

# Recikliranje solarnih panela

---

Jambrešić, Tomislav

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

*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:200:661286>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-14**

*Repository / Repozitorij:*

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



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU**

**ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET**

**Stručni studij**

**RECIKLIRANJE SOLARNIH PANELA**

**Završni rad**

**Tomislav Jambrešić**

**Osijek, 2020.**

# SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
1.1. Zadatak završnog rada.....	2
2. SUNCE I SUNČEVA ENERGIJA .....	3
2.1. Iskorištavanje sunčeve energije.....	4
2.1.1. Aktivno iskorištavanje sunčeve energije.....	4
2.1.2. Pasivno iskorištavanje sunčeve energije .....	5
3. FOTONAPONSKI SUSTAVI .....	6
3.1. Primjena fotonaponskih panela .....	7
3.1.1. Primjeri primjene fotonaponskih panela .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
3.2. Prednosti i nedostaci upotrebe solarnih panela: .....	9
3.3. Materijali za izradu fotonaponskih ćelija .....	9
3.3.1. Osnovni materijali za izradu fotonaponskih ćelija.....	10
4. RECIKLIRANJE SOLARNIH PANELA.....	14
4.1. Recikliranje solarnih panela i dostupne tehnologije .....	15
4.2. Dostupne tehnologije.....	19
4.2.1. Recikliranje fotonaponskih panela na bazi silicija.....	19
4.2.2. Recikliranje fotonaponskih panela na bazi kadmij telura .....	21
4.3. Utjecaj recikliranja fotonaponskih panela na okoliš .....	22
4.4. Ekonomski aspekti recikliranja fotonaponskih panela.....	23
4.5. Gospodarenje elektroničkim otpadom u Europskoj uniji.....	23
4.6. Gospodarenje elektroničkim otpadom u Republici Hrvatskoj .....	26
5. ZAKLJUČAK .....	28
6. LITERATURA.....	29

## 1. UVOD

Sunce u jednoj sekundi oslobodi više energije nego što je naša civilizacija potrošila u svom cjelokupnom razvoju. Pretvorba energije sunčeva zračenja u korisne oblike energije poprima glavnu ulogu u rješavanju problema energetske krize. Naziv *photo* dolazi od grčke riječi *phos* što znači svjetlo, a *Volt* od prezimena znanstvenika Alessandra Volta koji je začetnik proučavanja električne energije. Godine 1839. Edmon Becquerel otkriva tipove materijala koji proizvode malu količinu električne energije kada se izlože sunčevoj svjetlosti. U Sjedinjenim Američkim Državama 1954. godine je predstavljen prvi fotonaponski članak koji je generirao upotrebljivu količinu energije, a već 1958. počinje se koristiti u komercijalnim aplikacijama, osobito u svemirskom programu. Krajem 2018. godine u svijetu je instalirano 509,3 GW snage fotonaponskih sustava [1]. To pokazuje veliku zainteresiranost i velika ulaganja u fotonaponske sustave. Iako su razvojem tržišta i tehnologije fotonaponski sustavi pristupačniji malim potrošačima, u smislu zadovoljavanja vlastitih potreba za električnom energijom u kućanstvu, još uvijek nisu konkurentni konvencionalnim izvorima energije. Sve veća potražnja električne energije i smanjenje zaliha konvencionalnih goriva, s druge strane porast efikasnosti i pad cijena fotonaponskih ćelija, približavaju komercijalnu konkurentnost fotonaponskih sustava konvencionalnim izvorima energije. Povećanjem upotrebe fotonaponskih sustava dolazi do ekološkog problema gomilanjem elektroničkog otpada zbog neuređenog sustava za prikupljanje. Europska Unija i Republika Hrvatska (u daljnjem tekstu: RH) su na temelju toga odredila brojne zakone i regulative kako bi se unaprijedio cijeli sustav prikupljanja i razvrstavanja elektroničkog otpada. U radu su obrađene teme o obnovljivoj vrsti energije, uporabi fotonaponskih panela, njihovoj reciklaži na kraju životnog vijeka te zakoni o gospodarenju otpadom. Analizirane su prednosti i nedostaci recikliranja fotonaponskih panela te utjecaj recikliranja na okoliš i ekonomsku dobit. Napravljen je pregled primjera iz prakse kako bi se što bolje prikazao proces recikliranja fotonaponskih panela.

## **1.1. Zadatak završnog rada**

Zadatak završnog rada je objasniti solarnu energiju, rad fotonaponskih panela, materijale od kojih su izrađeni, količine materijala koje se mogu ponovno iskoristiti nakon recikliranja, procese recikliranja i gomilanje zaliha fotonaponskih panela u svijetu.

## 2. SUNCE I SUNČEVA ENERGIJA

Sunce je, kako je poznato, zasigurno najveći izvor obnovljive energije. Upravo takva energija ujedno ima i najmanji štetni utjecaj na okoliš, a bez nje bio bi upitan i život na Zemlji. Ako pođemo od razvoja ljudskoga roda, poznato je da su sunčevu energiju ljudi koristili prvenstveno kako bi potpalili vatru, bez koje ne bi mogli ostvariti mnoge potrebe, a zatim su je počeli koristiti i za konzerviranja hrane i ostale potrebe koje su se razvijale s vremenom [2]. Sunce, kao najveći izvor energije zaslužan je za pokretanje svog života na Zemlji pomoću energije kojom upravlja vremenom, strujama mora i oceana, hidrološkim ciklusom te utječe na svakodnevne aktivnosti čovjeka. Sunce je zvijezda, baš poput zvijezda koje noću vidimo na nebu, ali nam je mnogo bliže, odnosno udaljeno je gotovo 150 milijuna kilometara od Zemlje i nalazi se u središtu našeg Sunčevog sustava te mu je glavna svrha zagrijavati naš planet dovoljno da na njemu može uspjevati život. Već više od 4,5 milijardi godina ova - vruća kugla užarene plazme je pokretač vremena, klime i života na Zemlji. Promjer Sunca iznosi oko 1,39 milijuna kilometara i 109 puta je veći od promjera Zemlje. Temperatura u Sunčevoj jezgri iznosi oko 15 milijuna stupnjeva Celzija. Temperatura na površini Sunca - dijelu kojeg vidimo - iznosi oko 5 500 °C. Tekuća voda na našem planetu postoji zbog Sunčeve topline [3].

Sunce je neophodno kako za održavanje života na Zemlji, tako i za vrijeme te klimu. Sekundarni proizvodi sunčeva zračenja dovode do dobivanja različitih vrsta izvora energije poput hidroenergije, energije vjetra i termalne energije. Solarna energija jedan je od glavnih obnovljivih izvora energije.

Danas se za rješavanje problema energetske krize i znanost počela baviti istraživanjima vezanim za uporabu sunčeve energije. Solarna energija ima višenamjenska korištenja pa se tako može koristiti za potrebe grijanja, kao i za dobivanje energije putem solarnih sustava. RH ne koristi u potpunosti potencijal koji ima vezano za iskorištavanje sunčeve energije, što potvrđuje i podatak da je po ugradnji solarnih sustava na samom dnu rang ljestvice u cijeloj Europi. Sunčeva energija nastaje fuzijom, odnosno nakon spajanja vodikovih atoma nastane helij i oslobodi se velika količina energije.

Ovakva energija se u obliku topline i svjetlosti proširi dalje u svemir, nakon čega određeni dio te energije, premda mali, dospije i na Zemlju. Na takav način se na površini Zemlje može dobiti 1  $kWh/m^2$ , a njezina stvarna vrijednost će zapravo ovisiti o području, godišnjem dobu u kojem se dogodila, određenom dobu dana, kao i vremenskim uvjetima i slično. U RH prosječna vrijednost

dnevne insolacije na horizontalnu plohu iznosi od 3 do 5  $kWh/m^2$  [4]. Sunčeva energija je obnovljivi izvor energije, no generalno najveći propust osoba koje se bave istraživanjem obnovljivih izvora energije je što svoja istraživanja usmjeravaju samo na određene oblike obnovljivih izvora energije ili na cjelinu takvih izvora, a vrlo rijetko fokus stavljaju na sveukupni energetska sustav u kojem bi se trebao naći ili se već nalazi takav obnovljivi izvor energije. Upravo ta činjenica dovodi do bitnog problema, ukoliko pođemo od pretpostavke da je pojedini obnovljivi izvor energije vrijedan onoliko koliko čini vrednijim svojstva cjelokupnog sustava u kojem se vrši promatranje. [5].

## **2.1. Iskorištavanje sunčeve energije**

Kada se govori o iskorištavanju sunčeve energije, vrlo je važno spomenuti da i principe direktnog iskorištavanja sunčeve energije poput solarnih kolektora, fotonaponskih ćelija i fokusiranja energije Sunca. Osim takvog direktnog iskorištavanja sunčeve energije, ona se može iskorištavati i putem aktivnih i pasivnih sustava iskorištavanja. Aktivno iskorištavanje sunčeve energije je danas neizostavno u sustavu suvremene tehnologije za grijanje određenih prostora, jednako tako i hlađenje i proizvodnju električne energije. S druge strane, pasivno iskorištavanje sunčeve energije predstavlja vrstu iskorištavanja te energije primjenom određenih arhitektonskih rješenja.

Svojstvo materijala da prihvaća dovedenu toplinu, u sebi je akumulira te prilikom hlađenja ponovno preda okolini, naziva se akumulacija topline. Tako dobivena toplinska energija omogućava da se određena temperatura znatno ne smanji tokom noći.

Koeficijent akumulacije topline ( $W$ ) je ona količina topline koja se akumulira u građevinski element i to po jedinici površine, a za jediničnu razliku temperatura unutarnjeg i vanjskog zraka, kada je u suštini postignuto stacionarno stanje [6].

### **2.1.1. Aktivno iskorištavanje sunčeve energije**

Kada se sunčeva energija neposredno pretvara u toplinsku energiju, putem uređaja sa zrakom ili tekućim medijem u ulozu kolektora, dobijemo aktivno iskorištavanje sunčeve energije, ali tada strujanje medija zahtjeva postojanje posebne energije. Zagrijani medij se u velikoj većini slučajeva koristi prilikom zagrijavanja sanitarne vode, ali jednako tako se koristi i prilikom zagrijavanja velikih bazena ili staklenika, ali i za recimo sušenje voća. Tako skupljenu energiju potrebno je

sačuvati skladištenjem koju će se koristiti kada sunčeva energija nije na raspolaganju. Stoga se zagrijanu tekućinu skladišti u pomno i precizno izoliranim predviđenim spremnicima, dok se zagrijani zrak skladišti u određenim akumulacijama od kamena. Kada govorimo o aktivnom fotonaponskom iskorištavanju sunčeve energije, tada se pomoću fotonaponskih modula takvu energiju pretvara u električnu energiju. Energiju dobivenu na takav način najčešće se koristi za rasvjetu ili ventilaciju i slične potrebe. Sunčeva energija se može skupljati i skladištiti u akumulatorima. Veliki problem i danas predstavlja opskrbljavanje električnom energijom mjesta na kojima ne postoji izgrađena električna mreža, a izgradnja takve mreže se najčešće i ne planira zbog velikih troškova takve izgradnje. Upravo u takvim situacijama, kao rješenje se nameću fotonaponski sustavi. [6]

### **2.1.2. Pasivno iskorištavanje sunčeve energije**

Upravo pasivni sistem iskorištavanja sunčeve energije primarni je i najisplativiji način iskorištavanja energije iz okoline. Na Sokratovom se modelu kuće već ukazuje i može se zaključiti da su ljudi tisućama godina ranije razmišljali kako da korištenjem pasivne arhitekture zapravo zaštite od utjecaja hladnoće, jednako kao i topline. Postoje određena pravila za korištenje pasivnih solarnih sustava poput pravilne pozicije i orijentacije postojećeg objekta, recimo kuće, prema određenoj strani svijeta, predviđanje velikih staklenih ploha na sunčanoj strani objekta, postavljanja određenih nastrešnica koje prijete prodor svjetlosti u unutrašnjost, a jednako tako je potrebna i dovoljna količina toplinske mase, kao i izolacije. Na jedan takav proces utječu i arhitekti, ali i izvođači radova, sva potrebna dokumentacija vezana za plan prostora, susjedne zgrade, jednako kao i klimatsko – meteorološki uvjeti. Uklapanje dobrog pasivnog sustava za zagrijavanje prostora putem sunčeve energije najbolje je napraviti prilikom projektiranja objekta stoga je mnogo pogodniji za nove nego za već postojeće objekte i zgrade. Ono na što je potrebno posebno obratiti pažnju prilikom projektiranja je upravo dobra prilagodba dijelova površina fasade s južne strane objekta kako bi dobro apsorbirali sunčevu energiju. To će se najbolje postići bojanjem takve površine crnom bojom i zatvaranje staklenom ili plastičnom pločom, na određenoj udaljenosti od zida. Sunčevo zračenje najčešće ulazi kroz predviđene velike staklene stijenke te tako izravno zagrijava određenu prostoriju u objektu. Takva toplina se skladišti u elementima prostorije, odnosno zidovima, podovima ili stropu, odnosno moguće i u posebnim spremnicima na bazi pijeska ili tekućine, koji se tako zagrijevaju preko dana, a daju toplinu preko noći [7].



### 3. FOTONAPONSKI SUSTAVI

Kada fotonaponska ćelija apsorbira sunčevo zračenje, tada se na njezinim krajevima fotonaponskim efektom stvara određena elektromotorna sila, te fotonaponska ćelija postaje izvor električne energije. Sunčevo zračenje također možemo promatrati i kao snop fotona, koji predstavljaju čestice bez naboja koje se gibaju brzinom svjetlosti  $c_0$ .

Energija fotona ( Ensteinova relacija ):

$$E = h \cdot \nu = h \cdot \frac{c_0}{\lambda} \quad (3-1)$$

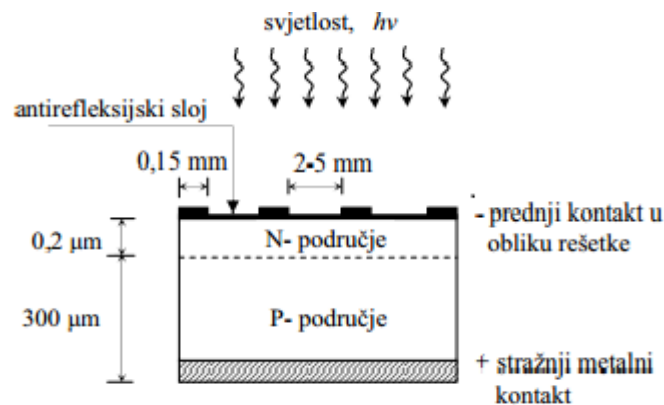
gdje je:

$h$  - Planckova konstanta ( $6,625 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$ )

$\nu$  - frekvencija elektromagnetskog zračenja ( $1/\text{s}$ )

$c_0$  - brzina svjetlosti ( $3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ )

$\lambda$  - valna duljina ( $\mu\text{m}$ )

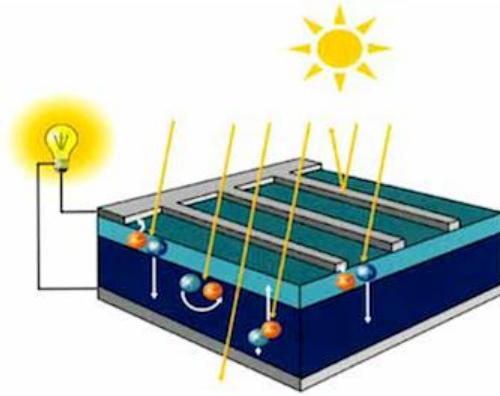


**Slika 3.1.** Silicijeva fotonaponska ćelija [8]

Fotonaponska ćelija je PN-spoj, odnosno dioda. Na površini pločice P-tipa, u silicijskoj fotonaponskoj ćeliji, ubačene su primjese, kao na primjer fosfor, tako da na tankom površinskom sloju nastane područje N-tipa poluvodiča. Kako bi se naboji sakupili, na prednjoj strani nalazi se metalna rešetka, dok je stražnja strana prekrivena metalnim kontaktom. Prednja površina može biti prekrivena antirefleksijskim slojem s ciljem povećavanja djelotvornosti ćelije.

Kada se solarna ćelija osvjetli, na njezinim krajevima se pojavljuje elektromotorna sila, tj. napon. Tako solarna ćelija postaje poluvodička dioda, tj. PN-spoj, i ponaša se kao ispravljački uređaj koji propušta struju samo u jednom smjeru [8].

*Slika 3.2.* Nastanak parova elektron-šupljina u solarnoj ćeliji [8]



### 3.1. Primjena fotonaponskih panela

Poznato je da primjena fotonaponskih panela seže od velikih solarnih elektrana, upotrebe za napajanje svemirskih stanica, do napajanja uređaja za parkiranje i malih vrtnih lampi. Samim time, količina instaliranih fotonaponskih sustava eksponencijalno raste. Primjeri primjene fotonaponskih panela su:

- solarne elektrane (najveća trenutno u kalifornijskoj pustinji Mojave)
  - Opskrba električnom energijom udaljenih domova i gospodarstava
- primjene u telekomunikaciji (udaljene repetitorske instalacije)
- katodna zaštita cjevovoda
- navodnjavanje udaljenih poljoprivrednih zemljišta
- komercijalna primjena:
  - uređaji za naplatu parkiranja
  - male meteorološke stanice
  - vrtne svjetiljke.

Na slikama 3.3. i 3.4. je prikazana komercijalna primjena fotonaponskih panela koja je sve češća i u RH.



**Slika 3.3.** Solarni paneli na kući



**Slika 3.4.** Solarna srednja škola (L.A.)

Na slici 3.5. je prikazana solarna elektrana Gemasolar u Sevilji koja se sastoji od 2.650 velikih zrcala koja služe kao kolektori za prikupljanje i koncentriranje solarne energije, a proizvodi 19,5 MW električne struje.



**Slika 3.5.** Gemasolar u Španjolskoj,  
(15 sati apsorbira sunčevu energiju, a 24 sata daje električnu energiju)

### **3.2. Prednosti i nedostaci upotrebe solarnih panela:**

Premda je uočen veliki porast upotrebe solarne energije, još uvijek postoji mogućnost za povećanjem iskorištenja sunčeve energije. Jednako kao i kod svake dostupne tehnologije, tako i u ovom području postoje određene prednosti kao i nedostaci pri upotrebi.

#### **Prednosti upotrebe solarnih panela:**

- visoka pouzdanost
- najviša ekonomičnost
- nisko troškovi rada
- minimalna potreba za održavanjem
- bez potrebe za dodatnim gorivima
- tehnička jednostavnost
- bez buke
- bez zagađenja
- mogućnost instalacije u mjestima gdje bi drugi oblik energije bilo skupo ili nemoguće dovesti.

#### **Nedostaci upotrebe solarnih panela:**

- početni troškovi (iako razvojem sve pristupačniji, još nisu zanemarivi)
- ovisnost isključivo o sunčevom zračenju (tijekom noći ne proizvode energiju)
- zagađenje zraka utječe na efikasnost solarnih panela
- vremenske neprilike također smanjuju efikasnost
- kompliciran proces akumuliranja energije.

### **3.3. Materijali za izradu fotonaponskih ćelija**

Fotonaponske ploče iz silicija izvide se u više morfoloških oblika i to kao monokristalne, polikristalne i amorfne. Silicij je odmah nakon kisika najrašireniji element u zemljinoj kori, a ima ga 27%.

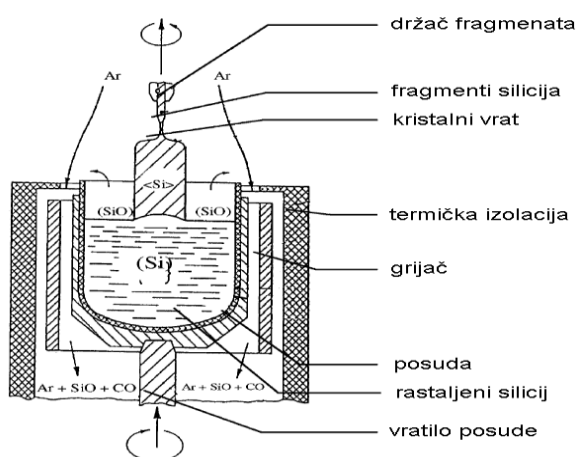
Ploče izrađene od monokristalnog silicija mogu pretvoriti  $1000 \text{ W/m}^2$  sunčevog zračenja u  $140 \text{ W}$  električne energije po  $1 \text{ m}^2$  površine.

### 3.3.1. Osnovni materijali za izradu fotonaponskih ćelija

#### Monokristalni silicij

Razvoj silicijske tehnologije za potrebe izrade tranzistora i integriranih krugova utjecao je na kvalitetu i dostupnost monokristalnog silicija visoke čistoće. To je izravno utjecalo i na razvoj tehnologije fotonaponskih ćelija. U početku su za fotonaponske ćelije korišteni samo monokristali dobiveni tzv. Czochralskijevim postupkom ili tehnologijom lebdeće zone (engl. *floating zone*).

I danas u većini slučajeva prevladavaju ove tehnologije. Na slici 3.8. je prikazana metoda dobivanja monokristalnog silicija Czochralskijevim postupkom.



**Slika 3.6.** Dobivanje monokristalnog silicija Czochralskijevim postupkom

Unutar kvarcne posude koja se nalazi unutar grafitne posude nalazi se polikristalni materijal u obliku fragmenata koji je dobiven od polikristalnog silicija visoke čistoće. Polikristal se tali u prisustvu inertnih plinova indukcijskim putem. Komadići kristala se uranjaju i polako povlače prema dolje pod rotacijom. Pri tome se stvaraju nepravilnosti u kristalnoj rešetci, čak i tamo gdje ih nije bilo prije urona kristala. Da bi se stvorio kristal bez nepravilnosti u kristalnoj rešetci, mora se formirati kristalni vrat debljine oko 3 mm s brzinom rasta od nekoliko milimetara u minuti. Za potrebe tržišta poluvodičima danas se izrađuju kristali promjera 30 cm i više dok se za fotonaponske ćelije izrađuju manji kristali. Uobičajene dimenzije ćelija su  $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ . Okrugli kristali se obično oblikuju u kvadrate s oblim rubovima kako bi se bolje iskoristila

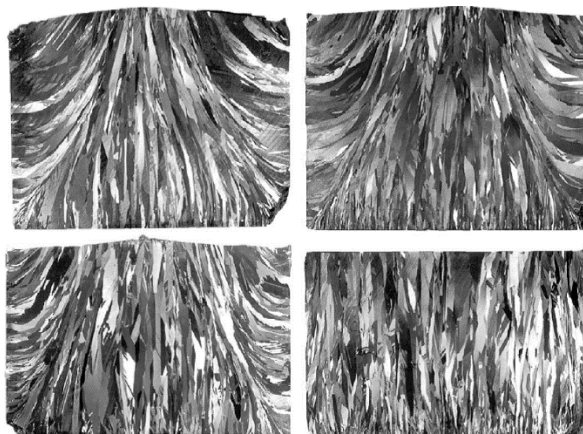
površina fotonaponskih ćelija. Na slici 3.7. prikazana je monokristalna silicijska fotonaponska ćelija.



*Slika 3.7.* Monokristalna fotonaponska ćelija

### **Polikristalni silicij**

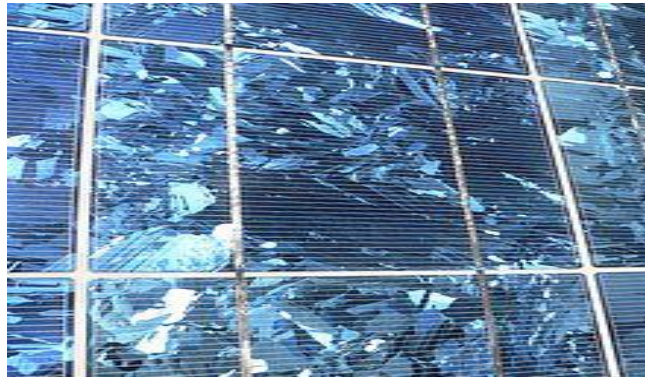
U ukupnoj cijeni fotonaponskih ćelija silicij tvori značajan udio, stoga su uloženi veliki napori kako bi se snizila cijena proizvodnje silicija, što je rezultiralo primjenom lijevanja silicijevih blokova još u sedamdesetim godina prošlog stoljeća. Postupak je takav da se silicij tali i izlijeva u grafitne posude kvadratnog presjeka premazane slojem SiO/SiN, te se kontroliranim hlađenjem dobivaju blokovi polikristalnog silicija s krupnom zrnatom strukturom.



*Slika 3.8.* Poprečni presjek polikristalnih blokova silicija koju su hlađeni pod različitim uvjetima

Veličina zrna je od nekoliko milimetara do nekoliko centimetara. Polikristalni silicij se isključivo koristi za izradu fotonaponskih ćelija. Fotonaponske ćelije izrađene od polikristalnog silicija su

jeftinije od monokristalnih fotonaponski ćelija ali imaju nešto nižu efikasnost. Prednost je što se mogu lako proizvesti u kvadratnom obliku, dok se monokristalne ćelije izrezuju iz izvučenih monokristala koji su kružnog presjeka. Na taj način se polikristalnim rešetkama iskoristi sva površina pri slaganju modula, što rezultira gotovo jednakom učinkovitosti na razini modula.



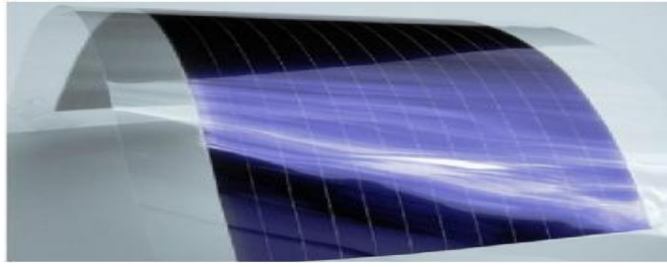
*Slika 3.9.* Polikristalna fotonaponska ćelija

### **Amorfni silicij**

Amorfni silicij ima visok koeficijent apsorpcije što omogućuje izradu vrlo tankih slojeva za solarne ćelije. U amornim materijalima položaji atoma imaju nepravilnu strukturu, tj. nije prisutna pravilnost rešetke dugog dometa, već atomi formiraju kontinuiranu nasumičnu mrežu. Neki atomi nisu četverostruko vezani i uslijed toga neki atomi moraju imati neispunjenu valentnu vezu, što može dovesti do anomalija u električnim svojstvima materijala. Materijal može biti pasiviziran vodikom koji se veže za neispunjene valentne veze čime se znatno smanjuje gustoća neispunjenih valentnih veza. Hidrogenizirani amorfni silicij ima dovoljno nisku razinu nepravilnosti da bi se mogao koristiti u uređajima. Međutim, hidrogenizacija utječe na optička svojstva materijala. U prvih 6 do 12 mjeseci materijal je u stanju visoke degradacije, ali se nakon tog prijelaznog perioda njihova efikasnost stabilizira na vrijednost propisanu tvorničkim standardima.

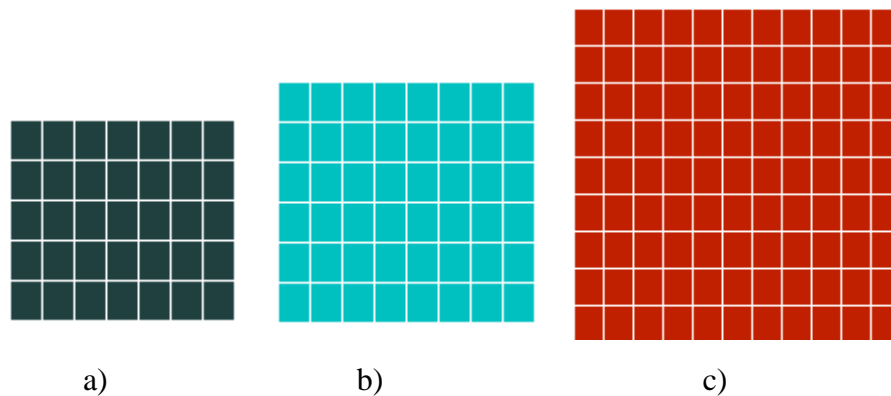
Amorfni silicij se uglavnom koristi za uređaje koji zahtijevaju relativno malu snagu za rad, poput kalkulatora. Tako se njihova manja efikasnost u usporedbi s kristalnim silicijem nadomješta jednostavnijom izradom i nižom cijenom. Ali isto tako se koriste i za veće površine gdje se manja efikasnost nadomješta slaganjem nekoliko tankih slojeva amornog silicija jednih na druge. Tu metodu je nemoguće primijeniti kod ćelija kristalnog silicija zbog njihove neprozirnosti, odnosno debljine. Ćelije od amornog silicija koriste oko 1% silicija potrebnog za izradu ćelije od kristalnog silicija što uvelike smanjuje cijenu ćelija. Međutim visoka cijena proizvodnje višeslojnih ćelija od

amornog silicija čini ih nekonkurentnim na tržištu. Na slici 3.10. je prikazana fotonaponska ćelija proizvedena od tankoslojnog amornog silicija [9].



**Slika 3.10.** Fotonaponska ćelija od tankoslojnog amornog silicija

Na slici 3.11. je prikazana usporedba površina monokristalnih, polikristalnih i amornih ćelija koje su potrebne da se proizvodi 1 kW električne energije.



**Slika 3.11.** Tipovi solarnih ćelija (potrebna površina za proizvodnju 1kW električne energije):

a) Monokristalne visokoučinske solarne ćelije (Si)  $7-9m^2$ ,  $6-7m^2$ , b) Polikristalne solarne ćelije (Si)  $7,5-10m^2$ , c) Amorfne silicijske ćelije  $12-20m^2$

### 3.3.2. Drugi materijali za izradu fotonaponskih ćelija

Materijali koji se koriste za posebne vrste solarnih ćelija:

- Tankoslojni kristalni silicij
- Tankoslojni Kandijev telurid fotonaponski modul
- Bakar indij selen
- Galij-arsenid
- Fotoosjetljivi pigmenti
- Organske/polimerne solarne ćelije



## 4. RECIKLIRANJE SOLARNIH PANELA

Recikliranje je izdvajanje materijala iz otpada radi njihovog ponovnog korištenja. Uključuje skupljanje, izdvajanje, preradu i izradu novih proizvoda iz iskorištenih materijala. Uloga recikliranja je uglavnom ekonomska i ekološka, a prednosti su velike, poput čuvanja zaliha neobnovljivih izvora sirovina preradom odbačenih materijala. O važnosti recikliranja govori podatak da se 55% svjetske proizvodnje čelika i 40% svjetske proizvodnje bakra dobije recikliranjem sekundarnih sirovina.

- ušteda energije pri dobivanju materijala iz sekundarnih sirovina. U odnosu na dobivanje iz primarnih sirovina uštede kod željeza i čelika iznose oko 74 %, kod bakra 85 %, kod aluminija 95 %, kod olova 65 %, kod cinka 60 % i preko 80 % kod polimera.

- zaštita okoliša smanjivanjem količine deponiranog otpada u okolini. Američka agencija za zaštitu okoliša (EPA) prepoznaje šest najznačajnijih dobiti koje nastaju kada se čelik dobiva iz sekundarnih sirovina umjesto od prirodne sirovine, a to su:

- 97 % manje rudarskog otpada
- 90 % manja potrošnja primarnih sirovina
- 86 % smanjenje onečišćenja zraka
- 76 % smanjenje onečišćenja vode
- 74 % uštede energije
- 49 % smanjenje utroška vode

Zbog sve veće važnosti recikliranja pojavila se potreba vrednovanja kako materijala tako i proizvoda ponovnoj uporabi. To novo obilježje proizvoda naziva se recikličnost proizvoda.

Odbačeni električni i elektronički proizvodi su jedan od najvećih izvora onečišćenja u ukupnom otpadu. Pod pojmom električni i elektronički proizvodi se podrazumijevaju oni proizvodi koji u svom radu koriste električnu struju ili elektromagnetsko polje, odnosno čija je funkcija proizvesti, prenijeti i mjeriti takvu struju ili polje, a projektirani su da podnesu napone do 1000 V.

Problemi ograničenih prirodnih resursa te potrebe održivog razvoja potiču i razvoj proizvoda pogodnih razgradnji i recikliranju. Cilj je što veći dio proizvoda iskoristiti kao gotov oblik ili kao sirovinu u proizvodnji istog ili novog proizvoda. Prema tome neuporabljivi dio proizvoda za daljnju uporabu ili štetan za okoliš treba svesti na što manju mjeru. Kako bi se ovaj proces i

tehnički i ekonomski uspješno sproveo na prvom mjestu je odgovoran konstruktor koji mora istražiti načine spajanja dijelova, povećanje efikasnosti rastavljanja, snošljivosti materijala i slično. Zato treba proučiti metode razvoja i konstruiranja proizvoda te težiti razvoju proizvoda prikladnih za rastavljanje. Vezano za to treba:

- definirati pojam rastavljanja proizvoda
- sistematizirati preporuke za konstruiranje rastavljanju prikladnih proizvoda
- analizirati preporuke vrednovanja rastavljlivosti proizvoda
- odrediti ili uvažiti kriterije vrednovanja rastavljanju prikladnih proizvoda
- sistematizirati pravila konstruiranja i oblikovanja novih, rastavljanju prikladnih proizvoda [10].

*Slika 4.1.* Međunarodni simbol za recikliranje [10]



#### **4.1. Recikliranje solarnih panela i dostupne tehnologije**

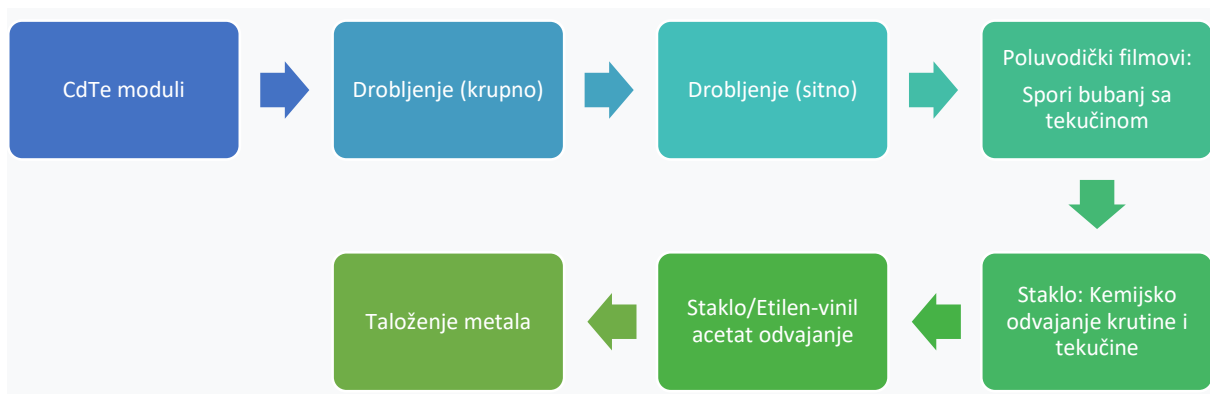
Solarni paneli se u velikoj mjeri mogu reciklirati. Materijali poput stakla, aluminijske i poluvodiča mogu, teoretski, biti obnovljeni i ponovo upotrijebljeni. Stoga je od najveće važnosti da potrošači, industrija i proizvođači električne energije preuzmu odgovornost za zbrinjavanje ovih modula. Do sada najčešće metode za recikliranje fotonaponskih modula napravljenih od kristalnog silicija temelje se na mehaničkim, toplinskim i kemijskim postupcima. Iako tankoslojne solarne ćelije koriste daleko manje materijala od kristalnog silicija postoje problemi vezani uz to poput dostupnosti i toksičnosti materijala kao što su telur (Te), indij (In) i kadmij (Cd). Zbog tih pitanja vrlo je važno usredotočiti se na tehnologije recikliranja solarnih sustava.

Tvrtka "PV Cycle" je neprofitna organizacija čiji je cilj upravljanje otpadom kroz njihov program gospodarenja otpadom za solarne tehnologije. Tvrtka "PV Cycle" prva je uspostavila proces recikliranja solarnih panela i logistike solarnog otpada u cijeloj EU. Godine 2016. njihov proces recikliranja solarnih panela postigao je rekordnu stopu recikliranja od 96% za module od kristalnog silicija. Proces započinje uklanjanjem kablova, razvodne kutije i okvira iz solarnih panela. Zatim se panel usitnjava, te se razvrstavaju i odvajaju usitnjeni komadi. Razdvajanje materijala omogućava njihovo slanje na određene postupke recikliranja povezane sa svakim materijalom. Dijagram toka tehnološkog postupka prikazan je na slici 4.2.



**Slika 4.2.** Tehnološki postupak recikliranja solarnih panela

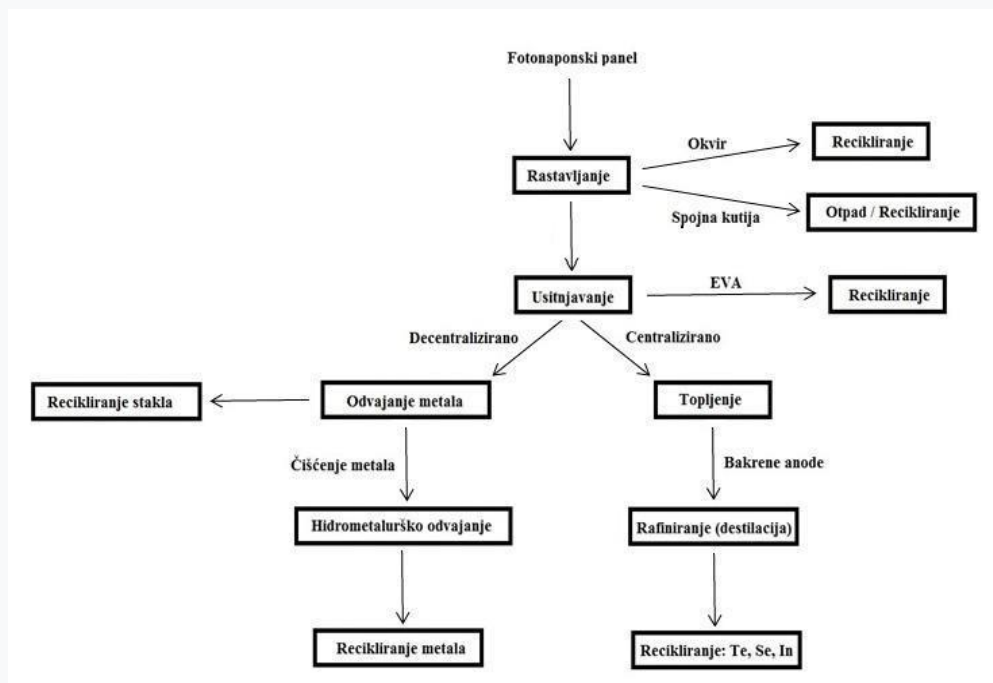
Tvrtka "FirstSolar" razvila je postupak recikliranja CdTe panela. Tvrtka prikuplja i prevozi solarne panele koje je potrebno zbrinuti do centra za recikliranje; međutim, postupak recikliranja kao takav se mora financirati. To se postiže izdvajanjem sredstava od strane same tvrtke iz cijene postavljene u vrijeme prodaje panela. Dijagram toka ovog tehnološkog postupka prikazan je na slici 4.3.



**Slika 4.3.** Tehnološki postupak recikliranja CdTe panela

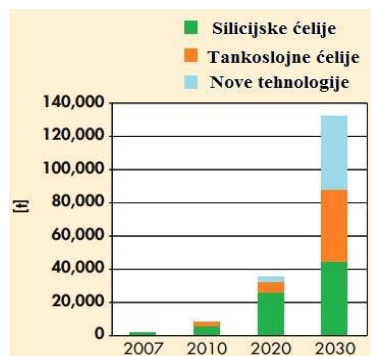
Postupak recikliranja započinje drobljenjem modula u krupne komade, a potom mlinom čekićarom u fragmente manje od 5 mm. Tijekom sljedećih 4 do 6 sati poluvodičke folije uklanjaju se u bubnju

za sporo ispiranje. Ostatak stakla izložen je smjesi sumporne kiseline i vodikovog peroksida koja ima za cilj postići optimalni omjer između krutih i tekućih tvari. Nakon tog postupka staklo se ponovo odvoji. Sljedeći korak je odvajanje stakla od većih komada etilen vinil acetata (EVA), putem vibracijskog sita. Staklo se čisti i šalje na recikliranje. Natrijev hidroksid koristi se za taloženje metalnih spojeva, nakon čega se oni odvoze drugoj tvrtki gdje se mogu preraditi u sirovine s poluvodičem za upotrebu u novim solarnim modulima. Ovim se postupkom dobiva 90% stakla za upotrebu u novim proizvodima i 95% poluvodičkih materijala za upotrebu u novim solarnim modulima [11]. Životni vijek fotonaponskih panela dijeli se na tri faze: proizvodnju, uporabu i odlaganje ili odbacivanje na kraju životnog vijeka. Najčešća oštećenja na fotonaponskim panelima su lom stakla, raslojavanje, električni kvarovi i neadekvatna konstrukcijska tehnologija. Međutim, zbog procesa trajnog poboljšavanja takvih sustava, instalirani se sustavi zamjenjuju panelima koji su u takvim situacijama učinkovitiji. Ono što se javlja kao posljedica toga je činjenica da distributeri zapravo demontiraju fotonaponske panele te ih zatim vraćaju proizvođačima zbog popravka ili recikliranja s ciljem dobivanja sirovina koje se nakon toga ponovno iskorištavaju u određenom proizvodnom procesu. Na slici 4.4. je prikazan postupak recikliranja fotonaponskih panela.



**Slika 4.4.** Shematski prikaz postupka recikliranja fotonaponskih panela [12]

Zbog iznimno dugog životnog vijeka panela, vrlo je teško utvrditi preciznu količinu otpada, ali postoji podatak da ta količina u EU 2008. godine iznosila oko 3800 tona. Određena predviđanja pokazuju da se do 2030. godine očekuje porast takve količine otpada na 130 000 tona (Sl.4.5.) [13].



*Slika 4.5.* Procijenjena količina otpadnog materijala prema tehnologiji panela [13]

Prema danas dostupnim informacijama, oko 90 % fotonaponskog otpada sastoji se od silicijskih ćelija, dok ostalih 10 % čine tankoslojne ćelije, a to uključuje CIS/CIGS, CdTe, amorfne i mikrokristalne tehnologije. Međutim, postotak tankoslojnih ćelija povećat će se na 20 % do kraja 2020. godine. Do 2030. godine bi se udio različitih vrsta tehnologija mogao izjednačiti, a što je jasno vidljivo u tablici 4.1. koja prikazuje sastav raznih fotonaponskih panela.

**Tablica 4.6.** Udio materijala pri recikliranju silicijskih i tankoslojnih fotonaponskih panela [13]

	Kristalni silicij (c-Si)	Amorfni silicij (a-Si)	CIS (bakar indij diselenid)	CdTe (kadmij telurid)
<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>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

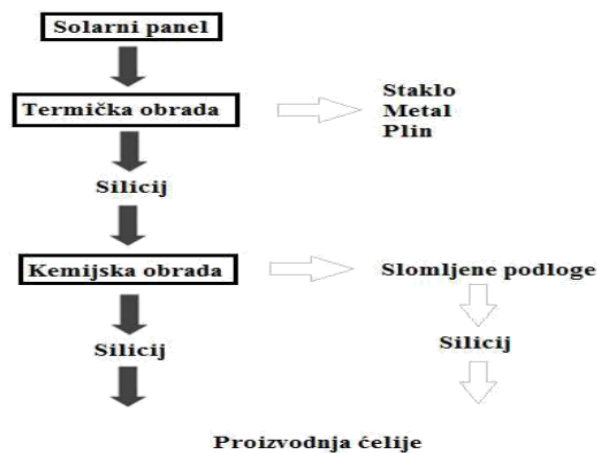
Fotonaponske tvrtke još uvijek nisu uspjele postići zadovoljavajuće udjele čistih materijala prilikom recikliranja starih solarnih panela. To se naziva "downcycling", a za posljedicu ima slabu prodaju popraćenu velikim troškovima odlaganja, koji se tada moraju pokriti dodatnim naknadama [14]. Tvrtka "PV Cycle" bavi se prikupljanjem istrošenih fotonaponskih panela u zemljama EU, kao i državama koje su članice Europskog gospodarskog prostora poput Švicarske, Islanda, Norveške i Lihtenštajna. Najveći broj modula na kraju životnog vijeka je iz zemalja koje imaju poprilično razvijenu fotonaponsku industriju - Njemačka, Španjolska i Italija. Nakon što se prikupe modeli koji su na kraju životnog vijeka, oni se isporučuju dalje onim tvrtkama koje se bave recikliranjem, a s kojima je tvrtka "PV Cycle" u poslovnom partnerstvu.

## 4.2. Dostupne tehnologije recikliranja fotonaponskih panela

### 4.2.1. Recikliranje fotonaponskih panela na bazi silicija

Postupkom recikliranja fotonaponskih panela na bazi silicija, kao krajnji reciklati dobiju se staklo, metali, plastika i silicij. Danas poznatom tehnologijom može se reciklirati i do oko 80 %

fotonaponskog panela. Postupak samog recikliranja fotonaponskog panela započinje skidanjem i rastavljanjem aluminijskog okvira od ostatka panela. Postupak skidanja se najčešće izvodi ručno, upravo zbog različitih dimenzija i spojeva okvira. Nakon postupka skidanja okvira slijedi demontiranje razvodne kutije. Fotonaponski panel bez okvira i razvodne kutije sastoji se, dakle, samo od silicijske ćelije laminirane u sloj EVA. Na slici (slika 4.7.) je prikazan dijagram tijeka recikliranja fotonaponskih panela tvrtke *Deutsche Solar AG*. Proces recikliranja sastoji se od dva glavna dijela.



**Slika 4.7.** Tijek recikliranja fotonaponskih solarnih panela tvrtke *Deutsche Solar AG* [16]

U prvom dijelu postupka spaljuje se laminat, kako bi se znatno olakšalo ručno rastavljanje. Kod ćelija od kristalnog silicija, metalizacija, antirefleksijski sloj i p-n spojevi se uklanjaju jetkanjem. Recikliranje solarne ćelije može se izvršiti jetkanjem na tehničkoj razini, a površinski sloj se ponekad može i prilagoditi pojedinim zahtjevima samoga kupca.

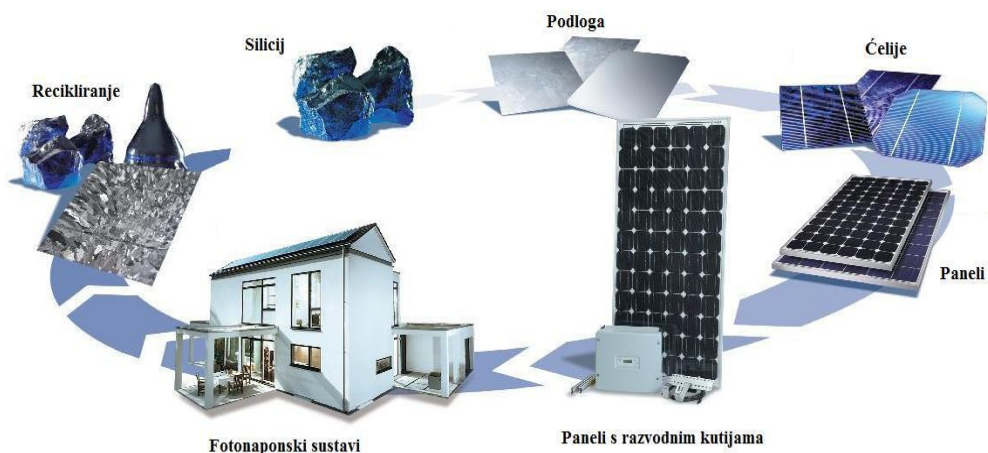
Jasno je da kontroliranje procesa toplinske obrade ovisi u najvećoj mjeri o konstrukciji samoga panela. Vrsta laminata i dimenzije panela također utječu na tijek postupka. Toplinski tijek u komori za dogorijevanje ovisi o ispušnim plinovima koji nastaju tijekom toplinske obrade materijala.

Tijekom prvog toplinskog koraka spaljuje se laminat Pellworm panela, dok su se ćelije oslobodile i tada se paneli mogu rastaviti na dijelove:

- neoštećene ćelije
- oštećene ćelije
- okviri od nehrđajućeg čelika

- staklo.

Male dimenzije Pellworm panela te poprilično velika debljina ugrađenih ćelija od 0,4 mm, rezultiraju s 84,9% netaknutih ćelija. Kemijska obrada uključuje nekoliko faza poput odvajanja metalnih dijelova, otapanja antirefleksijskog sloja i jetkanja silicijskih podloga, s ciljem odvajanja n-dopiranog emitera. U nekoliko selektivnih koraka jetkanja uklonjeni su svi slojevi pomoću nekoliko različitih kiselina i mješavina kiselina. Postupke jetkanja potrebno je prilagoditi za različite tehnologije ćelija, a koje se koriste za izradu solarnih panela. Ne postoji univerzalni postupak koji može imati opću primjenu. Za različite ćelije potrebno je prilagoditi i različite korake procesa [16].



*Slika 4.8.* Shema procesa recikliranja fotonaponskih panela na bazi silicija [17]

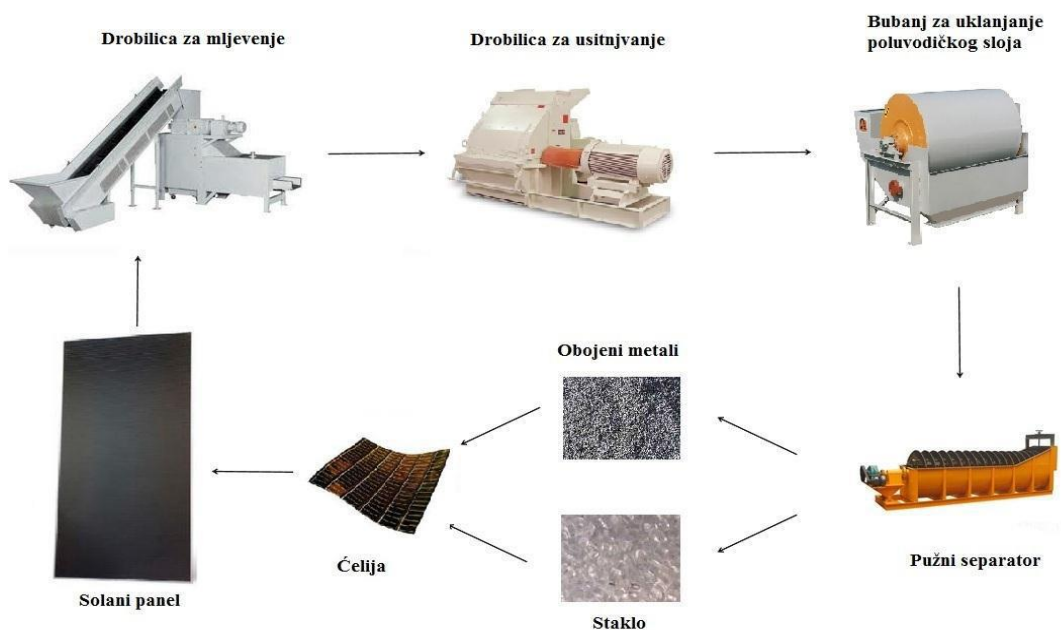
#### 4.2.2. Recikliranje fotonaponskih panela na bazi kadmij telura

Recikliranje fotonaponskih panela na bazi kadmij telura (CdTe) je razvila američka tvrtka “*First Solar*”. Njihovo recikliranje se sastoji od nekoliko ključnih koraka:

- usitnjavanje i mljevenje – prikupljeni paneli se prvo melju u drobilicama na velike komade, a potom se u drobilicama za usitnjavanje usitnjuju na komadiće veličine 4 do 5 mm. To osigurava da je laminirana veza EVA polimera slomljena, a upravo to omogućava sljedeći korak u postupku 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 daljnju upotrebu,
- taloženje - tekućina odvojena u trećem koraku bogata je metalima pa se vrši taloženje gdje se skupljaju i zgrušavaju te pakiraju za daljnje postupke iskorištavanja [18].



*Slika 4.9.* Proces recikliranja fotonaponskih panela na bazi kadmij telura [18]

### 4.3. Utjecaj recikliranja fotonaponskih panela na okoliš

Nekoliko studija analiziralo je utjecaj procesa recikliranja FN modula na okoliš. Taj proces ima prednosti i nedostataka s obzirom na sve faze, od prikupljanja FN modula do kraja procesa recikliranja. Studija zaštite okoliša napravljena za projekt European Full Recovery End-of-Life Photovoltaic (FRELPE), projekt je pokazao da utjecaji na okoliš zbog procesa recikliranja kristalnog silicija potječu od spaljivanja polimera i nekih kemijskih i mehaničkih obrada (prosjavanje, ispiranje kiselinom, elektroliza i neutralizacija) za povrat metala [19].

Uz to, prije ponovnog korištenja recikliranog silicija iz solarnih ćelija, potrebna je daljnja kemijska obrada. Kemijski postupci mogu imati utjecaj na okoliš. Uz to, važno je napomenuti da nijedan

postupak još ne može reciklirati 100% oporabljenih materijala iz solarnih modula [13]. Usporedbom scenarija za recikliranje kristalnog silicija i fotonaponskih panela na kraju životnog vijeka, utvrđeno je da su utjecaji okoliša na proces recikliranja manji nego na odlagalištu, pod pretpostavkom da se reciklirani resursi vraćaju u proizvodnju PV stanica i modula. Ovi su rezultati smatrali da postupak recikliranja uključuje demontažu, ponovno taljenje, toplinske i kemijske obrade [20]. Može se vidjeti da postoje mogućnosti i izazovi vezani uz procese recikliranja PV-a. Iako se već pokazalo da postoje koristi za okoliš, metode recikliranja se još trebaju poboljšati kako bi se postigle bolje stope uporabe i radilo na problemima transporta.

#### **4.4. Ekonomski aspekti recikliranja fotonaponskih panela**

Oporaba vrijednih materijala tijekom recikliranja PV modula može imati veliku ekonomsku vrijednost. Vađenje sekundarne sirovine iz fotonaponskih panela na kraju životnog vijeka, ako je provedeno na učinkovit način, može rezultirati njihovim ponovnim stavljanjem na tržište. Fotonaponski paneli koji dođu do njihovog kraja životnog vijeka, sastavit će se u velike zalihe utjelovljenih sirovina koje se mogu obnoviti i postaju ponovo dostupni za drugu upotrebu ili čak za solarne ćelije. Međutim, to se neće dogoditi prije 2025. prema nekim prognozama [21]. International Technology Roadmap for Photovoltaic grupacija (ITRPV) predviđa da će, do 2030., ukupna materijalna vrijednost recikliranih fotonaponskih panela dostići 450 milijuna USD. S ovom količinom moguće je proizvesti 60 milijuna fotonaponskih panela (18 GW), što je otprilike 33% proizvodnje u 2015. godini [22].

#### **4.5. Gospodarenje elektroničkim otpadom u Europskoj uniji**

Europska unija (u daljnjem tekstu: EU) zadnje desetljeće počela se intenzivnije baviti pitanjima zaštite okoliša i zbrinjavanja otpada, posebice zbrinjavanja elektroničkog otpada. Tako je EU donijela Direktivu Europske zajednice 2008/98/EZ o otpadu, tzv. Okvirnu direktivu o otpadu, koja je usvojena 19. studenoga 2008. godine, a kojom se uspostavlja zakonodavni okvir za gospodarenje otpadom u Europskoj Zajednici, danas EU. Upravo tom direktivom određuju se određeni ključni pojmovi poput otpada, uporaba i zbrinjavanja, a jednako tako uvode se i osnovni uvjeti i zahtjevi za ispravno gospodarenje svim otpadima, a posebno se ističe obveza svih ustanova i poduzeća koja obavljaju procese gospodarenja otpadom da moraju posjedovati dozvolu, odnosno biti registrirani. Osim toga, definiraju se i obveze država članica da izrade samostalne i jedinstvene planove

gospodarenja otpadom koje će slijediti. Navedenom Direktivom se utvrđuju i određena načela, vezana za gospodarenje otpadom, kao što je zabrana gospodarenja otpadom koje ima negativan utjecaj na okoliš ili opće zdravlje ljudi, kao i poticaj primjenjivanja rangiranja određenog otpada prema načelu „onečišćivač plaća”. Osim toga, vrlo je bitna činjenica koja se ističe a to je zahtjev da nastale troškove zbrinjavanja otpada moraju podmiriti posjednici otpada, prethodni posjednik ili proizvođačkonkretnog proizvoda od kojih je sam otpad i nastao [23].

Klasifikacija i rangiranje određenog otpada kao opasnog, trebalo bi se temeljiti na zakonodavstvu EU o kemikalijama, a osobito s obzirom na klasifikaciju i rangiranje određenih opasnih tvari, jednako kao i granične vrijednosti sadržaja koje se koriste u tu svrhu. Svaki otpad, označen kao opasan, bi se trebalo redovito kontrolirati u skladu sa strogo određenim specifikacijama i time se u najvećoj mjeri spriječilo i ograničilo negativne učinke neodgovarajućeg i neodgovornog gospodarenja opasnim otpadom na okoliš i zdravlje ljudi. Prema članku 3. st. 1. Direktive "otpad" pretpostavlja svaku tvar ili predmet koji posjednik odbacuje, odnosno mora odbaciti, dok je prema istom članku st. 2. "opasan otpad" definiran kao otpad koji posjeduje jedno ili više opasnih svojstava. Jednako tako, prema članku 3. st. 9. Direktive "gospodarenje otpadom" znači skupljanje, prijevoz, uporaba i zbrinjavanje otpada, uključujući nadzor nad takvim postupcima i naknadno uredno održavanje lokacije zbrinjavanja takvog otpada, a nerijetko obuhvaća i druge radnje koje poduzimaa trgovac ili posrednik [23].

Direktiva 2012/19/EU Europskog parlamenta i vijeća od 4. srpnja 2012. o otpadnoj električnoj i elektroničkoj opremi (u daljnjem tekstu: Direktiva o otpadnoj električnoj i elektroničkoj opremi) je posljednja donesena direktiva od strane EU u području zaštite okoliša koje zadire u zbrinjavanje otpada i ona nadopunjuje tzv. Okvirnu direktivu o otpadu. Ciljeva politike zaštite okoliša EU ima velik broj, a najbitniji od njih su usmjereni na očuvanje, zaštitu, kao i povećanje kvalitete okoliša, zaštite zdravlja ljudi. Osim toga ciljevi obuhvaćaju i umjereno te nadasve razumno iskorištavanje svih prirodnih izvora, odnosno resursa. Politika zaštite okoliša u EU temelji se na načelu predostrožnosti i opreza te načelu preventivnog djelovanja. Osim toga vodi se i određenjem da bi eventualnu štetu koja je nanesena okolišu prvenstveno trebalo ispravljati na izvoru nastanka takve štete, a da bi odgovornost trebao snositi onečišćivač[24]. U dokumentu pod nazivom Program politike i djelovanja EU u vezi s okolišem i održivim razvojem, istaknuto je da postizanje efektivnog održivog razvoja zahtijeva velike izmjene u dosadašnjim načinima i ustaljenim obrascima razvoja i proizvodnje, kao i potrošnje. Takav program se definitivno zalaže za znatno smanjivanje velike potrošnje svih prirodnih resursa, kao i akcije za prevenciju onečišćavanja okoliša i zdravlja ljudi. U programu se otpadna električna i elektronička oprema (OEEO) ističe kao

jedno od ciljanih područja u koje treba uložiti mnogo truda i koje svakako treba urediti, a sve u skladu s načelima sprječavanja, uporabe i sigurnog zbrinjavanja opasnog otpada [25].

Kao posljedica širenja i povećanja tržišta i skraćivanja inovacijskih ciklusa, oprema za reciklažu se sve brže zamjenjuje, što posljedično tome EEO smješta u brzorastuće izvore otpada. Dok je Okvirna direktiva o otpadu napravila velik pomak u smanjenju opasnih tvari iz otpada, a koji se nalaze u novom EEO-u, opasne tvari poput žive, kadmija, olova, šesterovalentnog kroma i polikloriranog bifenila, kao i drugih opasnih tvari koji utječu na oštećenje ozonskog omotača i dalje će biti prisutne u OEEO-u. Recikliranje EEO otpada ne provodi se niti blizu u dostatnoj mjeri, a upravo to dovodi do gubitka velikih vrijednih resursa. Svrha Direktive o otpadnoj električnoj i elektroničkoj opremi je da na određen način doprinese održivoj proizvodnji i potrošnji, s glavnim ciljem da spriječi nastajanje OEEO-a, te kroz ponovnu uporabu i korištenje, recikliranje. Osim toga, svrha direktive je i smanjenje zbrinjavanje otpada kao i doprinos učinkovitom i funkcionalnom iskorištavanju takvih resursa, samim time i dobivanje vrlo vrijednih sekundarnih sirovina [26].

Odbačeni EE uređaji, uređaji su koji su proizvedeni iz različitih udjela materijala poput stakla, metala ili plastike. Proces reciklaže može varirati, jasno ovisno o vrstama i kakvoći materijala koji se puštaju u proces recikliranja, kao i o korištenim tehnologijama u tom postupku. Postupak recikliranja EE-otpada dijeli se na četiri faze, a to su prikupljanje, transport, rezanje, sortiranje i razdvajanje te priprema za prodaju recikliranog materijala [27].

Sakupljanje svih tih materijala za postupak recikliranja, kao i za transport, dvije su preliminarne, odnosno početne faze svakog postupka reciklaže. S ciljem prikupljanja takvih otpada, sve češće se grade i otvaraju reciklažna dvorišta u kojima je moguće pronaći kante i kontejnere specifične za prikupljanje EE-otpada, a ponegdje se mogu vidjeti i elektroničke kabine za odvoz takvog otpada. Nakon prikupljanja, sav skupljeni otpad se prevozi dalje u odjeljenja za recikliranje. Nakon što se odrade navedene dvije faze, EE-otpad mora u vrlo kratkom roku biti obrađen te razdvojen na istovjetne vrste materijala koji se mogu naknadno koristiti za izradu novih proizvoda. Ispravno i uspješno odvajanje materijala prvi je preduvjet, kao i temelj svakog postupka recikliranja, a posebno elektroničke i električne opreme. Nakon početnog usitnjavanja EE-otpada, ako je taj postupak napravljen uspješno, olakšava se daljnje razvrstavanje te odvajanje plastika od metala, kao i postojećeg unutarnjeg strujnog kruga. Upravo zato se EE-otpad usitnjava na komadiće od 100 mm, kako bi se što lakše pripremio za daljnje razvrstavanje. Nakon toga se odvajaju metali, korištenjem jakog nadzemnog magneta. Nakon toga slijedi mehanička obrada koja se bavi odvajanjem aluminija, bakra i pločica od strujnog kruga, a koji je danas većinom od plastike.

Odvajanje stakla od plastike odvija se korištenjem vode, koja se zasniva na razlici u gustoći, što znači da će plastika u vodi plutati, a staklo tonuti [27].

Kako ne bi sve bilo pozitivno, važno je napomenuti i da recikliranje EE-otpada ima naravno i svoje negativne strane. Jedan o takvih negativnih strana se ogleda u tome da velika većina prikupljenog EE-otpada iz razvijenih zemalja, završi na reciklaži u nerazvijenim zemljama, a gdje još uvijek nema zakonskih regulativa. Jednako tako, ističe se i pad u kvaliteti EE-otpada, kao i nepobitna činjenica da neki od uređaja jednostavno nisu stvarani za postupak recikliranja i ponovnu uporabu istih[27].

Direktiva o ograničenjima za upotrebu opasnih tvari usvojena je u veljači 2003. godine. Upravo tom se direktivom ograničila uporaba taksativno navedenih šest kategorija opasnog materijala u proizvodnji različitih vrsta elektroničke i električne opreme. Vrlo usko je povezana i s Direktivom o električnom i elektroničkom otpadu. Ova Direktiva je često nazivana "direktivom bez olova", a ograničava upotrebu olova, žive, kadmija, šestvalentnog kroma, polibromiranog bifenilija i polibromiranog difenil etera [28].

#### **4.6. Gospodarenje elektroničkim otpadom u Republici Hrvatskoj**

U Republici Hrvatskoj (u daljnjem tekstu: Hrvatska) je do početka devedesetih godina postojao trend nekontroliranog otpada što je dovelo do problema neodrživog gospodarenja otpadom, a dakako da je imalo i velik negativan utjecaj na zaštitu okoliša. Nepostojanje zakonskog okvira i svijesti građana o razvrstavanju otpada, bili su ključni problemi. Nadležne institucije su, potaknute time, odlučile pokrenuti se po pitanju uređenja gospodarenja otpadom i zaštite okoliša u Hrvatskoj. Tako je Zakonom o otpadu, Hrvatski sabor 14. listopada 2005. donio Strategiju gospodarenja otpadom u Hrvatskoj [29], a 2007. godine i njezin provedbeni dokument, odnosno Plan gospodarenja otpadom u Hrvatskoj za vremensko razdoblje od 2007. do 2015. Godine [30]. Ovakav zakonski okvir bio je temeljen na općim načelima o gospodarenju otpadom koje je postavila EU, a svrha donošenja je bila stvaranje realnog okvira za smanjenje količine nastalog otpada te gospodarenje postojećim otpadom. Početkom svibnja 2013. godine donesen je i Zakon o održivom gospodarenju otpadom koji se u svojoj osnovici prvenstveno osvrće i bavi temom održivog gospodarenja otpadom. Zakon je pripremljen u skladu s načelima zaštite okoliša propisana postojećim zakonodavnim okvirom u Hrvatskoj, kao i pravnom stečevinom EU. Zakon o održivom gospodarenju otpadom utvrđuje određene mjere s ciljem sprječavanja i smanjenja

određenog štetnog djelovanja otpada, kao i opasnog otpada na ljudsko zdravlje te okoliš, a na način da se smanji količina takvih otpada koji su u nastanku ili proizvodnji. Osim toga, uređuje se i gospodarenje takvim otpadom bez nastanka opasnih postupaka, a uz korištenje vrijednih svojstava toga otpada[31].

Pravilnikom o gospodarenju otpadnom električnom i elektroničkom opremom određene su mjere za zaštitu okoliša i zdravlje ljudi. Takvo smanjenje štetnih utjecaja postiže se smanjivanjem ili potpunim nestankom svih štetnih čimbenika nastalih gospodarenjem otpadom, električnom i elektroničkom opremom, jednako kao i smanjenjem korištenja prirodnih resursa te poboljšanjem učinkovitosti u tom području, doprinoseći tako i održivom razvoju. U navedenom pravilniku propisane su sve obveze i odgovornosti osoba koje su uključene u životni ciklus električne i elektroničke opreme, poput dizajnera, konstruktora, proizvođača, prodavatelja i korisnika. Osim toga, posebno su propisane obveze i odgovornosti osoba uključenih u skupljanje i uporabu EE otpada u skladu s Direktivom o otpadnoj električnoj i elektroničkoj opremi.[32].

Zakonom o fondu za zaštitu okoliša i energetske učinkovitost osnovao se Fond za zaštitu okoliša i energetske učinkovitost. Istim zakonom se uređuju i pitanja ustrojstva fonda, kao i djelatnosti, izvori financiranja, namjene. Fond je prema svojim nadležnostima usmjeren na djelatnosti iz područja "očuvanja, održivog korištenja, zaštite i unaprjeđivanja okoliša, kao i energetske učinkovitosti te korištenja obnovljivih izvora energije" [33].

Zakonom o zaštiti okoliša, u okviru nadležnosti, navedeno je da se odnose na zaštitu okoliša u okviru održivog razvoja zaštite sastavnice okoliša, te zaštite okoliša od utjecaja opterećenja, kao i opću politiku zaštite okoliša te druga pitanja određena tim zakonom [34].

## 5. ZAKLJUČAK

U ovom radu napravljen je pregled dostupnih tehnologija recikliranja fotonaponskih panela, koristeći se primjerima iz prakse, kako bi se što bolje pojasnio sam postupak, kao i njegova svrha. Korištenje obnovljivih izvora energije putem fotonaponskih panela budućnost su EU i svijeta, a recikliranje takvih panela pitanje je koje ne smije ostati nerazriješeno. Zbrinjavanje FN na kraju njihovog životnog ciklusa korisno je i s ekološkog i s ekonomskog stajališta. U budućnosti, razvojem automatiziranih procesa, bit će moguće postići stupanj recikliranja FN panela preko 95% i dobivanje sirovina bez troškova ili čak s određenom dobiti. Recikliranje ima pozitivan učinak na cijeli energetska i ekonomski sustav FN tehnologije. Recikliranjem FN modula mogu se ukloniti i zadržati potencijalno štetne tvari (npr. olovo, kadmij i selen), ponovno iskoristiti rijetki materijali (npr. srebro, telur i indium) i učiniti ih dostupnim za buduću upotrebu. Da bi se postigli najbolji mogući rezultati u zbrinjavanju odbačenih FN sustava, važno je da se buduća postupci recikliranja kontinuirano unaprjeđuju. Međutim, trenutna količina otpada i dalje je mala, što povlači za sobom ekonomske prepreke i razvoj postojećih procesa.

Na kraju, ono što je najvažnije u skorom vremenu je da se utvrdi posebno zakonodavstvo za upravljanje i recikliranje fotonaponskih panela kao i da se postigne ekonomska održivost tog procesa.

## 6. LITERATURA

- [1] Forecast International's Energy Portal, dostupno na:  
<http://fi-powerweb.com/Renewable-Energy.html>, pristupljeno 14.4.2020.
- [2] Toth, T.: Štedljivije grijanje, prva knjiga, Majstor press d.o.o., Zagreb, 2008.
- [3] Državni hidrometeorološki zavod, dostupno na:  
[https://meteo.hr/objave\\_najave\\_natjecaji.php?section=onn&param=objave&el=dogadjanja&daj=smd18032019#na1](https://meteo.hr/objave_najave_natjecaji.php?section=onn&param=objave&el=dogadjanja&daj=smd18032019#na1) pristupljeno 14.4.2020.
- [4] CHEE –Prekogranična izgradnja kapaciteta energetske učinkovitosti, dostupno na:  
<http://www.chee-ipa.org/hr/obnovljivi-izvori-energije/energija-sunca>, pristupljeno 8.4.2020.
- [5] Kalea, M.: Obnovljivi izvori energije : energetske pogled, Kiklos - krug knjige, Zagreb, 2014.
- [6] Šimetin, V.: Građevinska fizika, GI Fakultet građevinskih znanosti Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 1983.
- [7] Čehajić N.: Pasivno korištenje Sunčeve energije u zgradarstvu – Trombov zid, Tehnički glasnik, Vol. 7 No. 4, 2013.
- [8] Majdandžić, L.J.: Fotonaponski sustavi, HSUSE- Hrvatska stručna udruga za sunčevu energiju, Tehnička škola Ruđera Boškovića u Zagrebu i Srednja škola Oroslavlje, Zagreb
- [9] Goetzberger, A., Hebling, C., Schock, H.-W.: Photovoltaic materials, history, status and outlook, Materials Science and Engineering, R 40 1-46, 2003.
- [10] Kljajin, M., Opalić, M., Pintarić A.: Recikliranje električnih i elektroničkih proizvoda, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Slavonski Brod, 2006.
- [11] Monteiro Lunardi, M., Alvarez-Gaitan, J. P., Bilbao, J. I., Corkish, R.: A Review of Recycling Processes for Photovoltaic Modules, u: Solar Panels and Photovoltaic Materials, (ed.) Beddiaf Zaidi, IntechOpen, London, 2018.
- [12] Fthenaks, V. M.: End of life management and recycling PV modules, USA 2000.
- [13] Technische Universität Bergakademie Freiberg: Recycling photovoltaic modules, BINE projectinfo 02/2010, dostupno na:



<http://www.bine.info/en/publications/publikation/recycling-von-photovoltaik-modulen/>

pristupljeno 10.4.2020.

[14] Majdandžić, LJ.: Fotonaponski sustavi, HSUSE- Hrvatska stručna udruga za sunčevu energiju, Tehnička škola Ruđera Boškovića u Zagrebu i Srednja škola Oroslavlje, Zagreb

[15] Tvrtka PV Cycle, dostupno na: <http://www.pvcycle.org/> pristupljeno 10.4.2020.

[16] Bombach, E., Rover, I., Muller, A., Schlenker, S., Wambach, K., Kopecek, R., Wefringhaus, E.: Technical experience during thermal and chemical recycling of a 23 year old PV generator formerly installed on Pellworm island, Deutsche Solar AG, Solar Material, Alfred-Lange-Str.18, D-09599 Freiberg Germany, 2015.

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

[18] Tvrtka AM Solar, dostupno na: <http://www.amsolar.com>, pristupljeno 10.4.2020.

[19] Latunussa, C. E., Ardente, F., Blengini, G. A., Mancini, L.: Life cycle assessment of an innovative recycling process for crystalline silicon photovoltaic panels, Solar Energy Materials and Solar Cells 156, 101-111, 2016.

[20] Huang, B., Zhao, J., Chai, J., Xue, B., Zhao, F., Wang, X.: Environmental influence assessment of China's multi-crystalline silicon (multi-Si) photovoltaic modules considering recycling process, Solar Energy 143, 132-141, 2017.

[21] Perez-Santalla M. Silver Use: Changes & Outlook, 2013., dostupno na:

<https://www.bullionvault.com/gold-news/silver-use-103020132#>, pristupljeno 10.4.2020.

[22] Weckend, S., Wade, A., Heath, G.: End-of-Life Management Solar Photovoltaic Panels, IRENA and IEA-PVPS, 2016.

[23] Direktiva 2008/98/EZ Europskog parlamenta i Vijeća od 19. studenoga 2008. o otpadu i stavljanju izvan snage određenih direktiva Tekst značajan za EGP OJ L 312

[24] Stajalište Europskog parlamenta od 19. siječnja 2012. i Odluka Vijeća od 7. lipnja 2012.

[25] Peti program djelovanja za okoliš, SL C 138, 17.5.1993., str. 5.

- [26] Direktiva 2012/19/EU Europskog parlamenta i Vijeća od 4. srpnja 2012. o otpadnoj električnoj i elektroničkoj opremi (OEEO), OJ L 197,
- [27] Haque, T. (2018). Introduction to Electronics (E-waste) Recycling. Small Business
- [28] Direktiva 2002/95/EC Europskog parlamenta i Vijeća od 27. siječnja 2003 o ograničenju uporabe određenih opasnih tvari u električnoj i elektroničkoj opremi
- [29] Strategija gospodarenja otpadom u Hrvatskoj, NN br. 130/05,
- [30] Plan gospodarenja otpadom u Hrvatskoj za vremensko razdoblje od 2007. do 2015. godine, NN br. 85/07, 126/10, 31/11,
- [31] Zakon o održivom gospodarenju otpadom, NN 94/2013
- [32] Pravilnik o gospodarenju otpadnom električnom i elektroničkom opremom u Hrvatskoj, NN 42/2014
- [33] Zakon o Fondu za zaštitu okoliša i energetske učinkovitost (pročišćeni tekst, Narodne novine 107/03, 144/12)
- [34] Zakon o zaštiti okoliša, NN 80/13, 153/13, 78/15, 12/18, 118/18

## RECIKLIRANJE SOLARNIH PANELA

### *Sažetak*

Korištenje solarnih panela za iskorištavanje obnovljive vrste energije velika je revolucija u svijetu, a recikliranje solarnih panela na kraju životnog vijeka izazov je s aspekta industrijske ekologije. Svrha recikliranja solarnih panela je daljnja obrada i upotreba iskoristivih materijala za stvaranje novih solarnih panela na tržištu. Ovaj završni rad počinje objašnjavanjem potencijala sunčeva zračenja i materijalne strukture od kojih se rade fotonaponski sustavi, a potom se fokusira na samo recikliranje solarnih panela. U radu se koriste primjeri iz prakse kako bi se što bolje pristupilo analizi samog procesa recikliranja solarnih panela. U nastavku rada se osvrće na utjecaj recikliranja solarnih panela na okoliš i ekonomiju. Na samom kraju rada analizirane su pravne regulative EU i RH u području gospodarenja elektroničkim otpadom.

***Ključne riječi:*** fotonaponski sustavi, recikliranje, silicij

## RECYCLING SOLAR PANELS

### *Summary*

The use of solar panels to harness renewable energies is a major revolution in the world, and recycling solar panels at the end of a lifetime is a challenge from an industrial ecology perspective. The purpose of recycling solar panels is to further process and use the materials used to produce new solar panels on the market. This paper reveals the potentials of solar radiation and the analysis of the materials used to make photovoltaic systems, and then focuses on recycling solar panels only. This paper will use case studies to better illustrate the recycling process of solar panels. The following paper looks at the impact of solar panel recycling on the environment and the economy. At the very end of the paper, the legal regulations of the EU and the Republic of Croatia in the field of electronic waste management were also analyzed.

**Keywords:** photovoltaic systems, recycling, silicon

## ŽIVOTOPIS

Tomislav Jambrešić rođen je u Osijeku, 5. ožujka 1989. godine. Po završetku Osnovne škole Dobriše Cesarića u Osijeku upisuje srednju Strojarsku i obrtničku školu u Osijeku, smjer računalni tehničar u strojarstvu. Nakon završene srednje škole upisuje Stručni studij elektroenergetike na Elektrotehničkom fakultetu u Osijeku. U Akademskoj godini 2018/2019. na Fakultetu za odgojne i obrazovne znanosti u Osijeku upisuje i uspješno završava Pedagoško-psihološku-didaktičko-metodičku izobrazbu te tako stječe pedagoške kompetencije. Ostatak vremena provodi djelujući na osječkoj i nacionalnoj glazbenoj sceni, svirajući, komponirajući i producirajući glazbu. Posljednji veliki projekt u kojem je sudjelovao sa svojim bendom bila je suradnja s Hrvatskim narodnim kazalištem u Osijeku u izvedbi Simfo-rock koncerta.