

# Mogućnost recikliranja otpadnih fotonaponskih panela vakuumskom pirolizom

---

Cuklin, Stela

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Geotechnical Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:130:573913>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-14**



Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Geotechnical Engineering - Theses and Dissertations](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
GEOTEHNIČKI FAKULTET

STELA CUKLIN

**MOGUĆNOST RECIKLIRANJA OTPADNIH FOTONAPONSKIH PANELA  
VAKUUMSKOM PIROLIZOM**

DIPLOMSKI RAD

VARAŽDIN, 2024.

Sazivam članove ispitnog povjerenstva  
za 23.09.2024. u 9 sa  
Obranu ovog rada kandidat će vršiti i pred  
ispitnim povjerenstvom u Varaždinu  
Varaždin, 09.09.2024.

Predsjednik  
ispitnog povjerenstva:

*Prof.dr.sc. Saufa Kovač*

**Članovi povjerenstva**

- 1) Doc.dr.sc. Ivana Presedki
- 2) Prof.dr.sc. Aleksandra Anić Vucinić
- 3) Doc.dr.sc. Lucija Rodehić
- 4) Doc.dr.sc. Vitimir Preur

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
GEOTEHNIČKI FAKULTET

STELA CUKLIN

**MOGUĆNOST RECIKLIRANJA OTPADNIH FOTONAPONSKIH PANELA  
VAKUUMSKOM PIROLIZOM**

**KANDIDATKINJA:**

Stela Cuklin, bacc.amb. ing.



**MENTORICA:**

Doc.dr.sc. Ivana Presečki

**KOMENTORICA:**

Prof.dr.sc. Aleksandra Anić Vučinić

**NEPOSREDNA VODITELJICA:**

Doc.dr.sc. Lucija Radetić

VARAŽDIN, 2024.

## IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je diplomski rad pod naslovom:

MOGUĆNOST RECIKLIRANJA OTPADNIH FOTONAPONSKIH PANELA  
VAKUUMSKOM PIROLIZOM

---

rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na istraživanjima te objavljenoj i citiranoj literaturi  
te je izrađen pod mentorstvom doc.dr.sc. Ivane Presečki

---

Izjavljujem da nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, odnosno da je prepisan iz necitiranog rada te da nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem također, da nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

U Varaždinu, 4.9.2024.

Stela Cuklin  
(Ime i prezime)

*Stela Cuklin*

(Vlastoručni potpis)

## IZJAVA MENTORA O POSTOTKU SLIČNOSTI DIPLOMSKOG RADA S VEĆ OBJAVLJENIM RADOVIMA

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je diplomski rad pod naslovom:

MOGUĆNOST RECIKLIRANJA OTPADNIH FOTONAPONSKIH PANELA  
VAKUUMSKOM PIROLIZOM

---

pregledan anti-plagijat programskim paketom Turnitin te da postotak sličnosti cjelovitog diplomskog rada, s već objavljenim radovima, ne prelazi 20%, kao i da pojedinačni postotak sličnosti diplomskog rada sa svakom literaturnom referencom pojedinačno ne prelazi 5%.

U Varaždinu, 4.9.2024.

doc.dr.sc. Ivana Presečki  
(Mentor)



(Vlastoručni potpis)

## **Sažetak**

**Ime i prezime studenta:** bacc.ing.amb. Stela Cuklin

**Naslov rada:** Mogućnost recikliranja otpadnih fotonaponskih panela vakuumskom pirolizom

Zbog sve manjih globalnih količina neobnovljivih izvora energije, sve je veća potreba za korištenjem obnovljivih izvora energije i uređaja koji omogućuju njihovu pretvorbu u druge oblike energije. Fotonaponski paneli uređaji su koji prikupljaju Sunčevu energiju koju pretvaraju u električnu energiju za opskrbu objekata. Ovaj diplomski rad istražuje problematiku recikliranja otpadnih fotonaponskih panela vakuumskom pirolizom koja predstavlja jednu od potencijalnih metoda za rješavanje ovog problema. Cilj je ovog istraživanja doprinijeti boljem razumijevanju potencijalnih prednosti i izazova obrade fotonaponskih panela vakuumskom pirolizom te podržavanje razvoja održivih praksi u recikliranju i upravljanju otpadom u solarnoj industriji.

**Ključne riječi:** Recikliranje, fotonaponski paneli, vakuumska piroliza

## **Abstract**

**Name and surname of student:** bacc.ing.amb. Stela Cuklin

**Title:** The possibility of recycling waste photovoltaic panels by vacuum pyrolysis

Due to the decrease in a global amount of non-renewable energy sources, there is an increasing need for the use of renewable energy sources and devices that enable its conversion into other forms of energy. Photovoltaic panels are devices that collect solar energy and convert it into electricity to supply buildings. The topic of this master thesis is the recycling of waste photovoltaic panels using vacuum pyrolysis, which represents one of the potential methods for solving this problem. The goal of this research is a better understanding of the potential advantages and challenges of processing photovoltaic panels using vacuum pyrolysis and providing support for the development of sustainable practices in recycling and waste management in the solar industry.

**Keywords:** Recycling, photovoltaic panels, vacuum pyrolysis

# SADRŽAJ

1. Uvod.....	1
2. Fotonaponski paneli .....	2
2.1. Solarna energija.....	2
2.2. Fotonaponski paneli .....	3
2.3. Vrste fotonaponskih panela .....	4
2.3.1. Prva generacija fotonaponskih panela .....	5
2.3.2. Druga generacija fotonaponskih panela .....	6
2.3.3. Treća generacija fotonaponskih panela .....	7
2.3.4. Četvrta generacija fotonaponskih panela .....	8
2.4. Način rada fotonaponskih panela .....	8
3. Recikliranje fotonaponskih panela .....	10
3.1. Fotonaponski sustavi i njihovo recikliranje u Europskoj uniji.....	11
3.2. Tehnologije recikliranja fotonaponskih panela .....	14
3.3. Prednosti i izazovi recikliranja fotonaponskih panela.....	16
4. Piroлиза .....	18
4.1. Vakuumska piroliza .....	19
4.1.1. Vakuumske peći.....	20
4.1.2. Uvjeti pirolize fotonaponskih panela .....	22
5. Eksperimentalni dio .....	25
5.2. Materijali .....	25
5.2.1. Uzorak .....	25
5.2.2. Vakuumska peć.....	25
5.3. Metodologija i provedba eksperimenta .....	27
6. Rezultati istraživanja i diskusija.....	32
7. Zaključak.....	35
8. Literatura .....	36
Popis slika .....	39
Popis tablica .....	40
Popis kratica.....	41



## 1.Uvod

Zbog sve manjih globalnih količina neobnovljivih izvora energije te povećanja cijena istih, sve je veća potreba za korištenjem obnovljivih izvora energije i uređaja koji omogućuju pretvorbu u druge oblike energije koja se koristi u kućanstvima, industrijskim postrojenjima i ostalim objektima.

Jedni od uređaja za korištenje obnovljivih izvora energije za proizvodnju električne te potom toplinske energije jesu fotonaponski paneli. Isti su izumljeni krajem 19. stoljeća, a pogotovo nakon sredine 20. stoljeća počeli su se češće primjenjivati, modernizirati te popularizirati. Posljednjih nekoliko godina dogodio se značajan napredak u tehnologiji fotonaponskih panela i fotonaponskih ćelija od kojih se isti sastoje te je dodatno unaprijeđena učinkovitost i pristupačnost fotonaponskih panela koji su, zbog brojnih financijskih potpora, danas dostupni široj javnosti (1).

Bez obzira na činjenicu da fotonaponski paneli omogućuju proizvodnju energije s minimalnim negativnim utjecajem na okoliš i korištenje obnovljivih izvora energije, dio materijala od kojih su navedeni paneli izrađeni više nije dostupan u zemljama svijeta u količinama kao prije nekoliko desetaka godina. Materijali poput aluminijske, bakra i stakla postaju sve manje dostupni i sve skuplji jer se njihova nalazišta, izvori i globalne zalihe iscrpljuju, ali isto tako postoji problem odlaganja velikih količina navedenih materijala nakon što postanu otpad ili se prestanu koristiti u svrhe za koje su primarno namijenjeni.

S ciljem smanjenja količina otpada nastalog nakon prestanka rada ili kvara fotonaponskih panela, korištenja kružnog gospodarenja otpadom i materijalima, zaštite okoliša i neobnovljivih globalnih resursa pojedinih materijala, potrebno je na odgovarajući način oporabiti materijale iz otpadnih fotonaponskih panela, odnosno iste reciklirati.

Cilj ovog rada je utvrditi mogućnost recikliranja fotonaponskih panela koristeći metodu vakuumske pirolize što će se ispitati eksperimentalno u Laboratoriju za inženjerstvo okoliša.

## 2. Fotonaponski paneli

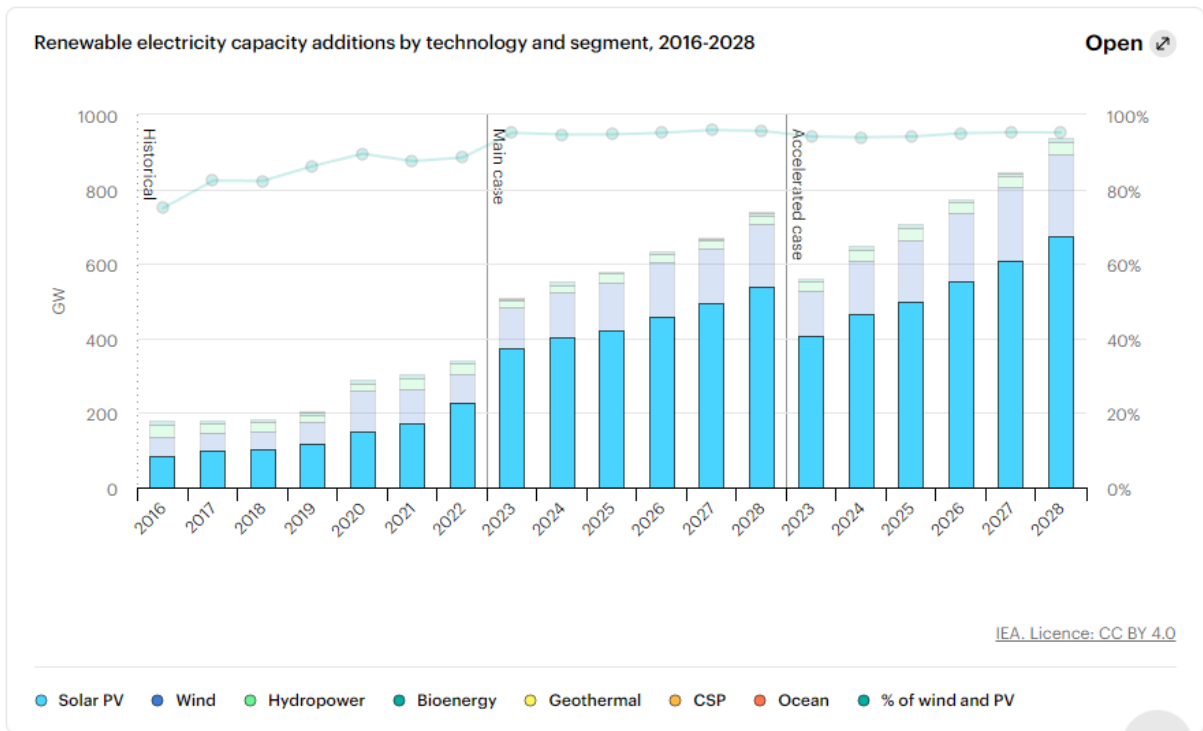
### 2.1. Solarna energija

Solarna energija jedan je od oblika obnovljivih izvora energije koji su definirani kao „izvori energije koji su sačuvani u prirodi i obnavljaju se u cijelosti ili djelomično“, a s povećanim udjelom korištenja navedenih oblika energije omogućava se smanjenje proizvodnje stakleničkih plinova i manja ovisnost o neobnovljivim izvorima energije te uvezenoj električnoj energiji (2).

Solarna energija nastaje nuklearnom fuzijom koja se odvija kada se protoni atoma vodika sudaraju u jezgri Sunca i međusobno stapaju prilikom čega se stvaraju atomi helija. Posljedica navedenog procesa jest stvaranje i emitiranje ogromne količine energije dio koje dopijeva i pada na vanjski rub Zemljinog atmosferskog omotača. Intenzitet energije Sunčevog zračenja koji dolazi na površinu Zemlje smanjuje se do površine planeta zbog velikog radijalnog širenja zračenja s udaljenog Sunca, dok se dio energije gubi i kao posljedica djelovanja Zemljine atmosfere i oblaka koji apsorbiraju ili raspršuju oko 50 posto dolazne Sunčeve svjetlosti. Ista koja dopire do tla sastoji se od gotovo 50 posto vidljive svjetlosti, 45 posto infracrvenog zračenja te manje količine ultraljubičastog i drugih oblika elektromagnetskog zračenja (2).

Potencijal za iskorištavanje solarne energije ogroman je budući da je Zemlja svaki dan prima oko 200 000 puta više od ukupnog svjetskog dnevnog kapaciteta za proizvodnju toplinske ili električne energije (2).

Fotonaponske tehnologije nakon izrade i postavljanja ne izazivaju nikakve emisije u zrak te im je očekivani životni vijek trajanja između 20 i 30 godina. Zbog toga dolazi do povećanja udjela električne energije proizvedene radom fotonaponskih ćelija, odnosno fotonaponskih panela (3). Isto tako, prema nekoliko statističkih analiza smatra se da će se povećavati kapaciteti obnovljivih izvora energije od čega će solarna energija i vjetar, kao također jedan od oblika obnovljivih izvora energije, činiti preko 95% u ukupnim količinama povećanih kapaciteta u razdoblju od pet godina. Troškovi njihove proizvodnje niži su nego za fosilne i zelene alternative u većini država svijeta. Predviđa se da će se iskorištene količine fotonaponske energije i vjetra više nego udvostručiti do 2028. godine u usporedbi s 2022. (Slika 1) i doseći gotovo količinu od 710 GW (4).



Slika 1: Očekivani porasti kapaciteta obnovljivih izvora energije do 2028.godine

(preuzeto sa: <https://www.iea.org/energy-system/renewables/solar-pv> Datum preuzimanja:10.4.2024.)

## 2.2. Fotonaponski paneli

Fotonaponski paneli (engl. Photovoltaic panels, PV) uređaji su koji prikupljaju Sunčevu energiju koju pretvaraju u električnu energiju za opskrbu objekata. Budući da ne koriste tekućine i plinove, odnosno nije im potrebno dodatno gorivo niti dodatan izvor energije osim energije koja proizlazi iz Sunčevog zračenja, ne uzrokuju onečišćenja okoline, odnosno ne ispuštaju emisije koje bi uzrokovale degradaciju kvalitete okoliša (3).

Fotonaponski se paneli mogu koristiti na više različitih načina uključujući manje odvojene jedinice koje dosežu snagu od nekoliko vata, autonomne izvore snage nekoliko kilovata te centralizirane elektrane koje postižu snagu u megavatima (3).

Za maksimalnu učinkovitost ovih vrsta panela potrebno ih je orijentirati u smjeru gdje se Sunce, u odnosu na krov objekta ili površinu prekrivenu panelima, zadržava najveći dio dana te, budući da fotonaponski paneli ne proizvode električnu energiju kontinuirano, potrebno je osigurati spremnike električne mreže kako bi se energija i dalje mogla distribuirati prema potrošačima (3,5).

Prednosti PV panela u odnosu na proizvodnju energije korištenjem neobnovljivih izvora energije jesu ušteda na računima za energiju korištenu za grijanje, smanjenje ugljičnog otiska za do 600 kilograma ugljikovog dioksida godišnje te relativno kratko vrijeme povrata početnih financijskih investicija (6).

Korištenjem fotonaponskih panela i recikliranjem istih pridonosi se čistom zraku, vodi, tlu i bioraznolikosti, izgradnji obnovljivih, energetski učinkovitih zgrada, korištenju čiste energije i najsuvremenije čiste inovacije, korištenju dugotrajnih proizvoda koji se mogu popravljati, reciklirati i ponovno koristiti, učenju znanja i vještina za buduća radna mjesta u svrhu zelene tranzicije te razvoju globalno konkurentne i otporne industrije.

### 2.3. Vrste fotonaponskih panela

Postoji više vrsta fotonaponskih ćelija, odnosno fotonaponskih panela koji su od njih izrađeni. Do danas razvijene su četiri generacije fotonaponskih panela:

1. prva generacija – tehnologija s kristalnim silicijem:

- monokristalni paneli,
- polikristalni paneli,
- vrpce listova (ribbon sheets);

2. druga generacija – tehnologija tankih filmova:

- amorfni silicij (a-Si),
- kadmijev telurid (CdTe),
- ćelije s više spojeva (a-Si- $\mu$ c Si),
- bakar-indij-galij-diselenid (CIGS), bakar-indij-diselenid (Se);

3. treća generacija – CPV (engl. concentrator photovoltaic):

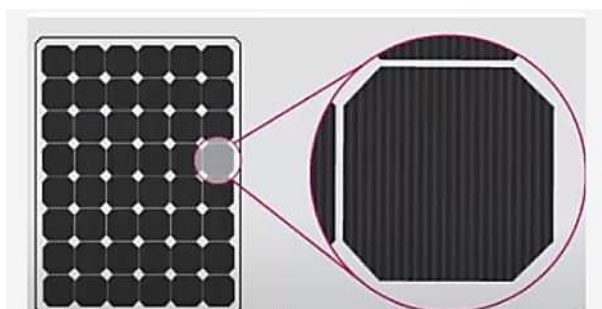
- filmovi nanokristala, organske solarne ćelije, kvantne točke, solarne ćelije osjetljive na boju;

4. četvrta generacija – nove tehnologije u razvijanju:

- fleksibilni tanki filmovi s novim neorganskim metalnim nanočesticama/oksidima i organskim nanomaterijalima, odnosno ugljikovim nanocijevčicama, perovskitne fotonaponske ćelije, prozirni fotonaponski paneli, plutajuće PV farme, energetski sustavi koji koriste umjetnu inteligenciju (7).

### 2.3.1. Prva generacija fotonaponskih panela

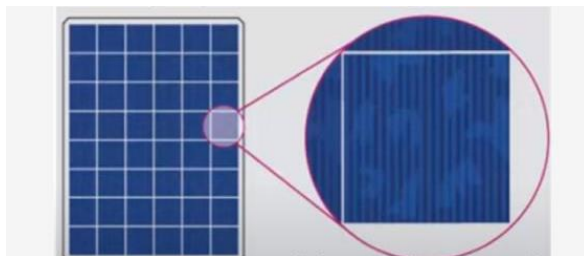
Monokristalni fotonaponski paneli (Slika 2) sastoje se od monokristalnog silicija te imaju ujednačen tamni izgled i zaobljene rubove. Zbog visoke čistoće monokristalnog silicija koji se reže na pločice i omogućuje slobodno strujanje elektrona, ova vrsta panela ima jednu od najviših stopa učinkovitosti koja se kreće između 15 i 20%. Isto tako, imaju veliku izlaznu snagu, najduže traju te zauzimaju manju površinu prostora, no najskuplja su vrsta panela na tržištu (8).



Slika 2: Monokristalni fotonaponski paneli

(preuzeto sa: <https://www.geeksforgeeks.org/solar-cell/> Datum preuzimanja:10.4.2024.)

S druge strane, polikristalni fotonaponski paneli (Slika 3), izrađeni su od polikristalnog silicija, odnosno proizvode se taljenjem nekoliko komada silicija zajedno. Plave su boje te im kutovi nisu izrezani. Paneli ovog tipa manje su energetske učinkovitosti, između 13 i 16%, a razlog je tome što imaju više kristala u svakoj fotonaponskoj ćeliji, odnosno postoji manje prostora za kretanje elektrona. Imaju manju iskoristivost prostora te su kraćeg vijeka trajanja jer su u većoj količini podložni visokim temperaturama. Izlazna snaga monokristalnih i polikristalnih fotonaponskih panela gotovo je jednaka (8).

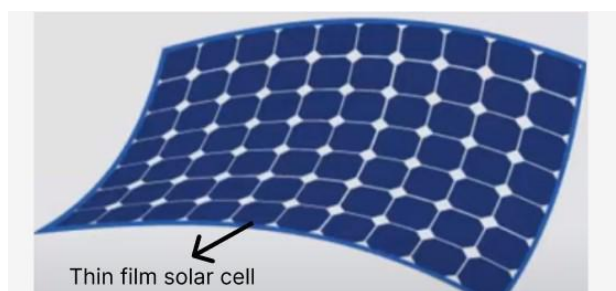


Slika 3: Polikristalni fotonaponski paneli

(preuzeto sa: <https://www.geeksforgeeks.org/solar-cell/> Datum preuzimanja:10.4.2024.)

### 2.3.2. Druga generacija fotonaponskih panela

Za proizvodnju tankoslojnih PV panela (Slika 4) potrebna je manja količina materijala, a proizvode se na način da se postavlja jedan ili više filmova fotonaponskog materijala poput silicija, bakra ili kadmija. U odnosu na monokristalne i polikristalne panele, imaju veću toleranciju na visoke temperature, no imaju puno manju energetska učinkovitost čija se vrijednost kreće od 7 do 13%. Fleksibilni su, no zauzimaju veći prostor od prije navedenih vrsta panela te imaju kraći vijek trajanja (9).



Slika 4: Tankoslojni fotonaponski paneli

(preuzeto sa: <https://www.geeksforgeeks.org/solar-cell/> Datum preuzimanja: 10.4.2024.)

Tanke fotonaponske ćelije, odnosno fotonaponski paneli koji su od njih izgrađeni, često se kategoriziraju prema materijalu koji se koristi. Pa tako te kategorije obuhvaćaju amorfni silicij (a-Si), kadmijev telurid (CdTe), ćelije s više spojeva, bakar-indij-galij-diselenid (CIGS) te bakar-indij-diselenid (Se) (9).

#### 2.3.2.1. Fotonaponske ćelije od amornog silicija (a-Si)

Amorfni silicij materijal je koji se često koristi kod zaslona s tekućim kristalima i rendgenskim snimkama, no koristi se i za proizvodnju tankoslojnih fotonaponskih panela. Moduli amornog silicija izrađuju se stavljanjem filma silicijeve pare debljine otprilike 1  $\mu\text{m}$  na materijal supstrata poput metala ili stakla. Glavna prednost ove vrste fotonaponskih ćelija jesu smanjeni troškovi proizvodnje, dok im je energetska učinkovitost oko 8% (5,10).

#### 2.3.2.2. Fotonaponske ćelije od kadmijevog telurida (CdTe)

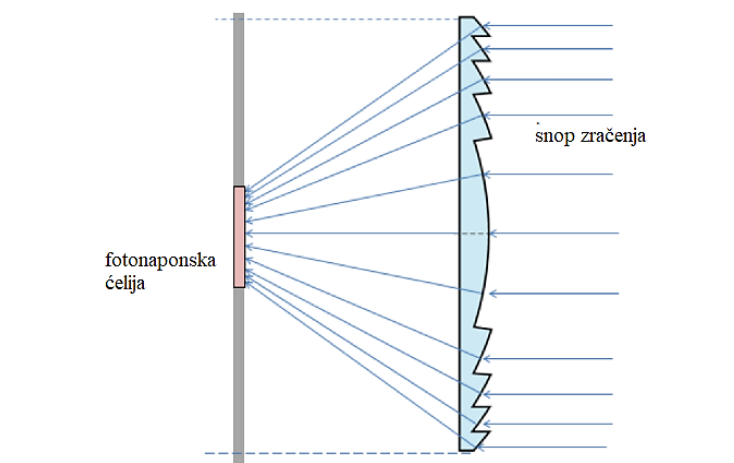
PV ćelije izgrađene od kadmijevog telurida proizvode se od tankog poluvodičkog sloja čija je svrha prikupljanje Sunčeve svjetlosti i proizvodnja električne energije uz pomoć iste. Maksimalna energetska učinkovitost ove vrste fotonaponskih ćelija iznosi oko 17%, a glavne su im prednosti kratko vrijeme povrata energije te niži troškovi proizvodnje (11).

### 2.3.2.3. Fotonaponske ćelije od spoja bakar-indij-galij-diselenid (CIGS)

CIGS fotonaponske ćelije sastoje se od četiri poluvodiča: bakra-C, indija-I, galija-G i selena-S dok im energetska učinkovitost može postići vrijednost i do 22,8%. Navedene ćelije proizvode se taloženjem tankog sloja otopine bakra, indija, galija i selena na staklenu ili plastičnu podlogu zajedno s elektrodama na prednjoj i stražnjoj strani čija je funkcija prikupljanje proizvedene električne energije (11).

### 2.3.3. Treća generacija fotonaponskih panela

Uz gore navedene najčešće korištene vrste fotonaponskih ćelija, odnosno fotonaponskih panela, u sve širu upotrebu ulaze takozvani koncentrirani fotonaponski paneli. Koncentrirani paneli, kao što je prikazano na Slici 5, koriste zrcala ili leće za fokusiranje Sunčeve svjetlosti na malo područje, zagrijavajući tekućinu koja stvara paru za pogon turbine i proizvodnju električne energije. Ovi paneli vrlo su energetske učinkoviti, s ocjenom učinkovitosti od 25 do 30%, no zahtijevaju puno održavanja. Uglavnom se koriste u velikim solarnim elektranama koje proizvode velike količine električne energije. Glavna je prednost elektrane koncentriranih fotonaponskih panela u odnosu na klasičnu fotonaponsku elektranu ta što se može opremiti rastaljenim solima koje omogućuju pohranu topline pa zbog toga postoji mogućnost proizvodnje električne energije i nakon zalaska Sunca (12).



Slika 5: Ilustracija koncentrirane fotonaponske ćelije

(preuzeto sa: <https://www.e-education.psu.edu/eme812/node/537> Datum preuzimanja: 24.4.2024.)

#### 2.3.4. Četvrta generacija fotonaponskih panela

U posljednjih nekoliko godina razvoj novih tehnologija potaknuo je i razvoj tehnologija fotonaponskih ćelija i panela. Neki od primjera četvrte generacije fotonaponskih panela su perovskitne PV ćelije koje povećavaju pristupačnost i energetske učinkovitost. Isto tako, istražuju se prozirni fotonaponski paneli koji se mogu ugraditi u prozore i staklene površine, plutajuće fotonaponske farme gdje se paneli postavljaju na vodene površine što povećava učinkovitost zbog rashladnog učinka vode te PV sustavi koji koriste umjetnu inteligenciju za predviđanje proizvodnje i potrošnje energije omogućujući učinkovitije upravljanje energijom (7).

#### 2.4. Način rada fotonaponskih panela

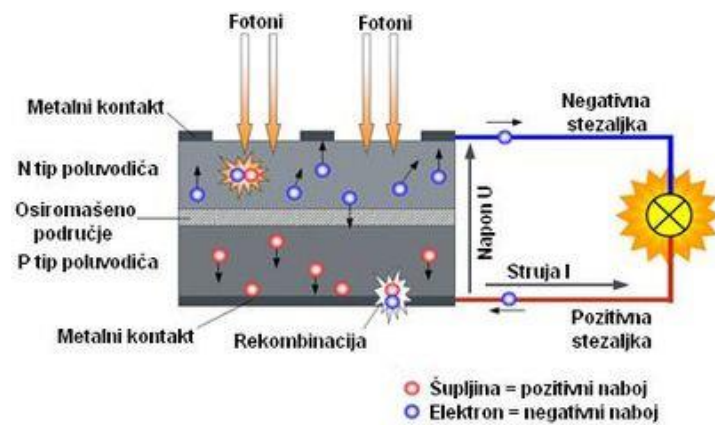
Fotonaponski paneli sastoje se od fotonaponskih ćelija koje apsorbiraju Sunčevu svjetlost te pretvaraju prikupljenu solarnu energiju u električnu energiju. Navedene ćelije izrađene su od poluvodiča, odnosno slojeva od elemenata poput silicija, fosfora, koji daju negativan naboj (P-tip poluvodiča) te bora i drugih elemenata koji daju pozitivan naboj (N-tip poluvodiča) (13).

Tvari od kojih su izrađene solarne ćelije apsorbiraju fotone iz Sunčeve svjetlosti. Rezultirajuća energija generirana iz fotona koji dolaze u kontakt s površinom fotonaponskog panela omogućuje elektronima da budu „izbačeni“ iz svojih orbita u atomima i pušteni u električno polje koje generiraju fotonaponske ćelije koje zatim povlače te slobodne elektrone u usmjerenu struju. Opisani proces poznat je pod nazivom fotonaponski efekt, odnosno direktna pretvorba Sunčevog zračenja u električnu energiju (13).

Nakon toga, proizvedena električna struja nakuplja se u žicama i zatim odmah koristi ili pohranjuje u bateriju fotonaponskog sustava. Navedeni sustavi sastoje se od fotonaponskih panela koji prikupljaju Sunčevu energiju, potporne strukture panela, pretvarača - uređaja koji transformira istosmjernu struju koja se nalazi u fotonaponskim panelima u izmjeničnu struju koju koriste stambeni i industrijski korisnici te električnih kablova koji prenose proizvedenu struju od sustava do krajnjih korisnika (14).

Proces rada i dijelovi fotonaponskog panela prikazani su na Slici 6 ispod teksta.





Slika 6: Način rada i dijelovi fotonaponskog panela

(preuzeto sa: [https://hr.wikipedia.org/wiki/Solarna\\_fotonaponska\\_energija](https://hr.wikipedia.org/wiki/Solarna_fotonaponska_energija). Datum preuzimanja: 12.4.2024.)

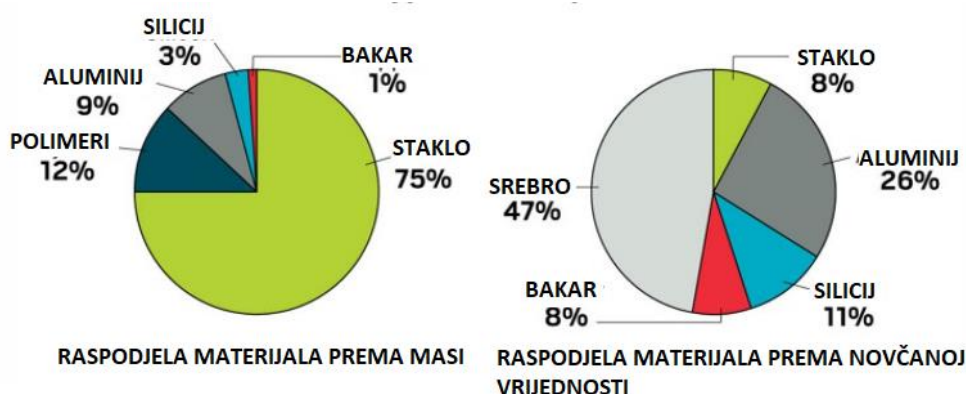
### 3. Recikliranje fotonaponskih panela

Oporaba otpada svaki je postupak čiji je glavni rezultat uporaba otpada u korisne svrhe, odnosno kada otpadni predmet zamjenjuje druge materijale koji se primarno koriste za tu svrhu. Postupci oporabe otpada određeni Zakonom o gospodarenju otpadom NN 84/21 označeni su oznakama od R1 do R13 (15).

Recikliranje je postupak koji obuhvaća obradu otpadnih materijala i korištenih proizvoda s ciljem dobivanja sirovina i/ili energije za ponovno korištenje (15).

Budući da fotonaponski paneli sadrže i opasne komponente i materijale, poput olova, mogu uzrokovati onečišćenje okoliša ukoliko se odlože na nepravilan način. Isto tako, ova vrsta panela sadrže vrijedne materijale poput plastike, stakla, aluminijskih i drugih koji se mogu ponovno upotrijebiti za proizvodnju fotonaponskih panela ili kao sirovine za neke druge proizvode (15).

U Sjedinjenim Američkim Državama ne postoje propisi prema kojima se nalaže recikliranje fotonaponskih panela, a prema podacima američkog Nacionalnog laboratorija za obnovljivu energiju, reciklira se manje od 10% otpadnih PV panela u zemlji. Čak i u Europskoj uniji, gdje je prema zakonodavstvu obavezno recikliranje fotonaponskih panela, mnoga postrojenja za odlaganje otpada odvajaju i vrše oporabu materijala poput aluminijskih okvira i staklenih poklopaca, koji čine više od 80% mase PV panela. Preostala masa se često spaljuje, iako sadrži vrijedne elemente kao što su srebro, bakar i silicij, koji zajedno čine dvije trećine novčane vrijednosti materijala silicijskog fotonaponskog panela (Slika 7) (16).



Slika 7: Usporedba materijala u silicijskim fotonaponskim panelima prema masi i novčanoj vrijednosti

(preuzeto sa: <https://cen.acs.org/environment/recycling/Solar-panels-face-recycling-challenge-photovoltaic-waste/100/i18> Datum preuzimanja: 22.4.2024.)

Neke od analiza optimalnog načina gospodarenja otpadnim fotonaponskim panelima obuhvaćaju i procjenu životnog ciklusa proizvoda (engl. Life cycle assessment, LCA). Ovaj mehanizam omogućuje procjenu utjecaja nekog proizvoda ili procesa na okoliš tijekom cijelog njegovog životnog ciklusa. Navedeni ciklus obuhvaća fazu eksploatacije, fazu proizvodnje, fazu upotrebe te fazu razgradnje, odnosno fazu kraja životnog vijeka proizvoda ili procesa. Kod LCA analize fotonaponskih panela fokus se stavlja na analizu usporedbe energije korištene za proizvodnju te vrste panela te energije koju isti generiraju prilikom procesa rada i rezultati se izražavaju u ekvivalentu emisija CO<sub>2</sub>. Isto tako, analizira se vrijeme koje je potrebno za pokrivanje troškova proizvodnje te smanjenje emisije stakleničkih plinova. Neke od studija koje su koristile mehanizam procjene životnog ciklusa fotonaponskih modula pokazale su da je vrijeme koje je potrebno za povrat uloženi sredstava putem proizvodnje energije između 3,5 i 6 godina ovisno o vrsti i energetskej učinkovitosti PV modula, cijeni instalacije te razini solarnog zračenja u različitim dijelovima svijeta. Isto tako, pokazano je da je smanjenje ugljičnog otiska za jednu od LCA analiza 0.1954 tona CO<sub>2</sub> ekvivalent. LCA analize fotonaponske tehnologije omogućuju optimizaciju pojedinih dijelova proizvodnje i upotrebe, ali isto tako omogućuju kvalitetno gospodarenje i usavršavanje koraka na kraju životnog vijeka fotonaponskih panela (17).

### 3.1. Fotonaponski sustavi i njihovo recikliranje u Europskoj uniji

Planom Europske unije za solarnu energiju „REPowerEU“, koji je uveden kako bi se okončala ovisnost o fosilnim gorivima i zaštitilo građane od volatilnosti cijena istih. Želi se učiniti dostupnim više od 320 GW solarne fotonaponske energije do 2025.godine, odnosno oko 600 GW do 2030.godine. Politike Europske unije u području energije dobivene iz obnovljivih izvora energije koje se provode u posljednjem desetljeću omogućile su znatno smanjenje troškova sakupljanja i korištenja solarne energije. Konkretno, troškovi uvođenja fotonaponske tehnologije na području zemalja Europske unije smanjili su se za 82% što je građanima omogućilo dostupniju individualnu i/ili kolektivnu proizvodnju električne energije (18).

Kroz različite inicijative, ovim se planom žele postići višestruke koristi za potrošače za sve članice Unije. Europska unija preko inicijative za solarne krovove želi osigurati energiju za 25% potrošnje električne energije u Europskoj uniji te istovremeno ograničiti trajanje postupka izdavanja dozvola za krovne solarne sustave, osigurati potpunu provedbu svojeg

zakonodavstva u svim državama članicama te uvesti obvezu ugradnje ove vrste krovnih sustava za sve nove javne i komercijalne zgrade određenih površina te stambene zgrade u periodu od sljedećih pet godina. Uz to, Unija je uvela i PVGIS (engl. Photovoltaic Geographical Information System – geografski informacijski sustav za fotonaponske sustave), besplatni i otvoreni internetski alat koji pruža informacije o učinkovitosti fotonaponskih sustava i solarnom zračenju za sve lokacije u Europi. Unosom lokacije u sustav, isti omogućuje mjesečne i godišnje podatke o proizvodnji solarne energije, solarnom zračenju, trošku proizvodnje te o čimbenicima koji mogu utjecati na kvalitetu i količinu proizvodnje energije (18).

Isto tako, inovativnim se oblicima uvođenja želi omogućiti korištenje solarne energije u različitim uvjetima i na više različitih načina. Jedna od mogućnosti jest višestruko korištenje prostora, kao na primjer korištenje zemljišta za poljoprivredu koje se može pod određenim uvjetima kombinirati s proizvodnjom solarne energije kroz poljoprivredne fotonaponske sustave. Uz to, predstavljena je ideja o vozilima s integriranim fotonaponskim sustavom čime bi se pridonijelo smanjenju emisija iz prometnog sektora te povećanju energetske autonomije električnih vozila i dodatnim rješenjima za skladištenje energije. Još su jedan od inovativnih oblika uvođenja fotonaponski sustavi integrirani u zgrade koji su istovremeno građevni proizvod i sustav za proizvodnju solarne električne energije koji zahtijeva homogenu certifikaciju proizvoda te stručno osposobljavanje radnika (18).

U Europskoj uniji do kraja 2020. bilo je 136 GW instaliranih kapaciteta proizvodnje fotonaponskih sustava, no kako bi se ostvario već navedeni cilj za energiju iz obnovljivih izvora do 2030. godine, mora se znatno ubrzati postupak uvođenja solarne energije pa bi u ovom desetljeću Europska unija u prosjeku morala instalirati oko 45 GW godišnje. Iz tog se razloga mogu očekivati značajna povećanja količina otpadnih fotonaponskih panela u periodu od otprilike 2028. godine (18).

Isto tako, predviđa se 4 133 GW instaliranih fotonaponskih panela te 10 968 GWh baterija za pohranu energije do 2050. godine. Uzimajući u obzir vijek trajanja fotonaponskih panela koji iznosi od 20 do 30 godina, smatra se da bi količine otpada od istih do 2050. godine iznosile 195 332 kilo tona (18).

Sredstvima Europske unije članicama se omogućuje uklanjanje prepreka za korištenje većih količina solarne energije unutar mreža distribucije i prijenosa. Kohezijska politika EU-a, pri čemu je najveći naglasak stavljen na Fond za oporavak i otpornost te INTERREG Europe -

program za inovativna i održiva rješenja za regionalne razvojne izazove, predviđa 9,6 milijardi EUR za unaprjeđenje i razvoj energetske infrastrukture i mreže u svim zemljama članicama (18).

Uz REPowerEU, ističe se i WEEE Direktiva Europske unije koja regulira korake na kraju životnog ciklusa električne i elektroničke opreme. Glavni je cilj ove direktive 2012/19/EU spriječiti odlaganje WEEE (engl. Waste Electrical and Electronic Equipment, električni i elektronički otpad) u okoliš, povećati njegovu održivost te poticati ponovnu upotrebu sekundarnih sirovina. Spomenutom Direktivom propisano je da su proizvođači odgovorni za pravilno prikupljanje i zbrinjavanje električnog i elektroničkog otpada. S obzirom na dug životni vijek fotonaponskih panela, u odnosu na većinu električne i elektroničke opreme koja se svrstava u WEEE te na volatilitnost fotonaponskih tržišta, Komisija 2019/21193 donijela je provedbenu odluku kojom se razvila identifikacija podkategorija fotonaponskih panela. Ista bi se trebala koristiti za izvještavanje u vezi sa zahtjevima 2012/19/EU Direktive, a prema navedenoj odluci podkategoriju fotonaponskih panela potrebno je zasebno prijavljivati (19).

S obzirom da je maseni udio vrijednih materijala u fotonaponskim panelima relativno nizak, isti se često ne oporabljuju pa se povećava opterećenje na okoliš. Iz tog je razloga uvedena PHOTORAMA, inovacijska akcija koju financira Europska unija s ciljem unaprjeđenja recikliranja otpadnih fotonaponskih panela te uporabe sirovina, a provodi ju konzorcij od 12 organizacija u razdoblju od 2021. do 2024. godine. Kroz navedenu akciju razvijaju se tehnologije za implementaciju pouzdane sheme recikliranja fotonaponskih panela, demonstriraju se inovativna rješenja za recikliranje, razvija se način kružnog gospodarenja s ponovnim unosom rijetkih sekundarnih materijala u međusektorske lance te se potiče tržišno prihvaćanje PHOTORAME i njenih tehnologija kao održivih rješenja. Uz to, žele se ojačati mjere održivog gospodarenja otpadom u okviru Europskog partnerstva za inovacije u kojem se povezuju istraživanja, inovacije i javna nabava (20).

Unutar Europske unije 2015. godine stvoren je projekt naziva CABRISS (engl. Implementation of a Circular economy Based on Recycled, reused and recovered Indium, Silicon and Silver materials for photovoltaic and other applications). Isti je stvoren s ciljem transformiranja zakonskih obveza prema WEEE Direktivi 2012/19/EU u nove poslovne prilike uvođenjem kružnog gospodarstva temeljenog na recikliranju, ponovnom korištenju i oporavku materijala koji sadrže indij, silicij i srebro za fotonaponske panele i druge svrhe.

CABRISS jest zajednička inicijativa 16 europskih tvrtki i istraživačkih instituta koja je dobila odobrenje EU-ovog programa za istraživanje i inovacije „Horizon 2020“ (21) . Na temelju rezultata ovog projekta stvoren je projekt naziva CIRCUSOL koji za cilj ima ispuniti puni potencijal kružnih poslovnih modela te pružiti stvarnu ekonomsku, ekološku te korisničku dobit (22).

Neprofitna organizacija Europske unije, osnovana 2007. godine, naziva PV CYCLE omogućuje kolektivno i prilagođeno upravljanje otpadnim fotonaponskim panelima te usklađivanje sa zakonima zemalja u kojima se nalaze tvrtke i posjednici otpada. PV CYCLE nastao je s ciljem provedbe obveze industrije fotonaponskih panela da se uspostavi program prikupljanja i recikliranja PV modula te prihvaćanja koncepta odgovornosti proizvođača. Program je započeo obuhvaćajući otpadne fotonaponske panele, a danas brine i o električnoj i elektroničkoj otpadnoj opremi, baterijama, industrijskom otpadu te otpadu od ambalaže (23).

Pravilnik o gospodarenju posebnim kategorijama otpada u sustavu Fonda (NN 124/2023) u sklopu Zakona o gospodarenju otpadom 84/21 propisuje mjere za zaštitu okoliša te zdravlja ljudi kroz smanjivanje ili sprječavanje štetnih učinaka od nastajanja i gospodarenja EE opremom. Pravilnikom se propisuju uvjeti gospodarenja električnim i elektroničkim otpadom kako bi se reduciralo njegovo nastajanje te kako bi se osigurala ponovna uporaba i recikliranje istog. Fotonaponski se paneli, u sklopu kategorije EE otpada, klasificiraju kao opasni otpad te se isti iz kućanstava i gospodarstva mora sakupljati i odvoziti odvojeno od ostalog otpada. U Republici Hrvatskoj sakupljanje otpadne EE opreme odvija se putem sakupljačke mreže obrađivača ove vrste otpada na području cijele države. Građani mogu naručiti odvoz EE otpada pozivom na besplatni telefon, preko elektroničke pošte ili na web stranici. Pravilnikom se određuju postupci i ciljevi gospodarenja te zahtjevi za proces proizvodnje, označavanja, ispunjavanja obveza proizvođača, sakupljanja, skladištenja i obrade električne i elektroničke opreme (24).

### 3.2. Tehnologije recikliranja fotonaponskih panela

Zbog već navedenih razloga potrebe recikliranja fotonaponskih panela, razvijaju se brojne metode i tehnologije kojima se omogućuje uporaba i ponovna upotreba materijala od kojih su PV paneli izgrađeni. Neke od tih tehnologija bit će navedene u nastavku.

Jedna od tehnologija jest inovativni proces recikliranja u kojem se obnavljaju silicijske ćelije, nakon čega se reciklirane ćelije koriste za proizvodnju PV panela koji ne sadrže olovo, a eksperiment su provodili Shin i suradnici u svojem istraživanju navedene teme. Prvi korak u dobivanju silicijevih ćelija jest otapanje srebra i aluminijske korištenjem dušične kiseline, odnosno kalijevog hidroksida. Sljedeći je korak uklanjanje antirefleksivnog premaza, nakon čega se panel premazuje pastom i zagrijava. Reciklirane ćelije bez olova nakon navedenog procesa pokazuju učinkovitost jednaku kao i silicijske ćelije od kojih su nastale (25).

U procesima recikliranja PV panela, fotonaponske se ćelije odvajaju od stakla te se pri tome uklanja EVA (etilen vinil acetat) sloj različitim metodama, poput toplinske obrade. Prilikom tog procesa mogu se osloboditi neke opasne komponente koje su sastavni dio panela, a do toga dolazi zbog degradacije prilikom termičke obrade. Iz tog razloga, Dias i suradnici (26) u svojoj su studiji analizirali optimalne načine kojima bi se reciklirale ili razgradile opasne komponente i izbjeglo njihovo odlaganje. Metode poput pirolize učinkovite su za spomenutu svrhu, posebno pri temperaturi od 500 °C pri kojoj se uklanja više od 99% polimera prisutnih u fotonaponskim panelima.

Isto tako, Rocchetti i Beolchini (27) u svojoj su studiji uspoređivali konvencionalan i inovativan način recikliranja CIGS panela te kadmij telurid panela. U konvencionalnom recikliranju moduli se drobe, staklo se oporabljuje, dok se EVA sloj, kao što je već navedeno u tekstu iznad, toplinski obrađuje kako bi se dobila energija, a preostali se materijal odlaže na odlagalište otpada. Inovativnim recikliranjem omogućuje se oporavak selenija, indija i galija iz CIGS panela te telura iz kadmij telurid panela. Inovativni način recikliranja korišten u studiji obuhvaćao je drobljenje, ispiranje kiselinom, taloženje, filtraciju, ekstrakciju površinski aktivnom tvari i otapalom i elektrotaloženje, odnosno taloženje čvrstog materijala na elektrodnu površinu elektrolizom. Kao zaključak studije navedeno je kako inovativan način recikliranja pospješuje utjecaj procesa na okoliš za PV panel od kadmijevog telurida. Za tu vrstu panela pokazan je manji negativan utjecaj na globalno zatopljenje, odnosno ugljični otisak, eutrofikaciju, oštećenje ozonskog omotača i zakiseljavanje prilikom procesa inovativnog recikliranja.

Teknetzi i suradnici (28) istraživali su mogućnost korištenja procesa ispiranja s ciljem oporavka materijala, ponajviše srebra i indija iz CIGS panela. Uz navedeni proces, istraživala se i količina onečišćivala koja se otpusti prilikom istog. Dokazano je povećanje prinosa srebra i indija prilikom korištenja ove metode, ali i povećanje otpuštenih

onečišćivala. Eksperimentalno je utvrđeno da je najbolji omjer površine panela izražene u kvadratnim centimetrima i tekućine koja se koristi za ispiranje izražene u mililitrima 1:3 pri čemu se koristilo 2 mL dušične kiseline i pokazan je potpuni oporavak srebra i oporavak indija od 85% nakon 24 sata ispiranja na sobnoj temperaturi. Pri istim uvjetima, ali korištenjem 0,5 mL dušične kiseline ekstrahirano je 85% srebra i 30% indija, dok je korištenjem 0,1 mL dušične kiseline na 1 kvadratni centimetar površine dobivena povećana čistoća srebra kroz početni korak selektivnog ispiranja cinka u periodu od sat vremena.

Fiandra i suradnici (29) istraživali su mogućnost recikliranja PV panela takozvanim ENEA procesom koji uključuje delaminaciju, odnosno podjelu materijala na slojeve lomljenjem, mljevenje, denzimetrijsku separaciju kojom se mješavine materijala odvajaju prema gustoći te devitrifikaciju, to jest proces kojim se staklo pretvara u kristalni materijal. Ovim se procesima omogućuje odvajanje i oporavak polimera iz PV panela te se izbjegava raspršivanje fluoriranih polimera, a pritom se smanjuje potrošnja energije i veličina opreme. Isto tako, omogućuje se oporavak bakra u vrijednosti oko 95% te oporavak srebra koji je važan za maksimizaciju prihoda prilikom recikliranja jer srebro u najvećem postotku pridonosi neto vrijednosti postupka.

Wang i suradnici (5) u svojoj su studiji ispitivali izvedivost uporabe silicijevog praha primjenom centrifugiranja. Pomoću dušične kiseline i acetona uklonjeni su otopina glikola i fragmenti željeza nakon čega je korišteno centrifugiranje s ciljem odvajanja rezova i abraziva silicijevog karbida (SiC). Postupak centrifugiranja odrađen je korištenjem teške tekućine gustoće između silicija i silicijevog karbida. Taloženjem volumne koncentracije čvrste tvari na 6,5%, gustoće teške tekućine na 2,35 g/cm<sup>3</sup>, vremena miješanja 60 minuta i vremena centrifugiranja 60 minuta, dobiven je produkt čistoće silicija koji je iznosio 90,8%. Oporavljeni Si može se ponovno koristiti ukoliko se pravilno obradi, no provedeno eksperimentalno ispitivanje imalo je nekoliko nedostataka povezanih s koncentracijom, upotrebom teške toksične tekućine, dugo vrijeme obrade i nemogućnost uklanjanja submikronskih čestica silicijevog karbida.

### 3.3. Prednosti i izazovi recikliranja fotonaponskih panela

Recikliranje fotonaponskih panela dio je procesa gospodarenja otpadnim PV panelima koji može imati veliku ekonomsku vrijednost. Ovi moduli sadrže brojne vrijedne elemente - od aluminijski koji u najvećem postotku čini okvire fotonaponskih panela, a koji ima visoku



vrijednost recikliranja koja kontinuirano raste zbog sve manjih globalnih zaliha, bakra, silicija, selenija pa sve do indija, galija, kadmija, telurija i srebra koji čine značajan postotak u ukupnoj novčanoj vrijednosti fotonaponskih panela (30).

Ukoliko se odvajanje i vađenje materijala iz panela na kraju njihovog životnog vijeka odrađuje na ispravan i učinkovit način, ti se materijali mogu oporabiti i, na kraju procesa uporabe, ponovno staviti na tržište.

Iz ranije navedenih tehnologija vidljivo je da se prilikom postupaka recikliranja često oslobađaju otpadne komponente, opasni polimeri i čestice koje se u krutom, tekućem i/ili plinovitom agregatnom stanju otpuštaju u okoliš. Iz tog je razloga, uz poboljšanje i unaprjeđenje postupaka recikliranja PV panela, potrebno raditi na što učinkovitijem uklanjanju opasnosti koje dolaze od ne oporabljenih polimera te pojedinih komponenti fotonaponskih panela poput olova, bakra, indija i drugih koji su toksični za žive organizme (30).

Recikliranje fotonaponskih panela uzrokuje manji negativan utjecaj na okoliš u odnosu na odlaganje istih. Nekoliko je studija potvrdilo da bi, s obzirom na trendove potražnje, do 2050. godine bilo stvoreno i odloženo oko 60 milijuna tona otpadnih PV panela na odlagališta. S obzirom na značajnu količinu toksičnih tvari ta bi količina modula mogla imati negativan utjecaj na žive organizme u blizinama odlagališta, pogotovo ukoliko se radi o divljim odlagalištima bez nadzora (30).

Recikliranje PV modula još je uvijek u fazi razvijanja i istraživanja te je potrebno optimizirati metode kako bi se postigla maksimalna učinkovitost procesa te kako bi isti imao minimalan negativan utjecaj na okoliš, odnosno što je moguće manji ugljični otisak, utjecaj na zakiseljavanje, eutrofikaciju i ostalo.

## 4. Piroliza

Piroliza je termičko-kemijski proces koji se definira kao razgradnja organskih spojeva, odnosno razgradnja velikih molekula na male, u odsutnosti kisika i vode na visokim temperaturama s kratkim trajanjem zadržavanja pare. Ovim se postupkom organski materijali pretvaraju u njihove plinovite komponente, čvrsti ostatak ugljika i pepela te tekućinu koja se naziva pirolitičko ulje. Piroliza je koristan proces za obradu organskih materijala koji se raspadaju pod djelovanjem više temperature, primjeri uključuju dioksine, poliklorirane bifenile i policikličke aromatske ugljikovodike. Iako piroliza nije učinkovita za uklanjanje ili uništavanje anorganskih materijala kao što su metali, može se koristiti u tehnikama koje te materijale čine inertnima (31).

Piroliza ima brojne primjene u zelenim tehnologijama. Korisna je u ekstrakciji materijala iz proizvoda poput guma za vozila, stvaranju biogoriva iz usjeva i otpadnih proizvoda te uklanjanju organskih onečišćivala iz tla. Isto tako, ovaj termičko-kemijski proces koristi se za aromatske ugljikovodike, alkohol, eter te za proizvodnju spojeva poput metanola i drugih. Ovim procesom proizvode se neke tekućine i plinovi koji se mogu kondenzirati. Ovaj termičko-kemijski proces ireverzibilan je proces što znači da se uzrokuje promjena kemijskog sastava i fizičkog stanja (31).

Brzina pirolize raste s temperaturom. Kod industrijskih primjena korištene su temperature često iznad 400 °C, dok u djelatnostima manjeg opsega temperatura može biti i mnogo niža.

S obzirom na temperaturu pri kojoj se odvija, pirolizu dijelimo u tri kategorije. Prva kategorija jest nisko-temperaturna piroliza koja se odvija na temperaturama do 500 °C, te se pri navedenim vrijednostima temperatura mogu razgrađivati alkani ili se odvija takozvana brza ili trenutačna piroliza prilikom čega se dobiva tekućina iz čvrste biomase. Druga kategorija pirolize je srednje-temperaturna i odvija se na temperaturi između 500 i 800 °C prilikom čega dolazi do nastanka malih količina ulja i katrana. Treća je kategorija visoko-temperaturna piroliza na temperaturama višim od 800 °C. Piroliza ove kategorije može se koristiti za razgradnju metana na vodik i ugljik na temperaturama između 1300 i 1400 °C (32,33).

#### 4.1. Vakuumska piroliza

Metoda vakuumske pirolize proces je toplinske razgradnje koji se odvija u reaktoru opremljenim vakuumskim sustavom. Navedeno eliminira potrebu za katalizatorom, čineći proces učinkovitijim i isplativijim. Ovaj sustav snižava unutarnji tlak reaktora, što posljedično snižava vrelište ili temperaturu raspadanja supstrata. To omogućuje brzu i učinkovitu toplinsku razgradnju materijala. Vrijeme zadržavanja u ovoj vrsti kemijskog procesa kratko je zbog vrlo niskog radnog tlaka (34).

Prilikom zagrijavanja u reaktoru, organski materijali s kompleksnom strukturom razgrađuju se na jednostavniju strukturu. Većina materijala koji se obrađuje vakuumskom pirolizom inertan je, odnosno ne stupa u kemijske reakcije s ostalim tvarima. Ova metoda smatra se relativno novom tehnologijom, a najčešće se koristi za oporabu biomase ili za pretvorbu nekih drugih vrsta otpada poput plastike u korisne proizvode za ponovno korištenje (35).

Vakuumska piroliza provodi se u stanju vakuuma s ciljem izbjegavanja drugih kemijskih reakcija te kako bi bila sigurnija za okoliš. Materijal se zagrijava u vakuumskoj peći do određene temperature te kada dosegne istu slijedi proces hlađenja (33).

Vakuum je stanje koje se postiže vakuumskim pumpama prilikom čega se iz zatvorenog prostora isisava zrak, a što je tlak plina u tom prostoru niži, vakuum je viši.

Ovom vrstom toplinske razgradnje omogućuje se obrada uz minimalno onečišćenje okoline. Isto tako, moguće je izvoditi više postupaka u jednom ciklusu te se stvaraju manje deformacije i iskrivljenja u usporedbi s ostalim načinima termičke obrade. Materijali koji se obrađuju na ovaj način ostaju svijetle boje, odnosno površina im ne tamni jer se sprječava oksidacija (35).

Vakuumska piroliza se provodi u visoko-specijaliziranim pećima gdje se postiže vakuum korištenjem vakuumskih crpki, a isti predstavlja zaštitnu atmosferu prilikom termičke obrade. Vakuum ima različite kvalitete koje se postižu različitim uređajima koji koriste različite fizikalne principe, a tlak vakuuma najčešće se kreće između  $10^{-3}$  do  $10^{-5}$  (35).

Difuzijska pumpa, ionska pumpa, kriogenska pumpa, turbomolekularna pumpa, sublimacijska pumpa i mehanička rotacijska pumpa uređaji su za postizanje vakuuma. Svrha uklanjanja zraka iz komore za termičku obradu, odnosno postizanja stanja vakuuma,

jest mogućnost obrade proizvoda i materijala bez procesa oksidacije kako bi se postigla razgradnja postojećih oksida (35).

#### 4.1.1. Vakuumske peći

Kao što je već spomenuto, vakuumska peć vrsta je peći koja može zagrijavati materijale na vrlo visoke temperature i provoditi različite toplinske režime s velikom stabilnošću i minimalnim utjecajem na okoliš. Postoji veliki broj različitih tipova vakuumskih peći koje se međusobno razlikuju u oblicima i volumenima predmeta koji se obrađuju. Navedene peći imaju široku primjenu za procese poput cementiranja, kaljenja, sinteriranja, tarenja i inačica postupaka kojima se omogućuje obogaćivanje površina određenim kemijskim elementima, postupak kemijskog prevlačenja, otplinjavanje i drugi, iznad navedeni postupci (33).

Vakuumske peći dijele se, prema konstrukciji, na horizontalne jednokomorne peći, horizontalne višekomorne peći, odnosno peći s hladnom komorom, vertikalne jamske peći i vertikalne peći sa spuštajućim dnom (33).

Kod ovih vrsta peći kontrolira se tlak unutar komore u kojoj se provodi termička obrada te se zbog toga omogućuje da potrebne strukturne transformacije dostignu svoje odgovarajuće parametre.

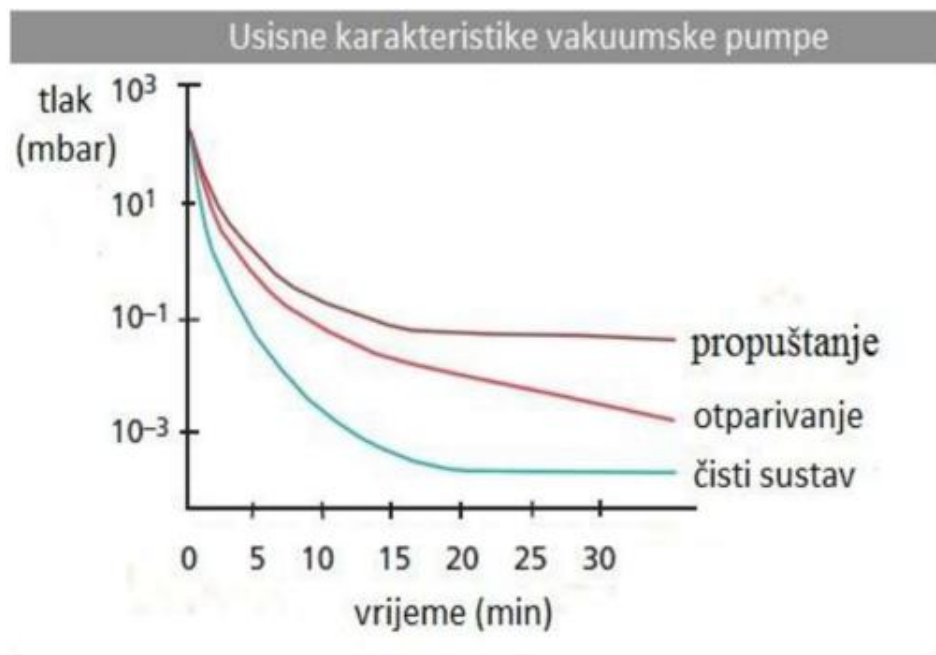
Dugogodišnjim radom ili neispravnom konstrukcijom peći dolazi do pojave propuštanja pa se za svaku vakuumsku peć računa omjer porasta tlaka i vremena, odnosno takozvani „stupanj propusnosti peći“ koji mora biti manji od  $1 \cdot 10^{-3}$  mbar/s. Propuštanje se može pojaviti na različitim mjestima, no najčešće se događa na vratima ili ventilima peći pa se zbog toga moraju osigurati uvjeti unutar komore kod kojih se neće dogoditi veliko propuštanje koje bi uzrokovalo porast tlaka, a time će se smanjiti opasnost od oksidacije površina (35).

Uz proces propuštanja, kod vakuumskih peći može se pojaviti i proces selektivnog otparivanja koji uključuje sublimaciju ili isparavanje pojedinih materijala poput silicija, kroma, mangana i drugih pri visokim vrijednostima temperatura i niskim vrijednostima tlakova. Selektivno otparivanje može uzrokovati nepoželjan porast tlaka u vakuumskim pećima te se javlja pri temperaturama od  $950^{\circ}\text{C}$  i više (33).

Vakuumska peć ima dodatne komponente kao što su uređaji za mjerenje razine vakuuma, uređaji za detekciju propuštanja, vakuumske pumpe, različite vrste ventila te posebni sustavi

za hlađenje kako bi se ostavio vakuum. Isto tako, komora za zagrijavanje mora biti hermetički zatvorena. Zbog navedenih razloga, izrada vakuumske peći složen je i skup proces pa je i sama prodajna cijena iste visoka u odnosu na druge peći za termičku obradu materijala (34).

Na Slici 8 prikazane su tri različite usisne karakteristike vakuumskim pumpi. Gdje smeđa krivulja opisuje pad tlaka s vremenom prilikom pojave propuštanja u peći. Krivulja crvene boje prikazuje pad tlaka kod pojave selektivnog otparivanja, dok plava krivulja prikazuje sustav gdje se ne odvija ni proces propuštanja ni proces selektivnog otparivanja (33).



Slika 8: Usisne karakteristike vakuumske pumpe

(preuzeto sa: <https://zir.nsk.hr/islandora/object/gfv%3A372/datastream/PDF/view>. Datum preuzimanja: 22.4.2024.)

U vakuumskim pećima prilikom zagrijavanja postižu se radne temperature čije su vrijednosti od 1100 °C do 1500 °C, no najčešća temperatura iznosi oko 1200 °C i to je temperatura homogenizacije. Zagrijavanje unutar komore vrši se zračenjem, odnosno radijacijom te je moguće postići jednoliku temperaturu unutar komore za zagrijavanje s vrlo malim odstupanjima od nazivnih vrijednosti. Kako bi se navedeno postiglo, ključni su pravilan izbor materijala te pravilna izrada komore za zagrijavanje. Na mnoga svojstva unutar vakuumskih peći utječu fizikalna svojstva konstrukcije za zagrijavanje koja obavlja šaržu i njezini elementi koji vrše zagrijavanje (33).

Neke vrste vakuumskih peći sadrže poseban ventilator koji se koristi za ubacivanje inertnih plinova poput dušika koji kruži oko šarže i omogućava konvekcijsko zagrijavanje. Prednost zagrijavanja uz korištenje inertnog plina jest izbjegavanje pojave selektivnog otparivanja. Isto tako, inertni plin koji se ubacuje u komoru za zagrijavanje pri tlaku od 1 bar štiti materijale, odnosno sprječava onečišćenje uzoraka molekulama koje isparavaju u komoru. Onečišćenje loše utječe na kvalitetu uzoraka te uzrokuje promjene fizikalnih svojstava (35).

Postupak hlađenja u vakuumskim pećima provodi se korištenjem struje stlačenog plina, no postoje i izvedbe s posebnim komorama za hlađenje u ulju. Hlađenje se ostvaruje strujanjem plina oko uzorka. Plinovi koji se najčešće koriste u svrhu hlađenja su dušik, helij, argon i ponekad vodik. Brzina hlađenja veća je od hlađenja na mirnom zraku, ali je sporija od hlađenja u ulju. Također, brzina hlađenja manja je od brzine zagrijavanja. Čimbenici koji utječu na intenzivnost hlađenja u plinu su vrsta plina, tlak plina, brzina i vrsta strujanja te kut nastrojavanja (33).

#### 4.1.2. Uvjeti pirolize fotonaponskih panela

Znanstvenici godinama provode eksperimentalna ispitivanja s ciljem utvrđivanja optimalnih uvjeta za provedbu termičke obrade otpadnih fotonaponskih panela. Neki od tih ispitivanja navedeni su u nastavku, a svaki od njih proveden je pri različitim uvjetima temperature i vremena provedbe te su analizirani dobiveni podaci. PV paneli sastoje se od polimera EVA (etilen vinil acetat), polivinilfluorid (PVF) i polietilentereftalat (PET), a u sljedeće navedenim eksperimentima najčešće je stavljen naglasak na temperature pri kojoj se razgradio EVA sloj.

Dias (26) je proučavao učinak pirolize na razgradnju materijala otpadnih fotonaponskih panela na način da su prethodno uklonjeni aluminijski okviri s panela, karakterizirani su polimeri vizualnim pregledom, tehnikom infracrvene spektroskopije Fourierove transformacije te termogravimetrijskom analizom. Fotonaponski su paneli zatim mljeveni, materijal je prosijavan te je izvršena piroliza i analiza dobivenih podataka. Frakcije usitnjenih fotonaponskih panela razvrstane su u tri skupine od kojih je prva sadržavala frakcije manje od 0,5 mm, druga između 0,5 i 1 mm, dok je treća sadržavala frakcije veće od 1 mm. Temperatura provedbe pirolize u sklopu ovog eksperimenta iznosila je 500 °C te se materijal zadržavao u peći 30, 60 i 180 minuta. Piroliza je provedena u struji dušika koja je iznosila 1 L/min. Zaključci navedenog laboratorijskog ispitivanja pokazali su da je

optimalna temperatura za provedbu analize 500 °C. Na temperaturama višim od navedene materijal se nastavlja razgrađivati, ali je stopa gubitka mase 6,25 puta manja nego kod optimalne temperature. Kroz 30 minuta uklonjeno je više od 99% polimera koji su prisutni u fotonaponskim panelima, dok je 75% mase polimera (EVA) razgrađeno na temperaturama između 400 i 500 °C. Što je veća veličina čestica, to je veći gubitak mase. Analiza podataka pokazala je da nema razlike u masi razgrađenog materijala razlike ako je vrijeme zadržavanja na 500 °C 30, 60 ili 180 minuta.

Drugi je eksperiment (36) odrađen na način da je provedeno mljevenje PV panela, nakon čega je materijal podijeljen u grupe različitih veličina frakcija. Prva grupa s frakcijama manjim od 0,08 mm, druga s frakcijama veličine od 0,08 do 0,4 mm i treća s frakcijama veličine između 0,4 i 1 mm te je utvrđeno da frakcije veličine 0,08-0,4 mm sadrže elemente poput željeza, aluminijska i cinka, dok su plemeniti i opasni metali poput srebra, telurija, kadmija, bakra i titanija sadržani u frakcijama manjim od 0,08 mm. Piroliza materijala provedena je kroz period od 60 minuta. Razgradnja EVA sloja odvijala se u dvije faze- deacetilacija s otpuštanjem octene kiseline na temperaturama između 300 i 400 °C nakon čega je uslijedilo nasumično cijepanje lanaca molekula na propan, propen, etan, butan, heksan na temperaturama između 460 i 570 °C. Nakon prvog mljevenja materijala praćenog toplinskom obradom, oporavak je stakla iznosio 50-70%, a nakon dodatnog mljevenja čekićem oporavak je iznosio 80-85%.

Eksperiment Tammaro i suradnika (37) odrađen je na tri materijala veličine 10 x 10 cm u periodu od 30 minuta s protokom zraka 1 L/min. Piroliza je odrađena na način da je temperatura postepeno rasla od 20 do 600 °C te je zaključeno da se PVF i EVA razgrađuju na temperaturama od 450 °C, odnosno 350 °C. EVA se počela razgrađivati na temperaturi od 350 °C i potpuno se razgradila na temperaturi od 520 °C. Termička obrada omogućila je odvajanje glavnih komponenata - krutog ostatka, metalnih elektroda, silicija i stakla. Provedena je i analiza metala u plinovitoj fazi prilikom procesa te su pronađeni aluminij, selenij, olovo, kadmij, indij, arsen, cink, bakar te srebro. Na Slici 9 vidljivo je kolika je razlika u masi uzoraka prije i nakon provedbe pirolize.

Masa komponentata odvojenih nakon termičke obrade						
Prije zagrijavanja		Nakon zagrijavanja				
Uzorak	Masa (g)	Kruti ostatak (g)	Silicij (g)	Staklo (g)	Metalne elektrode (g)	Ukupna masa (g)
A1	110	0.55	9.793	81.351	0.723	92.418
B1	186	0.423	9.475	159.02	0.312	169.229
C1	110.16	0.122	7.763	85.263	0.341	93.489

Slika 9: Razlika u masi uzoraka PV panela prije i nakon pirolize

(preuzeto sa: <https://shorturl.at/nCM0w>. Datum preuzimanja: 24.4.2024.)

Fan Li i suradnici (38) odradili su laboratorijsko istraživanje u kojem su upotrebljavane različite brzine zagrijavanja koje su iznosile 10 °C/min, 15 °C/min, 20 °C/min, 25 °C/min. Prilikom toga, uočene su faze smanjenja mase EVA sloja na temperaturama između 300 i 510 °C te smanjenje mase silikonskog gela (SILICA GEL) na temperaturama između 100 i 830 °C. Učinkovitost procesa pirolize u navedenom eksperimentalnom istraživanju iznosila je 99-100% za razgradnju EVA sloja te 60-62% za razgradnju silikonskog gela.



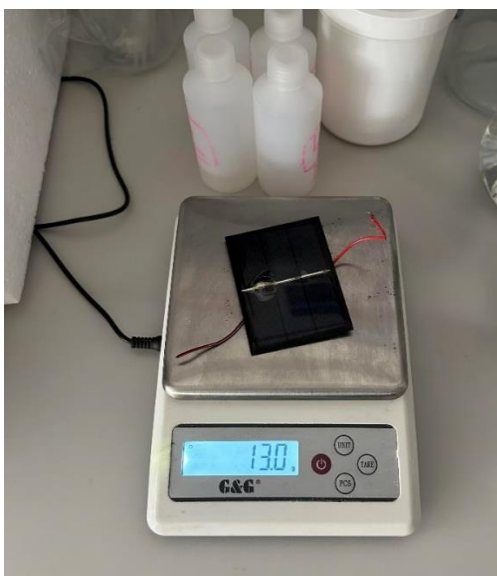
## 5. Eksperimentalni dio

### 5.2. Materijali

Vakuumska piroliza, kao što je već navedeno u prethodnim dijelovima rada, primjenjuje se u obradi otpada. Cilj je ovog diplomskog rada ispitati mogućnosti recikliranja otpadnih fotonaponskih panela korištenjem vakuumske pirolize u peći. U eksperimentalnom ispitivanju korišten je dio otpadnog fotonaponskog panela koji je žaren na različitim temperaturama u periodu od 30 minuta.

#### 5.2.1. Uzorak

Uzet je dio otpadnog fotonaponskog panela (Slika 10) koji je izvagan te mu je masa iznosila 13 g sa žicama, odnosno 12,1 g bez žica. Nakon toga, uzorak je škarama razrezan na manje komade koji su se naknadno koristili za provedbu eksperimenta.



Slika 10: Izvagan uzorak otpadnog fotonaponskog panela sa žicama

#### 5.2.2. Vakuumska peć

Eksperimentalni dio ovog diplomskog rada provoden je u Laboratoriju za inženjerstvo okoliša u zgradi Geotehničkog fakulteta. Cijevna peć za žarenje korištena u svrhu ispitivanja tipa je LPT, modela LPT 50-450, proizvođača Estherm d.o.o. Peć je podijeljena u tri odvojene zone s temperaturnom regulacijom i konstruirana je s dvije zasebne polutke.

Automatika peći sastoji se od tri digitalna temperaturna regulatora koji imaju mogućnost namještanja temperature, brzine grijanja i vremena grijanja na krajnjoj temperaturi te prijenosa snage, glavne sklopke i indikacije rada grijača. Maksimalna temperatura peći jest 1500 °C, volumen radnog prostora iznosi 3,5 litara, a dimenzije su raznog prostora 50 x 450 mm. Slika 11 prikazuje peć za provedbu vakuumske pirolize. Vakuumska piroliza u peći provedena je u struji dušika. Uz peć se nalazi i vakuumska pumpa proizvođača Vacuubrand, modela MZ 2C NT te uređaj koji se koristi za rashlađivanje plinova koji se ispuštaju prilikom pirolize - hladilo Julabo 300F. Na Slici 12 vidljivi su svi navedeni uređaji koji omogućuju provedbu procesa vakuumske pirolize.



Slika 11: Peć za provedbu vakuumske pirolize



Slika 12: Cijevna peć za žarenje, vakuumska pumpa i uređaj za rashlađivanje plinova

### 5.3. Metodologija i provedba eksperimenta

Na početku eksperimentalnog istraživanja proveden je probni postupak žarenja prilikom čega je uzet jedan od razrezanih komada fotonaponskog panela i izvagan. Masa probnog uzorka (Slika 13) prije zagrijavanja u peći iznosila je 2,1 g, dok je zajedno s keramičkom lađicom u kojem je uzorak zagrijavan masa iznosila 9,7 g.



Slika 10: Masa probnog uzorka prije zagrijavanja u peći

Probni se uzorak zagrijavao u peći na temperaturi 500 °C u periodu od 30 minuta. Nakon toga, isti je izvađen iz peći (Slika 14) i ponovno izvagan te mu je masa iznosila 0,6 g. Masa se navedenog uzorka, u odnosu na masu prije zagrijavanja, smanjila za 1,5 g.



Slika 11: Probni uzorak nakon zagrijavanja u peći

Nakon probnog uzorka, ispitana su još tri uzorka istovremeno. Proces je bio isti kao i s probnim uzorkom. Prvo su Uzorci 1, 2 i 3 bili izvagani, nakon čega su smješteni u staklenu cijev unutar peći i provedena je vakuumska piroliza. Uzorak 1 zagrijavan je na 400 °C, Uzorak 2 zagrijavan je na 500 °C, a Uzorak 3 zagrijavan je na temperaturi 600 °C. Sva tri uzorka zagrijavana su 30 minuta nakon postignutih željenih temperatura. Postignut je vakuum i prilikom cijelog eksperimenta zadržana je vrijednost tlaka -0,75 bar. Nakon zagrijavanja, Uzorak 1 imao je masu 1,3 g, Uzorak 2 imao je masu 0,6 g, dok je Uzorak 3 imao masu 0,5 g.

Slika 15 prikazuje cijevnu peć za žarenje koja je korištenja za vakuumsku pirolizu tri spomenuta uzorka te odabrane uvjete pri kojima se odvijao proces.



Slika 12: Peć i odabrani uvjeti za provedbu vakuumske pirolize

Na Slici 16 prikazan je Uzorak 1 prije i nakon zagrijavanja u peći, na Slici 17 prikazan je Uzorak 2 prije na nakon zagrijavanja u peći, dok je na Slici 18 prikazan Uzorak 3 prije i nakon vakuumske pirolize.





Slika 13: Uzorak 1 prije i nakon zagrijavanja u peći



Slika 14: Uzorak 2 prije i nakon zagrijavanja u peći



Slika 15: Uzorak 3 prije i nakon zagrijavanja u peći

## 6. Rezultati istraživanja i diskusija

Mase probnog uzorka te Uzoraka 1, 2 i 3 prije i poslije zagrijavanja u peći, temperature zagrijavanja te gubitak mase pločica zagrijavanjem vidljivi su u tablici ispod teksta.

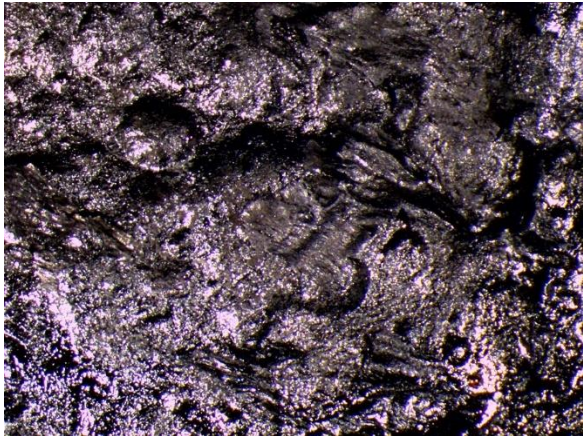
Tablica 1: Prikaz mase uzoraka prije i nakon zagrijavanja u peći, temperature zagrijavanja i gubitak mase zagrijavanjem

	temperatura zagrijavanja/ °C	masa prije zagrijavanja	masa nakon zagrijavanja	gubitak mase zagrijavanjem
Proba	500	2,1 g	0,6 g	1,5 g
Uzorak 1	400	3,2 g	1,3 g	1,9 g
Uzorak 2	500	2,2 g	0,6 g	1,6 g
Uzorak 3	600	2 g	0,5 g	1,5 g

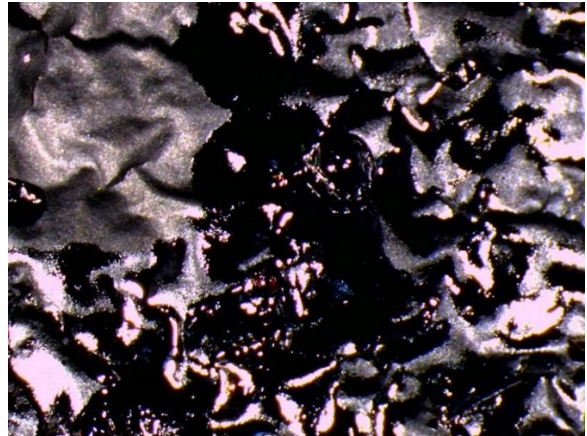
Kao što je vidljivo iz tablice, gubitak mase zagrijavanjem nije se povećavao s obzirom na povećanje temperature te je razlika između najmanjeg i najvećeg gubitka mase zagrijavanjem iznosila 0,4 g. Vidljiv je veći gubitak mase pri temperaturi od 400 °C, odnosno najnižoj temperaturi zagrijavanja te manji gubitak mase kod najviše temperature zagrijavanja od 600 °C.

Nakon zagrijavanja uzoraka u peći, odnosno provedbe vakuumske pirolize, isti su poslani na analizu u Laboratorij za inženjerstvo okoliša gdje je svaki od njih pregledan pod mikroskopom i zapisana su opažanja. Na Slikama 19 - 22 nalaze se mikroskopske snimke probnog uzorka te Uzoraka 1, 2 i 3.

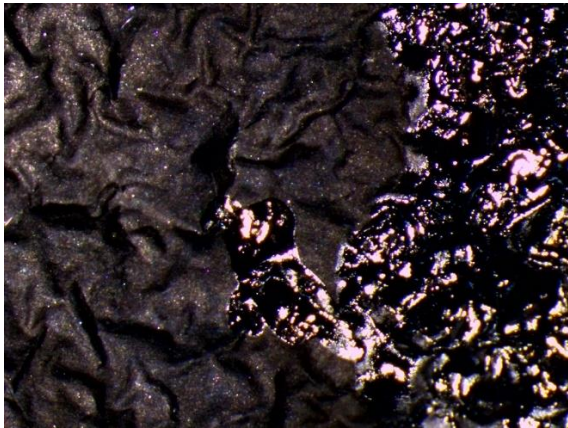




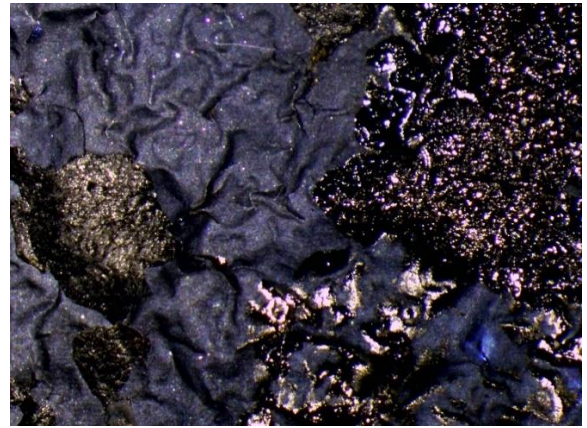
Slika 16: Mikroskopska slika probnog uzorka



Slika 17: Mikroskopska slika Uzorka 1



Slika 18: Mikroskopska slika Uzorka 2



Slika 19: Mikroskopska slika Uzorka 3

Na slikama 19-22 vidi se više različitih područja te je veći dio uzoraka karboniziran i prekriven amorfnom masom uslijed razvoja produkata pirolize. Na pojedinim dijelovima vidljive su sitne čestice koje jasno reflektiraju svjetlost mikroskopa, što ukazuje na djelomični razvoj strukturiranih produkata, potencijalno grafita, grafena, a možda i ugljikovih nanocjevčica. Stvaranje navedenih ugljikovih spojeva moguće je zbog sadržaja polimera u samim panelima. Osim navedenog, moguća je i agregacija elementarnih metalnih čestica koje su se uslijed redoks reakcija tijekom pirolize izdvojile na površini materijala.

Nakon vakuumske pirolize uzoraka u Laboratoriju za inženjerstvo okoliša primijećena je razgradnja EVA sloja, odnosno sloja etilen vinil acetata te pojava frakcija stakla i prašine

koja sadrži čestice metala. U eksperimentu Pagnanelli i suradnika (36) primijećena je razgradnja EVA sloja do struktura poput propana, propena, etana, butana i slično što je moguće i kod ispitivanja u ovom diplomskom radu. Vidljivo je da su temperature između 400 i 600 °C dovoljne za razgradnju polimera te razdvajanje pojedinih materijala koji izgrađuju fotonaponske panele.

Kod četiri ispitana uzorka u sklopu ovog rada vidljivo je da se razgradilo između 25 i 40,6% mase na temperaturama između 400 i 600 °C, što je manje u odnosu na eksperimentalna istraživanja Diasa (26) kod kojih je termogravimetrijskom analizom uzoraka mljevenih modula utvrđena razgradnja približno 75% polimerne frakcije na temperaturama između 400 i 500 °C. Isto tako, kao što je navedeno u radu autora Dias, gubitak mase na temperaturama 400 i 500 °C, pri čemu se temperatura od 500 °C u brojnim radovima smatra optimalnom temperaturom za provedbu termičke obrade fotonaponskih panela, veći je u odnosu na gubitak mase na višim temperaturama. Naime, Dias je u svom radu potvrdio da je pri optimalnoj temperaturi pirolize gubitak mase najveći, dok se na višim temperaturama isti smanjuje. Uz to, u radu Diasa navedeno je da se gubitak mase pirolizom povećava s obzirom na povećanje veličina čestica što ukazuje da se polimerna frakcija nastoji u najvećoj koncentraciji zadržavati u nakupini većih veličina čestica. Isto je vidljivo i u rezultatima eksperimentalnog istraživanja u Laboratoriju za inženjerstvo okoliša gdje su frakcije PV modula veće mase postigle veći gubitak mase zagrijavanjem u peći.

Pagnanelli i sur. (36) svojim su istraživanjem termičke obrade otpadnih fotonaponskih panela utvrdili da su kao rezultat termičke obrade odvojeni višeslojni fragmenti prilikom čega su vidljivi staklo i sitni crni elementi ćelija te njihovo djelomično prijanjanje na staklo. Isto tako, analizom je dokazana prisutnost metala poput bakra, cinka, selenija te željeza. U istraživanju u sklopu ovog diplomskog rada također su nakon obrade uočeni odvojeni višeslojni fragmenti te sitni fragmenti koji reflektiraju svjetlost, a mogli bi predstavljati čestice metala.

Za daljnju identifikaciju nastalih spojeva potrebne su detaljnije karakterizacije materijala, nakon čega se može pristupiti optimiziranju samog procesa vakuumske pirolize u cilju dobivanja željenih produkata.

## 7. Zaključak

Usljed sve manjih globalnih zaliha neobnovljivih izvora energije, zbog sve većih cijena istih te potrebe za očuvanjem kvalitete i zdravlja okoliša potrebno je uvoditi i razvijati uređaje koji omogućuju prikupljanje i korištenje energije iz obnovljivih izvora. Fotonaponski paneli koriste se već nekoliko desetljeća te se kroz to razdoblje i razvijaju, no zbog brzorastućih količina istih koje se instaliraju svugdje po svijetu, na kraju njihovog životnog vijeka problem će postati velike količine otpadnih panela koje će se na neki način morati oporabiti ili odložiti. Budući da PV moduli sadrže određeni udio tvari koje su toksične za okoliš i ljude, potrebno je razviti tehnologije recikliranja ove vrste panela te izvlačenja vrijednih materijala.

Brojna istraživanja bave se tematikom vakuumske pirolize fotonaponskih panela pa je tako ista opisana i u ovom radu. Metoda vakuumske pirolize proces je toplinske razgradnje koji se odvija u reaktoru opremljenim vakuumskim sustavom. Navedeno eliminira potrebu za katalizatorom, čineći proces učinkovitijim i isplativijim. Ovaj sustav snižava unutarnji tlak reaktora, što posljedično snižava vrelište ili temperaturu raspadanja supstrata. To omogućuje brzu i učinkovitu toplinsku razgradnju materijala.

Vakuumskom analizom četiri uzoraka otpadnog fotonaponskog panela provedenom u Laboratoriju za inženjerstvo okoliša pokazano je da je veći dio uzoraka karboniziran i prekriven amorfnom masom uslijed razvoja produkata pirolize. Isto tako, ukazuje se na djelomični razvoj strukturiranih produkata te je moguća agregacija elementarnih metalnih čestica izdvojenih na površini materijala. Navedeni pokazatelji slažu se s pojedinim istraživanjima znanstvenika navedenih u radu, no za daljnju identifikaciju nastalih spojeva potrebne su detaljnije karakterizacije materijala.

## 8. Literatura

1. Basengreen. Tko je izumio fotonaponske solarne panele? [citirano 28. lipanj 2024.]; Dostupno na: <https://www.basengreen.com/hr/who-invented-photovoltaic-solar-panels-2/>
2. S. Ashok. Solar energy. 2024. [citirano 28. lipanj 2024.]; Dostupno na: <https://www.britannica.com/science/solar-energy>
3. B. Fuk. Solarni paneli i što s njima kad postanu otpad. 2022. [citirano 28. lipanj 2024.]; Dostupno na: <https://hrcak.srce.hr/file/405711>
4. Iea. How Hybrid PV Technologies Can Contribute to the Decarbonisation of Thailand's Power System. [citirano 28. lipanj 2024.]; Dostupno na: <https://www.iea.org/energysystem/renewables/solar-pv>
5. E. Luketić. Mogućnosti recikliranja fotonaponskih panela. 2023. [citirano 28. lipanj 2024.]; Dostupno na: [file:///C:/Users/student/Downloads/ena\\_luketic\\_mogucnosti\\_recikliranja\\_fotonaponskih\\_panela\\_2%20\(2\).pdf](file:///C:/Users/student/Downloads/ena_luketic_mogucnosti_recikliranja_fotonaponskih_panela_2%20(2).pdf)
6. Klimatizacija.hr. Fotonaponski vs. solarni paneli- koja je razlika i koje odabrati? 2023. [citirano 28. lipanj 2024.]; Dostupno na: <https://klimatizacija.hr/blog/novosti/fotonaponski-vs-solarni-paneli-koja-je-razlika-i-koje-odabrati-85/>
7. Tamesol. The Future of Solar Energy: Innovations and Trends in Photovoltaic Technology for 2024. 2024. [citirano 28. lipanj 2024.]; Dostupno na: <https://tamesol.com/future-of-solar-energy/>
8. Klima koncept. Fotonaponski paneli. [citirano 28. lipanj 2024.]; Dostupno na: [https://www.klimakoncept.hr/hr/solarne\\_elektrane-fotonaponski\\_paneli-/3635/251](https://www.klimakoncept.hr/hr/solarne_elektrane-fotonaponski_paneli-/3635/251)
9. Klimatizacija.hr. Fotonaponski paneli- Vrste, prednosti i nedostaci. 2023. [citirano 28. lipanj 2024.]; Dostupno na: <https://klimatizacija.hr/blog/novosti/fotonaponski-vs-solarni-paneli-koja-je-razlika-i-koje-odabrati-85/>
10. Shi D, Guo Z, Bedford N. Nanoenergy Materials. Nanomaterials and Devices [Internet]. 01. siječanj 2015. [citirano 03. svibanj 2024.];255–91. Dostupno na: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B978145577754900010X>
11. Solar magazine. What Are CIGS Thin-Film Solar Panels? When to Use Them? 2022. [citirano 28. lipanj 2024.]; Dostupno na: <https://solarmagazine.com/solar-panels/cigs-thin-film-solar-panels/>
12. Valli Vishnubhotla. Solar Panels for UK Homes: A Complete Guide in 2024. 2024. [citirano 28. lipanj 2024.]; Dostupno na: <https://www.greenmatch.co.uk/blog/2015/09/types-of-solar-panels> <http://surl.li/svjla>
13. Mr.Solar. What Is A Solar Panel? [citirano 28. lipanj 2024.]; Dostupno na: <https://www.mrsolar.com/what-is-a-solar-panel/>
14. Enel X. What is a photovoltaic system and how does it work? [citirano 28. lipanj 2024.]; Dostupno na: <https://corporate.enelx.com/en/question-and-answers/how-does-a-photovoltaic-system-work>

15. Narodne novine. Zakon o gospodarenju otpadom. 2021. [citirano 14. srpanj 2024.]; Dostupno na: [https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2021\\_07\\_84\\_1554.html](https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2021_07_84_1554.html)
16. M. Peplow. Solar panels face recycling challenge. 2022. [citirano 28. lipanj 2024.]; Dostupno na: <https://cen.acs.org/environment/recycling/Solar-panels-face-recycling-challenge-photovoltaic-waste/100/i18>
17. Bogacka M. i sur. PV Waste Thermal Treatment According to the Circular Economy Concept. 03. studeni 2020. [citirano 03. srpanj 2024.]; Dostupno na: <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/24/10562>
18. Europska komisija. Strategija EU-a za solarnu energiju. 2022. [citirano 28. lipanj 2024.]; Dostupno na: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HR/TXT/HTML/?uri=CELEX:52022DC0221&from=EN>
19. DS New Energy. Regulativa EU-A Gura Naprijed Recikliranje PV-A WEEE Direktiva. 11. ožujak 2023. [citirano 04. srpanj 2024.]; Dostupno na: <https://hr.solarmoo.com/info/eu-regulation-pushing-forward-pv-recycling-the-93280023.html>
20. PHOTORAMA. PHOTORAMA - about us. [citirano 04. srpanj 2024.]; Dostupno na: <https://www.photorama-project.eu/>
21. Aspire. Implementation of a Circular economy Based on Recycled, reused and recovered Indium, Silicon and Silver materials for photovoltaic and other applications. 2015. [citirano 04. srpanj 2024.]; Dostupno na: Implementation of a Circular economy Based on Recycled, reused and recovered Indium, Silicon and Silver materials for photovoltaic and other applications
22. Circusol. Circular business models for the solar power industry. [citirano 14. srpanj 2024.]; Dostupno na: <https://www.circusol.eu/en>
23. PV CYCLE. PV CYCLE - About us. [citirano 25. srpanj 2024.]; Dostupno na: <https://pvcycle.org/#>
24. Narodne novine. Pravilnik o gospodarenju posebnim kategorijama otpada u sustavu Fonda. [citirano 03. rujan 2024.]; Dostupno na: [https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/full/2023\\_10\\_124\\_1717.html](https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/full/2023_10_124_1717.html)
25. Shin J, Park J, Park N. A method to recycle silicon wafer from end-of-life photovoltaic module and solar panels by using recycled silicon wafers. Solar Energy Materials and Solar Cells. 01. travanj 2017.;162:1–6.
26. Dias P, Javimczik S, Benevit M, Veit H, Bernardes AM. Recycling WEEE: Extraction and concentration of silver from waste crystalline silicon photovoltaic modules. Waste Management. 01. studeni 2016.;57:220–5.
27. Rocchetti L, Beolchini F. Recovery of valuable materials from end-of-life thin-film photovoltaic panels: environmental impact assessment of different management options. J Clean Prod. 15. veljača 2015.;89:59–64.
28. Teknetzi I, Holgersson S, Ebin B. Valuable metal recycling from thin film CIGS solar cells by leaching under mild conditions. Solar Energy Materials and Solar Cells. 01. travanj 2023.;252:112178.
29. Fiandra V, Sannino L, Andreozzi C. Photovoltaic waste as source of valuable materials: A new recovery mechanical approach. J Clean Prod. 20. siječanj 2023.;385:135702.

30. N. Spira. A GUIDE TO METALS FOR SOLAR SUPPLIERS. 2022. [citirano 28. lipanj 2024.]; Dostupno na: <https://www.kloecknermetals.com/blog/a-guide-to-metals-for-solar-suppliers/>
31. S. E. Boslaugh. Pyrolysis. 2023. [citirano 28. lipanj 2024.]; Dostupno na: <https://www.britannica.com/science/pyrolysis>
32. Hrvatska enciklopedija. Leksikografski zavod Miroslav Krleža 2013. – 2024. Piroliza. [citirano 14. srpanj 2024.]; Dostupno na: <https://www.enciklopedija.hr/clanak/piroliza>
33. S. Novak. Primjena vakuumske pirolize u obradi otpada. 2018. [citirano 28. lipanj 2024.]; Dostupno na: <https://www.enciklopedija.hr/clanak/piroliza>  
<https://zir.nsk.hr/islandora/object/gfv%3A372/datastream/PDF/view>
34. KinTek Solution. What Is The Vacuum Pyrolysis Method? [citirano 28. lipanj 2024.]; Dostupno na: <https://kindle-tech.com/faqs/what-is-the-vacuum-pyrolysis-method>
35. V. Mirković. Vakuumska piroliza plastičnog otpada za dobivanje grafena i ugljikovih nanocjevčica. 2022. [citirano 28. lipanj 2024.]; Dostupno na: <https://www.scribd.com/document/616310125/vakuumska-piroliza-plasticnog-otpada-za-dobivanje-grafena-i-ugljikovih-nanocjevica-mirkovic-valentina-pdf>
36. Pagnanelli F, Moscardini E, Granata G, Abo Atia T, Altimari P, Havlik T, i ostali. Physical and chemical treatment of end of life panels: An integrated automatic approach viable for different photovoltaic technologies. *Waste Management*. 01. siječanj 2017.;59:422–31.
37. Tamaro M, Rimauro J, Fiandra V, Salluzzo A. Thermal treatment of waste photovoltaic module for recovery and recycling: Experimental assessment of the presence of metals in the gas emissions and in the ashes. *Renew Energy*. 01. rujanj 2015.;81:103–12.
38. Li F, Tao J, Kumar A, Zhang J, Sun Y, Guo W, i ostali. Pyrolysis characteristics and kinetics of waste photovoltaic module: A TG-MS-FTIR study. *J Clean Prod* [Internet]. 10. ožujak 2024. [citirano 03. srpanj 2024.];444:141267. Dostupno na: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652624007145>

## Popis slika

Slika 1: Očekivani porasti kapaciteta obnovljivih izvora energije do 2028.godine .....	3
Slika 2: Monokristalni fotonaponski paneli.....	5
Slika 3: Polikristalni fotonaponski paneli.....	5
Slika 4: Tankoslojni fotonaponski paneli .....	6
Slika 5: Ilustracija koncentrirane fotonaponske ćelije.....	7
Slika 6: Način rada i dijelovi fotonaponskog panela.....	9
Slika 7: Usporedba materijala u silicijskim fotonaponskim panelima prema masi i novčanoj vrijednosti .....	10
Slika 8: Uisne karakteristike vakuumske pumpe .....	21
Slika 9: Razlika u masi uzoraka PV panela prije i nakon pirolize .....	24
Slika 10: Izvagan uzorak otpadnog fotonaponskog panela sa žicama.....	26
Slika 11: Peć za provedbu vakuumske pirolize .....	27
Slika 12: Cijevna peć za žarenje, vakuumska pumpa i uređaj za rashlađivanje plinova.....	27
Slika 13: Masa probnog uzorka prije zagrijavanja u peći .....	27
Slika 14: Probni uzorak nakon zagrijavanja u peći .....	28
Slika 15: Peć i odabrani uvjeti za provedbu vakuumske pirolize.....	29
Slika 16: Uzorak 1 prije i nakon zagrijavanja u peći.....	30
Slika 17: Uzorak 2 prije i nakon zagrijavanja u peći.....	30
Slika 18: Uzorak 3 prije i nakon zagrijavanja u peći.....	31
Slika 19: Mikroskopska slika probnog uzorka .....	33
Slika 20: Mikroskopska slika Uzorka 1.....	33
Slika 21: Mikroskopska slika Uzorka 2.....	33
Slika 22: Mikroskopska slika Uzorka 3.....	33

## Popis tablica

Tablica 1: Prikaz mase uzoraka prije i nakon zagrijavanja u peći, temperature zagrijavanja i gubitak mase zagrijavanjem .....	32
---	----



## Popis kratica

EU	Europska unija
PV	engl. photovoltaic
a-Si	amorfni silicij
CdTe	kadmijev telurid
a-Si- $\mu$ c Si	ćelije sa više spojeva
CIGS	bakar-indij-galij-diselenid
Se	bakar-indij-diselenid
CPV	engl. concentrator photovoltaic
R4	recikliranje/obnavljanje otpadnih metala i spojeva metala
R5	recikliranje/obnavljanje drugih otpadnih anorganskih materijala
SAD	Sjedinjene Američke Države
LCA	procjena životnog ciklusa
WEEE	engl. Waste form Electrical and Electronic Equipment
CO <sub>2</sub>	ugljikov dioksid
PVGIS	engl. Photovoltaic Geographical Information System
GW	gigavat
GWh	gigavatsat
INTERREG	engl. European Territorial Cooperation
EVA	etilen vinil acetat
SiC	silicijev karbid
PVF	polivinilfluorid
PET	polietilentereftalat