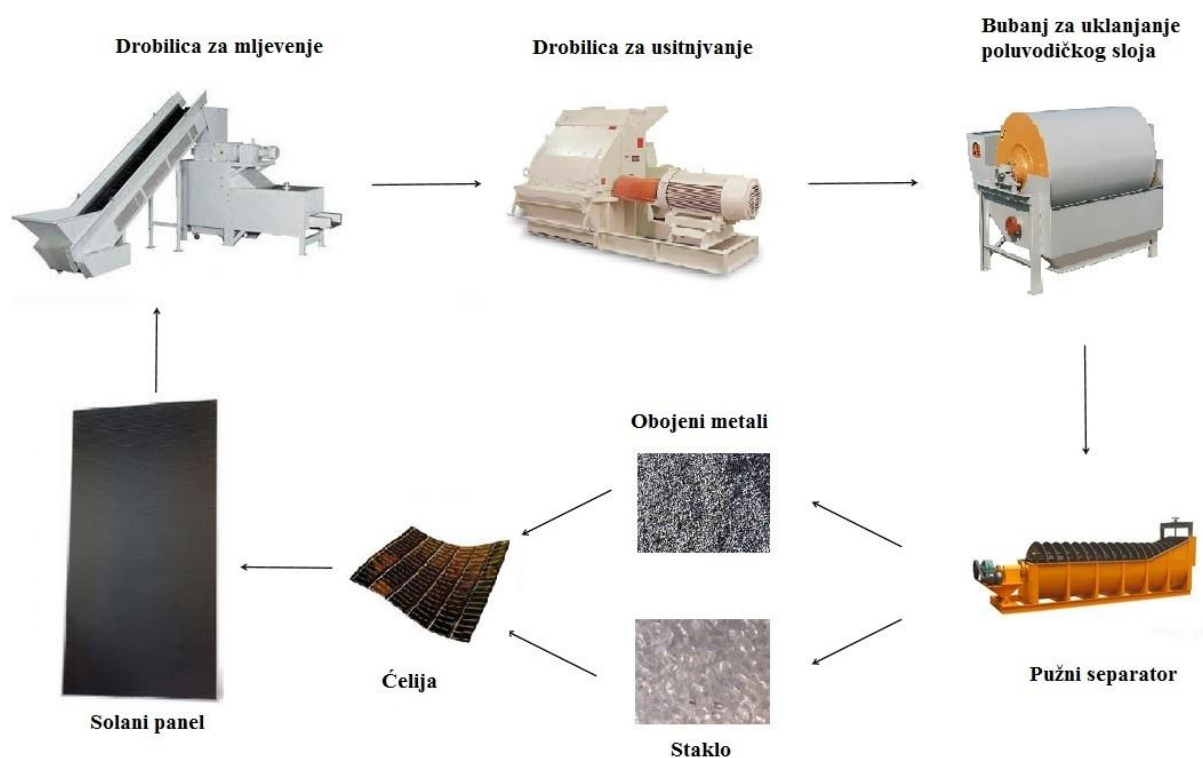
## 4.2. Recikliranje solarnih panela na bazi kadmij telura

Recikliranje solarnih panela na bazi kadmij telura (CdTe) razvila je Američka tvrtka *First Solar*. Recikliranje se sastoji od neoliko glavnih koraka:

- Usitnjavanje i mljevenje – prikupljeni paneli najprije se u drobilicama melju na velike komade, a zatim se u drobilicama za usitnjavanje usitnjuju na komadiće veličine 4 do 5 mm. To osigurava da je laminirana veza EVA polimera slomljena što omogućava sljedeći korak prilikom recikliranja.
- Uklanjanje filma (poluvodičkog sloja) – odvija se u bubnju od nehrđajućeg čelika u kojemu se nalazi otopina kiseline i peroksida koja odvaja vodljivi sloj od stakla. Da bi došlo do boljeg ispiranja metala bubanj se rotira.

- Razdvajanje krutih materijala od tekućine - mješavina usitnjenih krutih dijelova i kiselina ispušta se u pužni separator u kojemu se odvija ispiranje i odvajanje krutih dijelova od tekućine.
- Ispiranje, odvajanje i skladištenje stakla – vrši se nekoliko puta kako bi se uklonio preostali poluvodički materijal sa stakla, a nakon toga čisto i oprano staklo ide na skladištenje gdje stoji spremno za dalju uporabu.
- Taloženje – tekućina odvojena u trećem koraku bogata je metalima pa se vrši taloženje gdje se skupljaju i zgrušavaju te pakiraju za daljnje postupke iskorištavanja [28].

Na slici (slika 4.7.) prikazana je shema procesa recikliranja fotonaponskog panela na bazi kadmij telura.



**Slika 4.7.** Shema procesa recikliranja fotonaponskih panela na bazi kadmij telura [28]

### 4.3. Troškovi i ostvarivanje dobit nakon recikliranja solarnih panela

Napravljena je analiza pet različitih vrsta solarnih panela. U prvom koraku ove analize uspoređena je masa poluvodičkih materijala u solarnom panelu koja je određena prilikom proizvodnje u odnosu na masu koja se može dobiti prilikom recikliranja. Ulazni parametri i masa obnovljenih poluvodičkih materijala nakon procesa recikliranja 1 m<sup>2</sup> panela napravljenog od: CIGS, CdTe, a-Si i x-Si prikazani su u tablici ispod.

**Tablica 4.3.** Analiza prikupljenog poluvodičkog materijala za pojedine vrste panela [31]

	CIGS		CdTe		a-Si	x-Si
	Ga	In	Cd	Te		
<b>A (cm<sup>2</sup>)</b>	10 000		10 000		10 000	10 000
<b>t<sub>s</sub>(cm)</b>	0,0004		0,0003		0,00005	0,02
<b>ρ<sub>s</sub>(<math>\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}</math>)</b>	N/A	N/A	6,2		2,33	2,33
<b>m<sub>s</sub>(g)</b>	6,54	10,77	9,07	9,53	1,165	466
<b>z<sub>s</sub>(%)</b>	80		99	96	N/A	60
<b>m<sub>rs</sub>(g)</b>	5,23	8,62	8,98	9,15	<1,17	279,6

Masa obnovljenog poluvodičkog materijala ( $m_{rs}$ ) svakog modula može se izračunati prema formuli:

$$m_{rs} = A \cdot t_s \cdot \rho_s \cdot z_s \quad (4-1)$$

gdje je:

$A$  - površina solarnog panela (cm<sup>2</sup>)

$t_s$  - debljina poluvodičkog sloja (cm)

$\rho_s$  - gustoća poluvodičkog materijala (g/cm<sup>3</sup>)

$z_s$  - postotak poluvodičkog materijala koji se može oporaviti (%)

U drugom koraku analizira se količina prikupljenog stakla nakon postupka recikliranja. Iz rezultata u tablici 4.4. vidimo da se masa prikupljenog stakla ( $m_{rg}$ ) kreće između 16 i 17 kg/m<sup>2</sup>.

**Tablica 4.4.** Masa prikupljenog stakla nakon recikliranja za pojedine vrste panela [31]

	<b>CIGS</b>	<b>CdTe</b>	<b>c-Si</b>
<b><math>A</math> (cm<sup>2</sup>)</b>	10 000	10 000	10 000
<b><math>t_g</math> (cm)</b>	0,68	0,64	0,64
<b><math>\rho_g</math> (<math>\frac{g}{cm^3}</math>)</b>	2,6	2,6	2,6
<b><math>m_{rg}</math> (g)</b>	17 680	16 640	16 640

Masa obnovljenog stakla svakog modula ( $m_{rg}$ ) može se izračunati prema formuli:

$$m_{rg} = A \cdot t_g \cdot \rho_g \cdot z_g \quad (4-2)$$

gdje je:

$A$  - površina solarnog panela (cm<sup>2</sup>)

$t_g$  - debljina poluvodičkog sloja (cm)

$\rho_g$  - gustoća poluvodičkog materijala (g/cm<sup>3</sup>)

$z_g$  – pretpostavka da se staklo može 100 % reciklirati

U trećem koraku analizirani su troškovi recikliranja svakog od tri navedena modula (CIGS, CdTe i c-Si) u odnosu na povrat financijskih sredstava nakon prodaje obnovljenih poluvodičkih materijala i stakla. Troškovi i dobit nakon recikliranja solarnih panela prikazani su u tablici 4.5.

Dobit nakon recikliranja obnovljenog poluvodičkog materijala ( $P_s$ ) pojedinih vrsta panela može se izračunati prema formuli:

$$P_s = m_{rs} \cdot V_s \quad (4-3)$$

gdje je:

$m_{rs}$  - masa obnovljenog poluvodičkog materijala (g)

$V_s$  - vrijednost rabljenog poluvodičkog materijala (\$/g)

Dobit nakon recikliranja stakla ( $P_g$ ) pojedinih vrsta panela može se izračunati prema formuli:

$$P_g = V_g \cdot m_g \quad (4-4)$$

gdje je:

$V_g$  - vrijednost rabljenog stakla (\$/g)

$m_{rg}$  - masa obnovljenog stakla pojedinog panela (g)

Troškovi odlaganja fotonaponskih panela ( $W$ ) uključujući staklo i poluvodičke materijale mogu se izračunati prema formuli:

$$W = \frac{A \cdot E \cdot w}{N_p} \quad (4-5)$$

gdje je:

$A$  - površina solarnog panela ( $m^2$ )

$E$  - snaga svakog solarnog panela po jedinici površine ( $W/m^2$ )

$w$  - masa solarnog panela (kg)

$N_p$  - nazivna snaga solarnog panela (W)

Konačni troškovi odlaganja fotonaponskih panela ( $D$ ) mogu se izračunati prema formuli:

$$D = W \cdot T \quad (4-6)$$

gdje je:

$W$  - troškovi odlaganja fotonaponskih panela (\$/kg)

$T$  - najviši trošak (\$/kg)

Ukupna dobit nakon recikliranja pojedinih fotonaponskih panela može se izračunati po formuli:

$$P_T = (P_s + P_g) + D - C = P_t + D - C \quad (4-7)$$

gdje je:

$C$  - trošak recikliranja (\$/panelu)

$P_t$  - prihod nakon recikliranja obnovljenog poluvodičkog materijala i stakla (\$/panelu)

U narednoj tablici 4.5. prikazani su troškovi i prihod nakon recikliranja pojedine vrste solarnih fotonaponskih panela. Iz tablice 4.5. vidljivo je da najveći trošak recikliranja imaju x-Si ćelije, dok najmanji trošak imaju CdTe ćelije. Najveći prihod nakon recikliranja obnovljenog poluvodičkog materijala i stakla imaju CIGS ćelije, dok najmanji imaju CdTe ćelije.

**Tablica 4.5.** Analiza troškova i prihoda nakon recikliranja pojedine vrste panela [31]

	CIGS		CdTe		x-Si
	In	Ga	Cd	Te	Si
$V_s \left( \frac{\$}{\text{g}} \right)$	3,00	3,00	0,026	0,220	0,027
$m_{rs}(\text{g})$	5,23	8,62	8,98	9,15	279,60
$P_s \left( \frac{\$}{\text{panelu}} \right)$	15,70	25,85	0,23	2,02	7,54
$V_g \left( \frac{\$}{\text{g}} \right)$	$3,72 \cdot 10^{-6}$		$3,72 \cdot 10^{-6}$		$3,72 \cdot 10^{-6}$
$m_{rg}(\text{g})$	17 680		16 640		16 640
$P_g \left( \frac{\$}{\text{panelu}} \right)$	0,07		0,06		0,06
$P_t \left( \frac{\$}{\text{panelu}} \right)$	41,62		2,31		7,54
$C \left( \frac{\$}{\text{panelu}} \right)$	20,24		9,00		32,11

Iz tablice 4.6. vidljivo je da cijena odlaganja (D) CdTe panela znatno veća u odnosu na druge promatrane panele jer su CdTe paneli napravljeni od kadmija koji je otrovan teški metal, a samim time je i skuplji za odlaganje. Zbog toga CdTe solarni paneli ne ostvaruju dobit nakon recikliranja. Također solarni paneli na bazi silicija ne ostvaruju dobit nakon recikliranja već jedino recikliranjem tankoslojnih bakar indij galij dislenidnih panela (CIGS) dolazi do ostvarivanja dobiti.

**Tablica 4.6.** Troškovi odlaganja i dobiti nakon recikliranja fotonaponskih panela [31]

	CIGS	CdTe	c-Si	p-Si	a-Si
$E \left( \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right)$	100	108	144	138	90
$m(\text{kg})$	28	12	15,4	19,4	19,1
$P(\text{W})$	160	77,5	180	230	128
$W \left( \frac{\text{kg}}{\text{panelu}} \right)$	17,5	16,72	12,32	11,64	13,43
$T \left( \frac{\$}{\text{kg}} \right)$	0,05	0,39	0,05	0,05	0,05
$D(\text{\$})$	0,87	6,45	0,31	0,58	0,67
$P_T = P_t + D - C(\text{\$})$	22,25	-0,24	-23,96	-23,99	0,73-C

## 5. ZAKLJUČAK

Stalni rast postavljanja fotonaponskih panela dovodi do povećanja ukupne instalirane snage iz obnovljivih izvora energije. Zbog velike proizvodnje fotonaponskih panela u vodećim se državama, u Europi je to Njemačka, pripremaju za recikliranje starih i dotrajalih panela.

Sustavi i poduzeća za sakupljanje i recikliranje panela dobra su vijest, jer znamo da postoji korist od recikliranja fotonaponskih panela kako u smanjenju iskorištavanja prirodnih resursa, tako i u sprječavanju da ti paneli završe na nekom divljem odlagalištu.

Tehnologija recikliranja fotonaponskih panela nastavit će se razvijati u budućnosti kako se budu razvijale nove tehnologije i materijali za izradu panela. Trenutno najbolje razvijena tehnologija za recikliranje primjenjuje se za monokristalne i polikristalne silicijske panele, gdje možemo iskoristiti do 95 % recikliranih materijala za daljnu uporabu.

Tankoslojni fotonaponski paneli još se ne upotrebljavaju u tako velikim količinama kao monokristalni i polikristalni paneli, ali tehnologija za njihovo recikliranje već postoji i do 2029. godine trebalo bi se prikupiti dovoljno panela za isplativo i učinkovito recikliranje.

U svakom pogledu, ne gledajući na vrstu fotonaponskih panela u sljedećih nekoliko godina bit ćemo svjedoci ubrzanog razvoja tehnologija koje će povećati stupanj recikličnosti panela i iskoristivosti materijala kao produkta recikliranja.



## 6. LITERATURA

- [1] LJ. Majdandžić, Fotonaponski sustavi – priručnik, [http://www.solarni-paneli.hr/pdf/01\\_handbook\\_fotonapon.pdf](http://www.solarni-paneli.hr/pdf/01_handbook_fotonapon.pdf), travanj 2015.
- [2] Hrvatski operator tržišta energije – godišnji izvještaj za 2013. godinu, [http://files.hrote.hr/files/PDF/OIEIK/GI\\_2013\\_OIEiK\\_web.pdf](http://files.hrote.hr/files/PDF/OIEIK/GI_2013_OIEiK_web.pdf), travanj 2015.
- [3] Solar facts and advice, <http://www.solar-facts-and-advice.com/>, travanj 2015.
- [4] ETAP Powering success, <http://etap.com/renewable-energy/photovoltaic-101.htm>, travanj 2015.
- [5] SolarHome Ws: <http://www.solarhome.ws/>, travanj 2015.
- [6] Solarna ćelija: [http://hr.wikipedia.org/wiki/Solarna\\_ćelija](http://hr.wikipedia.org/wiki/Solarna_ćelija), travanj 2015.
- [7] I. Debelec, M. Vraničar: Paneli sunčanih ćelija, Zagreb 2013, travanj 2015.
- [8] Solarna fotonaponska eanergija, [http://hr.wikipedia.org/wiki/Solarna\\_fotonaponska\\_energija](http://hr.wikipedia.org/wiki/Solarna_fotonaponska_energija), travanj 2015.
- [9] A. Čotar, A. Filčić, REA Kvarner d.o.o.: Fotonaponski sustavi, [http://www.irena-istra.hr/uploads/media/Fotonaponski\\_sustavi\\_01.pdf](http://www.irena-istra.hr/uploads/media/Fotonaponski_sustavi_01.pdf), travanj 2015.
- [10] B. Dopuđa: Periodni sustav elemenata, <http://www.pse.pbf.hr/hrvatski/elementi/si/spojevi.html>, travanj 2015.
- [11] Tvrtka Solvis, <http://solarna.besplatna-energija.com/novosti/galij-arsenidne-gaas-solarne-celije.html>, travanj 2015.
- [12] A.M. Turing, E Ruska, J. Brahm, S. Davidson: How products are made, <http://www.madehow.com/index.html>, travanj 2015.

- [13] A. Luque, S. Hegedus: Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, WILEY, 2011.
- [14] Tvrtka Mersen, <http://www.mersen.com/en.html>, svibanj 2015.
- [15] Tvrtka Cosine power BD, [http://cosinepowerbd.com/?page\\_id=16](http://cosinepowerbd.com/?page_id=16), svibanj 2015.
- [16] Tvrtka Risun Technology, <http://risun-cn.en.alibaba.com/>, svibanj 2015.
- [17] Advance energy power solution, <http://www.advanced-energy.com/>, svibanj 2015.
- [18] Tvrtka Solar market, [www.solarmarket.com.au](http://www.solarmarket.com.au), svibanj 2015.
- [19] Phys science news, <http://phys.org/news/2011-06-efficiency-flexible-cdte-solar-cell.html>, svibanj 2015.
- [20] A. Pintarić: Recikliranje elektrotehničkih proizvoda - predavanja, ETF Osijek, svibanj 2015.
- [21] Tvrtka Plan-net solar d.o.o., <http://www.plan-net-solar.hr/>, svibanj 2015.
- [22] D. Pelin, D. Šljivac, D. Topić, V. Varju: Utjecaj fotonaponskih suatava na regiju, Pecs 2014.
- [23] V.M. Fthenaks: End of life managment and recycling PV modules, USA 2000.
- [24] Technische Universitat Bergakademie Freiberg: Recycling photovoltaic modules, BINE projectinfo 02/2010.
- [25] Tvrtka PV Cycle: <http://www.pvcycle.org/>, svibanj 2015.
- [ 26] E. Bombach, I. Rover, A. Muller, S. Schlenker; K. Wambach, R. Kopecek, E. Wefringhaus, Deutsche Solar AG, Solar Material, Alfred-Lange: Tehnical experience during thermal and chemical recycling of a 23 year old PV generator formerly installed on Pellworm island, Freiberg Germany, lipanj 2015.

[27] C. Olson, B. Geerligs, M. Goris, I. Bennett, J. Clyncke: Current and future priorities for mass and material in silicom PV module recycling, EUPVSEC, Paris 2013.

[28] Tvrtka First Solar, <http://www.firstsolar.com/>, lipanj 2015.

[29] Tvrtka AM Solar, <http://www.amsolar.com>, lipanj 2015.

[30] Tvrtka Solarne energija Miro d.o.o., <http://www.solarenergy-miro.com>, lipanj 2015.

[31] N. C. McDonald, J. M. Pearce: Producer Responsibility and Recycling Solar Photovoltaic Modu, Kingston, Ontario 2010.

## **SAŽETAK**

### **Recikliranje solarnih panela**

U smislu industrijske ekologije, recikliranje solarnih panela vrši se sa svrhom prikupljanja panela kojima je istekao životni vijek za daljnu obradu ili upotrebu iskoristivih materijala. U ovom diplomskom radu objašnjena je uloga i potencijal sunčeva zračenja, fizikalna osnova solarnih panela, materijali i tehnologije za izradu solarnih panela. U zadnjem poglavlju opisani su postupci koji se provode prilikom recikliranja dotrajalih solarnih panela.

**Ključne riječi:** fotonaponski paneli, fotonaponske ćelije, recikliranje

## **ABSTRACT**

### **Recycling of solar panels**

In the terms of industrial ecology, recycling of solar panels is done with the purpose of collecting panels with an expired lifetime for further processing or the use of reusable materials. Introduction of this thesis explains the role and potential of solar radiation, physical basis of solar panels, materials and technologies for the production of solar panels. The last chapter describes the procedures to be applied during the recycling of old solar panel.

**Key words:** photovoltaic panels, photovoltaic cells, recycling

## **ŽIVOTOPIS**

Mihael Kraljević je rođen u Požegi 26. Srpnja 1989. godine. Po završetku Osnovne škole Ivan Goran Kovačić upisuje Tehničku školu u Požegi, smjer elektrotehničar koju završava 2008. godine. Nakon završene tehničke škole upisuje se na Elektrotehnički fakultet u Osijeku, stručni studij gdje se opredjeljuje za smjer elektroenergetika. Nakon završenog stručnog studija upisuje Razlikovnu godinu na Elektrotehnički fakultet u Osijeku te nakon njegovog završetka 2013./2014. upisuje Diplomski studij elektrotehnike, smjer elektroenergetika. Akademeske godine 2014./2015. na Filozofskom fakultetu u Osijeku upisuje Pedagoško-psihološko-didaktičko-metodičku izobrazbu (PPDMI) te stječe pedagoške kompetencije.

---