

# Mogućnosti recikliranja fotonaponskih panela

---

Luketić, Ena

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

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:130:492607>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-24**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
GEOTEHNIČKI FAKULTET

ENA LUKETIĆ

MOGUĆNOSTI RECIKLIRANJA FOTONAPONSKIH  
PANELA

ZAVRŠNI RAD

VARAŽDIN, 2023.

Sazivam članove ispitnog povjerenstva  
za 21.07.2023. u 9 sa  
Obranu ovog rada kandidat će vršiti i pred  
ispitnim povjerenstvom u Varaždinu  
Varaždin, 07.07.2023.

Predsjednik  
ispitnog povjerenstva

*Prof.dr.sc. Sanja Koroć*

### Članovi povjerenstva

- 1) Prof.dr.sc. Aleksandra Anić Vucinić
- 2) Doc.dr.sc. Ivana Presečki
- 3) Doc.dr.sc. Vlasta Zauki

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
GEOTEHNIČKI FAKULTET

ENA LUKETIĆ

MOGUĆNOSTI RECIKLIRANJA FOTONAPONSKIH  
PANELA

ZAVRŠNI RAD

KANDIDAT:  
ENA LUKETIĆ



MENTOR:  
prof. dr. sc. ALEKSANDRA ANIĆ  
VUČINIĆ

KOMENTOR:  
doc. dr. sc. IVANA PRESEČKI

VARAŽDIN, 2023.

## IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

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

MOGUĆNOSTI RECIKLIRANJA FOTONAPONSKIH PANELA

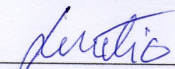
rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na istraživanjima te objavljenoj i citiranoj literaturi te je izrađen pod mentorstvom **prof. dr. sc. Aleksandre Anić Vučinić** i komentorstvom **doc. dr. sc. Ivane Presečki**.

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, 6. srpnja 2023.

Ena Luketić

(Ime i prezime)

  
(Vlastoručni potpis)

## **IZJAVA MENTORA O POSTOTKU SLIČNOSTI ZAVRŠNOG RADA S VEĆ OBJAVLJENIM RADOVIMA**

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

MOGUĆNOSTI RECIKLIRANJA FOTONAPONSKIH PANELA

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

U Varaždinu, 6. srpnja 2023.

prof. dr. sc. Aleksandra Anić Vučinić  
(Mentor)

  
(Vlastoručni potpis)



## SAŽETAK

Ime i prezime autora: Ena Luketić

Naslov rada: Mogućnosti recikliranja fotonaponskih panela

Ključne riječi: Fotonaponski paneli, Gospodarenje otpadom, Recikliranje, Kružno gospodarstvo

U ovom su radu istraživane mogućnosti recikliranja fotonaponskih panela. U uvodnom dijelu su opisani obnovljivi izvori energije s fokusom na solarnu energiju i prirodni energetska potencijal sunca u Hrvatskoj. Zatim je opisan princip rada fotonaponskih panela i ćelija te podjela samih fotonaponskih panela. Glavno poglavlje se bavi fotonaponskim panelima na kraju životnog vijeka; kategorizacijom, količinama, kvarovima te gospodarenjem tim otpadom na kraju životnog vijeka. Gospodarenje otpadom je prikazano kroz hijerarhiju otpada, a naglasak je na samom recikliranju i tehnologijama koje su u razvoju. Obrađen je i potencijal recikliranja fotonaponskih panela te prepreke koje se javljaju kod implementacije kružnog gospodarstva i mogućih rješenja. Na kraju su prikazane sadašnje regulative u Europskoj Uniji i svijetu te primjeri dobre prakse, gdje je recikliranje ove vrste otpada implementirano.

## ABSTRACT

Name and surname of the author: Ena Luketić

Paper Title: The recycling possibilities for photovoltaic panels

Keywords: Photovoltaic panels, Waste management, Recycling, Circular economy

In this paper, the possibilities of recycling photovoltaic panels were investigated. The introductory part describes renewable energy sources with a focus on solar energy and the natural energy potential of the Sun in Croatia. Then the principle of operation of photovoltaic panels and cells is described, together with the division of the photovoltaic panels themselves. The main chapter deals with end-of-life photovoltaic panels; categorization, quantities, breakdowns and management of this waste at the end of its life. Waste management is presented through the hierarchy of waste, and the emphasis is on recycling itself and technologies that are under development. The potential of recycling photovoltaic panels and the obstacles that arise in the implementation of the circular economy and possible solutions are also discussed. At the end, current regulations in the European Union and the world and examples of good practice, where the recycling of this type of waste has been implemented, are presented.



# SADRŽAJ

1.	UVOD.....	1
2.	OBNOVLJIVI IZVORI ENERGIJE .....	2
2.1	SOLARNA ENERGIJA .....	3
2.2	PRIRODNI ENERGETSKI POTENCIJAL SUNCA U HRVATSKOJ .....	3
2.3	FOTONAPONSKI PANELI .....	4
2.3.1	FOTONAPONSKA ČELIJA .....	5
2.3.2	PRINCIP RADA .....	5
2.4	VRSTE FOTONAPONSKIH PANELA .....	6
2.4.1	SOLARNI PANELI OD KRISTALNOG SILICIJA (c-Si).....	7
2.4.2	TANKOSLOJNI FOTONAPONSKI PANELI.....	9
2.4.3	FOTONAPONSKI KONCENTRATOR.....	11
2.4.4	NOVE TEHNOLOGIJE .....	11
2.5	KOLIČINE OTPADNIH FOTONAPONSKIH PANELA.....	12
3.	FOTONAPONSKI PANELI NA KRAJU ŽIVOTNOG VIJEKA.....	14
3.1	KATEGORIZACIJA OTPADNIH FOTONAPONSKIH PANELA .....	14
3.2	KVAROVI.....	15
3.3	GOSPODARENJE OTPADNIM FOTONAPONSKIM PANELIMA PO HIJERARHIJI OTPADA .....	16
3.3.1	SPRJEČAVANJE NASTANKA OTPADA.....	18
3.3.2	PONOVNA UPORABA .....	18
3.3.3	RECIKLIRANJE .....	19
3.3.4	ISTRAŽIVANJA TEHNOLOGIJA RECIKLIRANJA.....	23
3.4	ODLAGANJE .....	26
3.5	POTENCIJAL RECIKLIRANJA FOTONAPONSKIH PANELA .....	26
3.6	PREPREKE PRI IMPLEMENTACIJI KRUŽNOG GOSPODARSTVA.....	28
3.7	EKONOMSKI POTENCIJAL RECIKLIRANJA OTPADNIH FOTONAPONSKIH PANELA .....	30
3.8	REGULATIVE U EUROPSKOJ UNIJI I SVIJETU .....	31
3.9	PRIMJERI DOBRE PRAKSE .....	33
4.	ZAKLJUČAK.....	35
5.	LITERATURA .....	36
6.	POPIS SLIKA .....	41
7.	POPIS TABLICA .....	41

## 1. UVOD

Tranzicija na obnovljive izvore energije predstavlja važan korak prema održivom razvoju i smanjenju emisija štetnih plinova koji doprinose klimatskim promjenama. Potrebno je uspostaviti cjeloviti sustav za podržavanje tranzicije na obnovljive izvore energije, uključujući političke i regulatorne okvire, poticaje i ulaganja u nove tehnologije.

Solarna energija je sigurna, učinkovita, pouzdana i ne onečišćuje okoliš. Stoga, fotonaponska tehnologija ima vrlo uzbudljivu perspektivu kao način ispunjavanja budućih svjetskih energetske potreba.

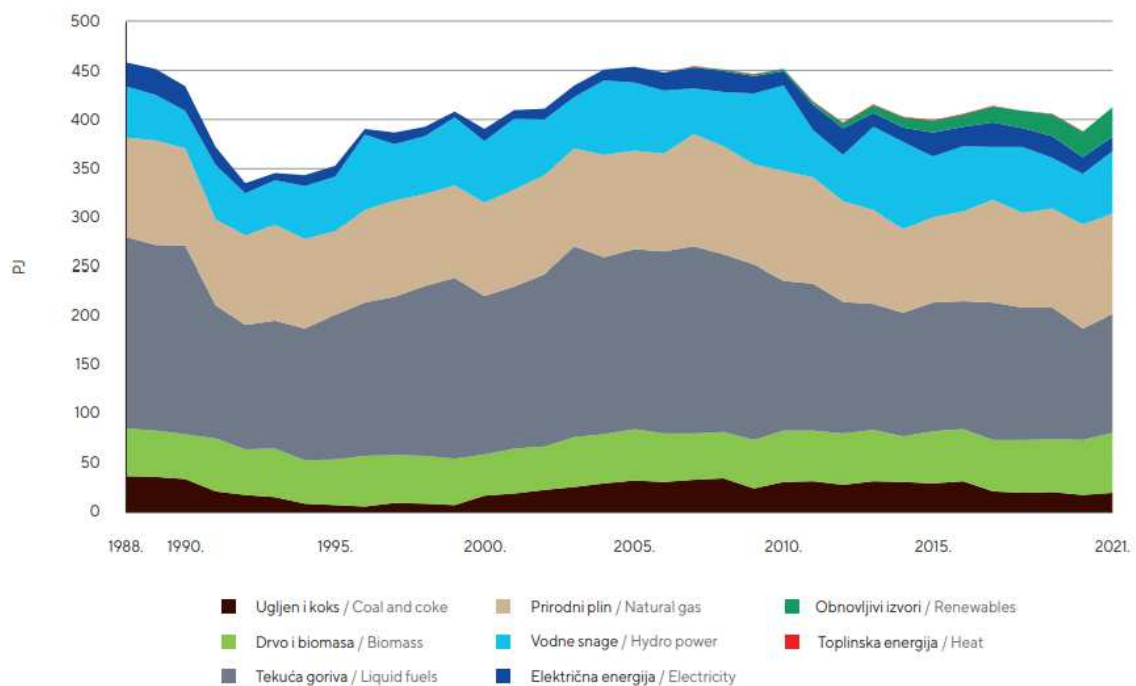
Važno je naglasiti da je veliki dio sustava obnovljivih izvora energije također i uspostava kvalitetnog i učinkovitog sustava zbrinjavanja otpada koji nastaje. Potrebno je uspostaviti efikasne i održive mehanizme gospodarenja otpadom te se odmaknuti od tradicionalne prakse odlaganja otpada na odlagališta bez obrade.

Također, posljednjih se godina javila potreba za uvođenjem novih pristupa, poput održivog razvoja koji je danas ugrađen u razvojne strategije svih razvijenih država i cirkularne ekonomije. Cirkularna ekonomija zagovara industrijsko gospodarstvo koje je svjesno obnovljivo, nastoji iskoristavati obnovljive izvore energije, smanjuje i nastoji eliminirati upotrebu kemikalija i stvaranje otpada te otvarati nova radna mjesta i kreirati zelenu tehnologiju. Uzimajući u obzir da su te tehnologije obnovljivih izvora energije relativno nove i da je tranzicija u samim počecima, gospodarenje otpadom koji nastaje na kraju životnog vijeka fotonaponske tehnologije još nije sasvim uređeno. Trenutno se u svijetu istražuju mogućnosti recikliranja istih na kraju životnog vijeka.

## 2. OBNOVLJIVI IZVORI ENERGIJE

Obnovljivi izvori energije su izvori energije koji se obnavljaju prirodno i ne iscrpljuju se kao fosilna goriva. Primjeri obnovljivih izvora energije uključuju hidroenergiju, energiju vjetra, sunčevu energiju, energiju valova, geotermalnu energiju, energiju biomase (biogorivo i bioplin), energiju plime i oseke. Obnovljivi izvori energije sve se više koriste u svijetu kako se nastoji smanjiti emisija štetnih plinova i utjecaj na okoliš. Njihova uporaba može pomoći u smanjenju korištenja fosilnih goriva i povećanju energetske održivosti, što će dugoročno biti korisno za okoliš i gospodarstvo.

Obnovljivi izvori energije trenutno u svijetu daju oko 11 % ukupno potrebne energije. Pozitivno je da se taj udio posljednjih godina znatno povećao jer nam prijete nestašica neobnovljivih izvora energije, a i njihov štetni utjecaj je sve izraženiji. Nekoliko tehnologija, osobito energija vjetra, male hidrocentrale, energija iz biomase i sunčeva energija su ekonomski konkurentne, a ostale tehnologije su ovisne o potražnji na tržištu. Proces prihvaćanja svih novih tehnologija, pa tako i ovih, vrlo je spor. Na slici 1 prikazani su izvori energije koje Republika Hrvatska koristi i njihov udio od 1988. do 2021. te je vidljiv stalni rast obnovljivih izvora energije u proteklih 15 godina. [1]



Slika 1. Udio obnovljivih izvora energije u Republici Hrvatskoj do 2021. [1]

## 2.1 SOLARNA ENERGIJA

Edmond Becquerel je još u prvoj polovici 19. stoljeća eksperimentalno dokazao fotonaponski efekt, konstruiranjem svoje prve fotonaponske ćelije. Tada se i rodila prva ideja korištenja sunca kao izvora energije. Nakon više od stotinu godina došlo je do prve praktične primjene solarnih ćelija, a naftna kriza 70-ih godina prošlog stoljeća je bila je svojevrsno usmjeravanje prema alternativnim izvorima energije, pa tako i energiji Sunca. Sunce isporučuje Zemlji 15 000 puta više energije nego što čovječanstvo u sadašnjoj fazi uspijeva potrošiti. Pod tu energiju podrazumijevamo zračenje svjetlosti i topline. [2]

Ukupna energija sunčevog zračenja koja pada na vanjski rub Zemljinog atmosferskog omotača naziva se solarnom konstantom i iznosi  $1,37 \text{ kW/m}^2$ . Zbog promjene udaljenosti između Zemlje i Sunca ona se mijenja između  $1,42 \text{ kW/m}^2$  u siječnju i  $1,32 \text{ kW/m}^2$  u srpnju. Prolaskom kroz atmosferu, uslijed djelovanja ozona, kisika, vodene pare i ostalog, dio sunčevog zračenja se apsorbira, dio se reflektira, a dio rasprši. Pod optimalnim uvjetima na svaki  $1 \text{ m}^2$  površine pada oko  $1 \text{ kW}$  sunčevog zračenja. [3]

Sve fotonaponske tehnologije imaju daleko niže emisije stakleničkih plinova u životnom ciklusu od fosilnih goriva (manje od  $50 \text{ gCO}_2/\text{kWh}$  za PV naspram oko 500 za prirodni plin i oko 800 za ugljen). Čak i ako zanemarimo prednosti solarne energije za klimu, okoliš i javno zdravlje, postoje dobri razlozi za očekivati da će solarna energija značajno doprinijeti budućnosti energetske potreba čovječanstva. Opseg solarnih izvora je golem: u 2 sata na Zemlju dođe dovoljno sunčeve energije za zadovoljavanje energetske potreba za cijelu godinu, a Sunce će opskrbljivati stabilnim izvorom energije sljedećih pet milijardi godina. [4]

Jedna studija objavljena u časopisu Renewable Energy sugerira da bi, u skladu s projekcijama rasta, energija solarnih panela mogla postati najveći izvor električne energije u svijetu već do 2050. godine.

## 2.2 PRIRODNI ENERGETSKI POTENCIJAL SUNCA U HRVATSKOJ

Prirodni potencijal Hrvatske je ukupna sunčeva energija koja godišnje padne na cjelokupnu površinu teritorija Republike Hrvatske. Površina teritorijalnog mora nije uzeta u obzir, jer je ukupna energija koja pada na kontinentalni dio Hrvatske i više nego

dovoljna u odnosu na stvarne potrebe Hrvatske. Uzevši da je ukupna površina teritorijalne Hrvatske 56 538 km<sup>2</sup> te da svakog dana u godini na svaki kvadratni metar horizontalne površine u prosjeku pada energija zračenja od 3,6 kWh, onda prirodni potencijal sunčeve energije u Hrvatskoj iznosi 74,3 PWh, ili 266400 PJ. To je 645 puta više od ukupne energetske potrošnje Hrvatske (412,95 PJ) u 2021. godini. [1,3]

### 2.3 FOTONAPONSKI PANELI

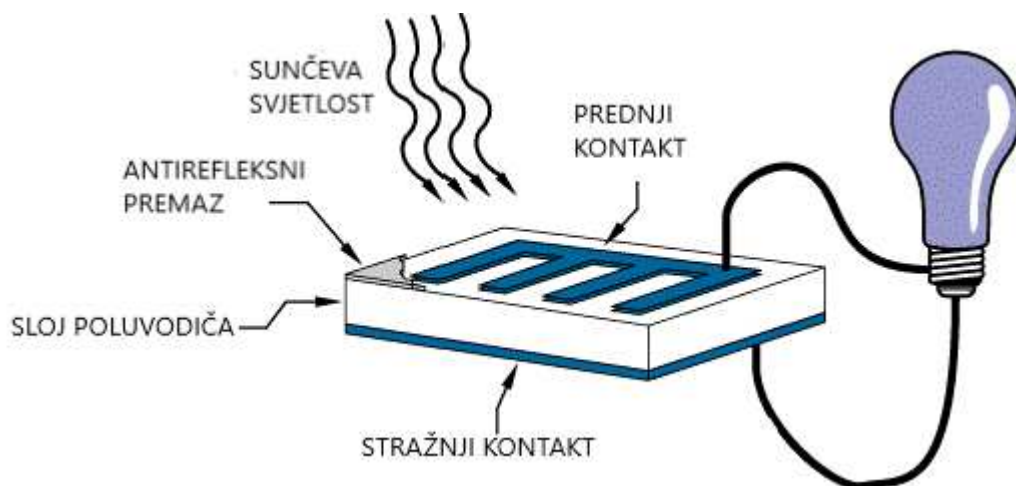
Fotonaponski paneli pretvaraju direktno sunčevu energiju u električnu, ne koristeći mehaničke pokretne dijelove podložne trošenju. Oni ne sadrže tekućine ili plinove koji mogu nepredviđeno izaći iz proizvodnog pogona te ne zagađuju okolinu (ni toplinski). Nije im potrebno dodatno gorivo ili pomoćni izvori energije da bi funkcionirali, a imaju brz odgovor i dolaze do pune snage gotovo trenutno. Budući da su po prirodi modularni, to im omogućuje širok opseg primjena: od malih odvojenih jedinica snage tek desetak vata, preko autonomnih izvora snage nekoliko kW, pa sve do centraliziranih elektrana u megavatnom području. Mogu se locirati tamo gdje je potrebna električna energija, pa nije potrebna prijenosna električna mreža. Ne proizvode električnu energiju kontinuirano te su zato potrebni spremnici električne mreže, bilo akumulatorski, baterijski ili priključni na električnu mrežu. [2,3]

Svaki solarni panel sastoji se od više solarnih ćelija, koje su obično izrađene od silicijevih kristala. Kada sunčeve zrake padnu na solarnu ćeliju, fotoni (osnovne jedinice svjetlosti) udaraju u elektrone u silicijevim kristalima, čime se stvara električni naboj. Ovaj proces se naziva fotoelektrični učinak i omogućuje solarnim panelima da proizvode električnu energiju. Jedna fotonaponska ćelija proizvodni napon samo oko 0,5 V, pa se one međusobno električno povezuju u zajedničko kućište i tako čine fotonaponski (FN) modul. Međusobno povezani fotonaponski moduli čine fotonaponski panel ili ploču, koji se onda dalje mogu povezivati u fotonaponske nizove ili polja. Važno je napomenuti da solarni paneli rade najbolje kada su izloženi direktnim sunčevim zrakama, ali mogu proizvoditi električnu energiju i pri oblačnom vremenu, iako u manjoj količini. [5]

### 2.3.1 FOTONAPONSKA ČELIJA

Fotonaponska ćelija sastoji se od mnogo slojeva materijala, od kojih svaki ima određenu svrhu. Najvažniji sloj fotonaponske ćelije je posebno obrađen sloj poluvodiča. Sastoji se od dva različita sloja: p-tip i n-tip. S obje strane poluvodiča nalazi se sloj vodljivog materijala koji "skuplja" proizvedenu električnu energiju. Stražnja strana ćelije može biti potpuno prekrivena vodičem, dok prednja ili osvijetljena strana mora imati manje vodiča kako bi se izbjeglo blokiranje previše Sunčevog zračenja da dopre do poluvodiča. Budući da su svi poluvodiči prirodno reflektirajući, gubitak refleksije može biti značajan. Rješenje je korištenje jednog ili više slojeva anti-refleksnog premaza (sličnih onima koji se koriste za naočale i kamere) kako bi se smanjila količina sunčevog zračenja koje se odbija od površine ćelije. [6]

Na slici 2 prikazan je osnovni princip rada fotonaponske ćelije.



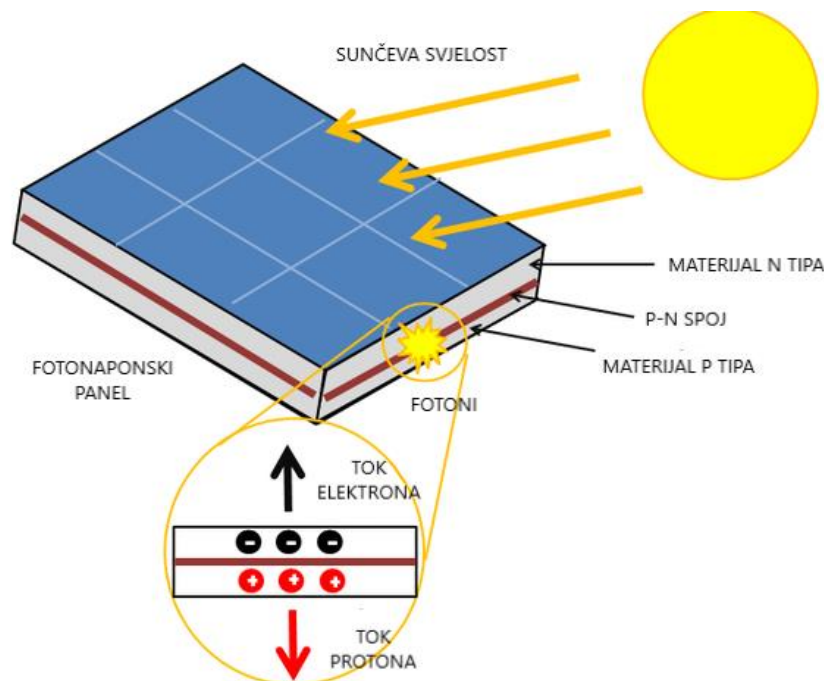
Slika 2. Princip rada fotonaponske ćelije [6]

### 2.3.2 PRINCIP RADA

Fotonaponska ćelija izrađena je od poluvodičkih materijala koji apsorbiraju fotone koje emitira Sunce i stvaraju protok elektrona. Fotoni su elementarne čestice koje prenose sunčevo zračenje brzinom od 300 000 kilometara u sekundi. U 1920-ima Albert Einstein ih je nazvao "zrncima svjetlosti". Kada fotoni udare u poluvodički materijal poput silicija, otpuštaju elektrone iz njegovih atoma, ostavljajući za sobom prazan prostor. Zalutali elektroni kreću se nasumično tražeći drugi atom koji treba ispuniti. Međutim, da bi

proizveli električnu struju, elektroni moraju teći u istom smjeru. To se postiže pomoću dvije vrste silicija. Sloju silicija koji je izložen suncu dodani su atomi fosfora koji imaju jedan elektron više od silicija, dok se drugoj strani dodaju atomi bora koji imaju jedan elektron manje. Dobiveni sustav radi poput baterije: sloj koji ima višak elektrona postaje negativni terminal (n), a strana koja ima manjak elektrona postaje pozitivni terminal (p). Na spoju između dva sloja stvara se električno polje. Kada su elektroni pobuđeni fotonima, električnim poljem oni odlaze na n-stranu, a pozitivno nabijeni atomi dolaze na p-stranu. Elektroni i pozitivno nabijeni atomi se usmjeravaju na električne kontakte na obje strane prije nego što poteku u vanjski krug i proizvedu istosmjernu struju. [7]

Na slici 3 prikazan je princip rada fotonaponskog panela.



Slika 3. Princip rada fotonaponskog panela [6]

## 2.4 VRSTE FOTONAPONSKIH PANELA

Fotonaponski paneli se razvrstavaju prema tehnologiji koju koriste (Europska Komisija, 2011.):

- Solarni paneli od kristalnog silicija
- Tankoslojni solarni paneli

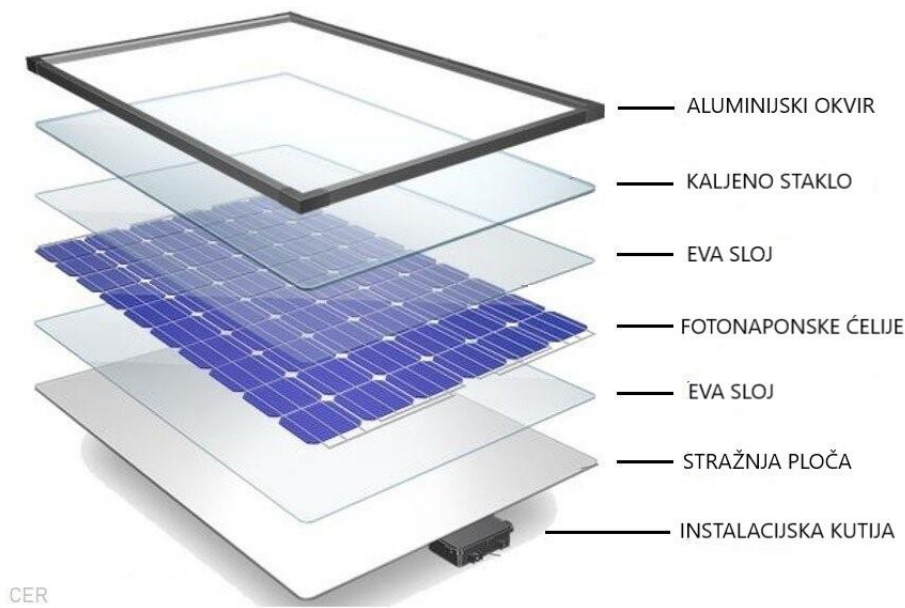


- Fotonaponski koncentrador (CPV) i nove tehnologije

#### 2.4.1 SOLARNI PANELI OD KRISTALNOG SILICIJA (c-Si)

U današnje vrijeme komercijalno su najzastupljeniji fotonaponski paneli od kristalnog silicija, koji se dijele na monokristalne i polikristalne panele. Monokristalni paneli imaju višu učinkovitost proizvodnje električne energije, no zbog svoje visoke cijene u prošlosti su se koristili manje u odnosu na polikristalne. Danas, nakon što su cijene približile jedna drugoj, predviđa se da će se budućnost fotonaponskih elektrana temeljiti na monokristalnim modulima. Silicij je siguran za okoliš i jedan od najobilnijih resursa na Zemlji. No, u prirodi je uglavnom vezan sa drugim elementima u spoju te kao takav nije pogodan za izravno korištenje u fotonaponskim modulima te većina troškova vezano uz silicij odlazi na odvajanje i obradu materijala kako bi se dobila jedinstvena i čista struktura. Solarni paneli od kristalnog silicija su izrađeni od sljedećih materijala, poredanih po masi: staklo, aluminijski okvir, EVA kopolimer prozirni sloj, fotonaponska ćelija, instalacijska kutija, Tedlar zaštitna folija i montažni vijci. Moduli su inkapsulirani s različitim materijalima za zaštitu ćelija i električnih konektora. Okvir fotonaponskog panela je ekstrudirani aluminijski okvir koji se koristi za brtvljenje i fiksiranje komponenti solarnog modula. Služi za zaštitu solarne ćelije i stakla od oštećenja i loma. Kaljeno staklo služi kao zaštitni sloj, sprječavajući čimbenike iz okoliša poput para, vode i prljavštine da oštete fotonaponske ćelije. EVA (etilen vinil acetat) je gumasta tvar mliječno bijele boje. Zagrijavanjem postaje prozirni zaštitni film koji brtvi i izolira solarne ćelije. Uz pomoć stroja za laminaciju, ćelije se laminiraju između filmova EVA u vakuumu, koji je pod kompresijom, na temperaturama do 150°C. Stražnja ploča, obično izrađena od polimera ili kombinacije polimera, koristi se za pokrivanje stražnje strane fotonaponskih modula. Glavna funkcija ovog sloja je osigurati električnu izolaciju unutarnjeg sklopa od vanjskog okruženja. Instalacijska kutija je spojnica između solarnog polja i uređaja za kontrolu punjenja. [8,9,10]

Na slici 4 prikazan je raspored slojeva fotonaponskih modula.



Slika 4. Raspored slojeva fotonaponskog modula [11]

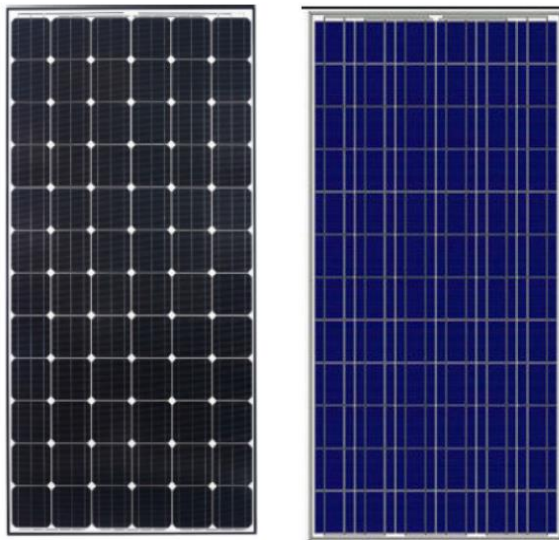
#### 2.4.1.1 MONOKRISTALNI

Monokristalne solarne ćelije izrađene su korištenjem monokristala silicija (Si). Proizvodnja kristala Si obično se izvodi s velikom točnošću. Utvrđeno je da monokristalne ćelije imaju 16% učinkovitosti. Međutim, veća učinkovitost od 19,8% postignuta je s poboljšanom multikristalnom silicijskom solarnom ćelijom, kao i povećanje od 24,4% za monokristalne ćelije. Ovo poboljšanje multikristalnih stanica proizašlo je iz pokrivanja multikristalnih površina toplinski formiranim oksidima kako bi se ograničili njihovi štetni elektronski procesi i izotropne promjene, stvarajući heksagonalno simetričnu površinsku teksturu "saća". [12,13]

#### 2.4.1.2 POLIKRISTALNI

Polikristalni FN moduli formirani su od različitih kristala, spojenih u jediničnu ćeliju. Postupak oblikovanja je isplativ i uključuje hlađenje grafitnog kalupa koji se sastoji od rastaljenog silicija. Stvrdnjavanjem nastaju kristalne strukture različitih veličina na čijoj se granici pojavljuju defekti. Ovi nedostaci smanjuju stupanj učinkovitosti od 14% do 17%. [14]

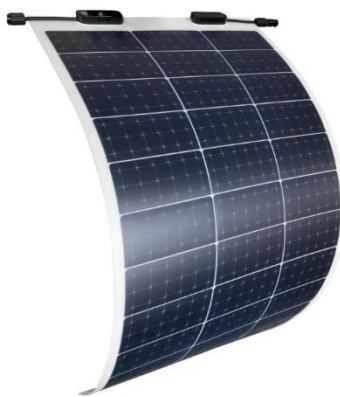
Na slici 5 usporedno su prikazani monokristalni i polikristalni fotonaponski paneli.



Slika 5. Usporedba monokristalnog (lijevo) i polikristalnog (desno) panela [11]

#### 2.4.2 TANKOSLOJNI FOTONAPONSKI PANELI

Tankoslojni solarni paneli su vrsta fotonaponskih panela koji se sve više koriste u proizvodnji električne energije iz solarnih izvora. Ovi paneli su napravljeni od tankih slojeva materijala, obično silicijevih filmova, koji su znatno tanji od standardnih kristalnih fotonaponskih panela. Prednost tankoslojnih fotonaponskih panela je njihova veća fleksibilnost i mogućnost prilagodbe različitim površinama, što ih čini idealnim za primjenu u različitim situacijama. Također, lakši su od standardnih panela, što olakšava transport i instalaciju. Međutim, tankoslojni fotonaponski paneli imaju nižu učinkovitost u pretvaranju sunčeve energije u električnu energiju od standardnih kristalnih panela (oko 7%). Tanke fotonaponske ćelije se obično kategoriziraju prema tome koji se materijal koristi. Te kategorije uključuju Kadmij telurij (CdTe), Bakar indij/galij selenid (CIS ili CIGS), Galij arsenid (GaAs), obojene solarne ćelije, organske solarne ćelije, silicijski tanki film itd. [15]. Na slici 6 prikazan je primjer tankoslojnog fotonaponskog panela.



Slika 6. Tankoslojni fotonaponski panel [16]

#### 2.4.2.1 FOTONAPONSKA ĆELIJA OD AMORFNOG SILICIJA (a-Si)

Ova vrsta solarne ćelije bila je najpoznatija među tankoslojnim tehnologijama, Obično se koristi u džepnim i stolnim kalkulatorima, a odnedavno u solarnim pločama za proizvodnju električne energije u kućanstvima i komunalnim uslugama. Moduli amorfnog silicija proizvode se stavljanjem sićušnog filma silicijeve pare (debljine otprilike 1  $\mu\text{m}$ ) na materijal supstrata poput stakla ili metala. Učinkovitost ovih amorfni solarnih ćelija se kreće u području oko 8% [17], a njihova glavna prednost u odnosu na druge leži u znatno smanjenim troškovima proizvodnje. [12]

#### 2.4.2.2 KADMIJ TELURID (CdTe) TANKOSLOJNE FOTONAPONSKE ĆELIJE

Kadmij telurid (CdTe) fotonaponski proizvodi se formiraju od kadmij telurida, tankog poluvodičkog sloja dizajniranog za hvatanje i pretvaranje sunčeve svjetlosti u električnu energiju. Kadmij telurid FN jedina je tehnologija tankog filma koja ima niže troškove od tradicionalnih solarnih ćelija proizvedenih s kristalnim silicijem. [18]

Basol i McCandless otkrili su da se najveće povećanje učinkovitosti CdTe dogodilo od 2013. do 2014. kada se učinkovitost pretvorbe ćelija male površine poboljšala na raspon od 20%, a zabilježena je najveća učinkovitost modula od 17%. Ostale značajne prednosti ove tehnologije su manje emisije stakleničkih plinova i teških metala tijekom životnog ciklusa, manji ugljični otisak i kratko vrijeme povrata energije. [19]

### 2.4.2.3 BAKAR INDIJ GALIJ DI-SELENID (CIGS) TANKOSLOJNI FOTONAPONSKE ČELIJE

CIGS (C-bakar I-indij G-galij S-selen) je panel sa četiri poluvodiča: bakar, indij, galij i selen. CIGS ima veću učinkovitost od CdTe (približno 10% - 12% u prosjeku), a neki postižu učinkovitost od 22,8%, čime se povoljno natječu sa solarnim ćelijama na bazi kristalnog silicija (c-Si). [20]

### 2.4.3 FOTONAPONSKI KONCENTRATOR

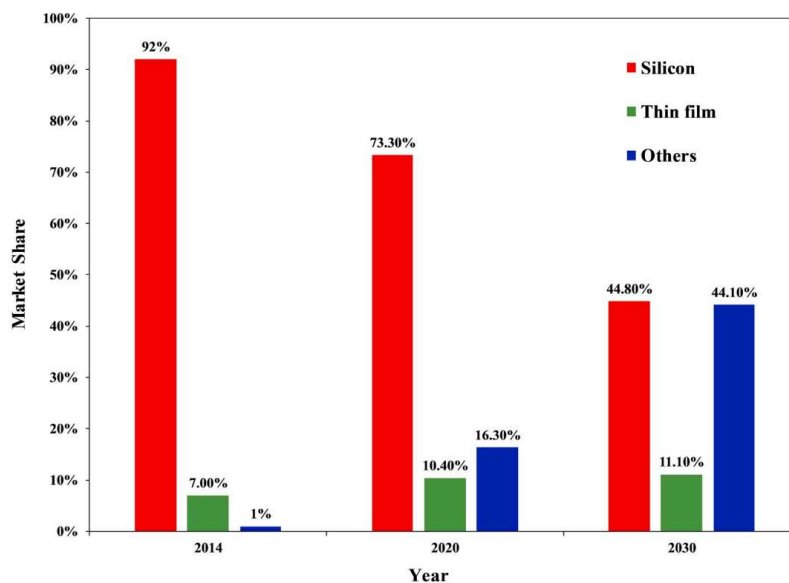
Koncentrirana solarna energija (engl. Concentrator photovoltaics, CPV) koristi ogledala za koncentriranje sunčevih zraka. Ove zrake zagrijavaju tekućinu, koja stvara paru za pogon turbine i proizvodnju električne energije. CPV se koristi za proizvodnju električne energije u velikim elektranama. Do kraja 2020. globalni instalirani kapacitet CPV-a približavao se 7 GW, sa zabilježenim peterostrukim porastom između 2010. i 2020. Vjerojatno je oko 150 MW pušteno u pogon 2020., iako je službena statistika zabilježila samo 100 MW. Jedna od glavnih prednosti CPV elektrane u odnosu na solarnu fotonaponsku elektranu je ta što se može opremiti rastaljenim solima u kojima se može pohraniti toplina, što omogućuje proizvodnju električne energije nakon što Sunce zađe. CPV s jeftinim skladištenjem toplinske energije ima mogućnost integrirati veće udjele varijabilne solarne energije i energije vjetra, što znači da bi CPV, iako često podcijenjen, mogao igrati sve važniju ulogu u budućnosti. Moguće je klasificirati CPV sustave prema mehanizmu kojim solarni kolektori koncentriraju sunčevo zračenje: "linearna koncentracija" ili "točkasta koncentracija". Većina postojećih sustava koristi linearne koncentrirajuće sustave koji se nazivaju parabolični koritasti kolektori. Solarni tornjevi, ponekad poznati i kao energetski tornjevi, najraširenija su CPV tehnologija koncentriranja u točkama, ali predstavljaju samo oko petinu svih sustava postavljenih krajem 2020. [21]

### 2.4.4 NOVE TEHNOLOGIJE

Električna energija se također može proizvesti interakcijom svjetlosti na mnogim drugim materijalima. Perovskitne solarne ćelije, nazvane po svojoj specifičnoj kristalnoj strukturi, mogu se proizvesti iz organskih spojeva olova i elemenata kao što su klor, brom ili

jod. Relativno su jeftine za proizvodnju i mogu se pohvaliti učinkovitošću bliskom onima komercijalno dostupnih silicijskih ćelija, ali trenutno su ograničene kratkim vijekom trajanja. Organske solarne ćelije sastoje se od slojeva polimera i mogu se proizvoditi jeftino u velikim količinama. Te se ćelije mogu proizvesti kao poluprozirni film, ali imaju relativno nisku učinkovitost. Solarne ćelije osjetljive na boju mogu se proizvesti korištenjem poluvodičkog titan dioksida i sloja boje 'senzibilizatora' debljine samo jedne molekule. Ove ćelije imaju skromnu učinkovitost, ali ne mogu izdržati jaku sunčevu svjetlost bez degradacije. Kvantne točke koriste nanotehnologiju za manipuliranje poluvodičkim materijalima u iznimno malim razmjerima. 'Nano čestice' koje se sastoje od samo 10 000 atoma mogu se prilagoditi različitim dijelovima sunčevog spektra u skladu s njihovom veličinom i kombinirati da apsorbiraju širok raspon energije. Iako su teorijske učinkovitosti iznimno visoke, učinkovitosti laboratorijskih ispitivanja još uvijek su vrlo niske. [22]

Na slici 7 prikazane su količine fotonaponskih panela po vrsti u 2014. i 2020. te predviđanja za 2030. godinu.



Slika 7. Količine fotonaponskih panela po vrsti u 2014. i 2020. i predviđanja za 2030. [23]

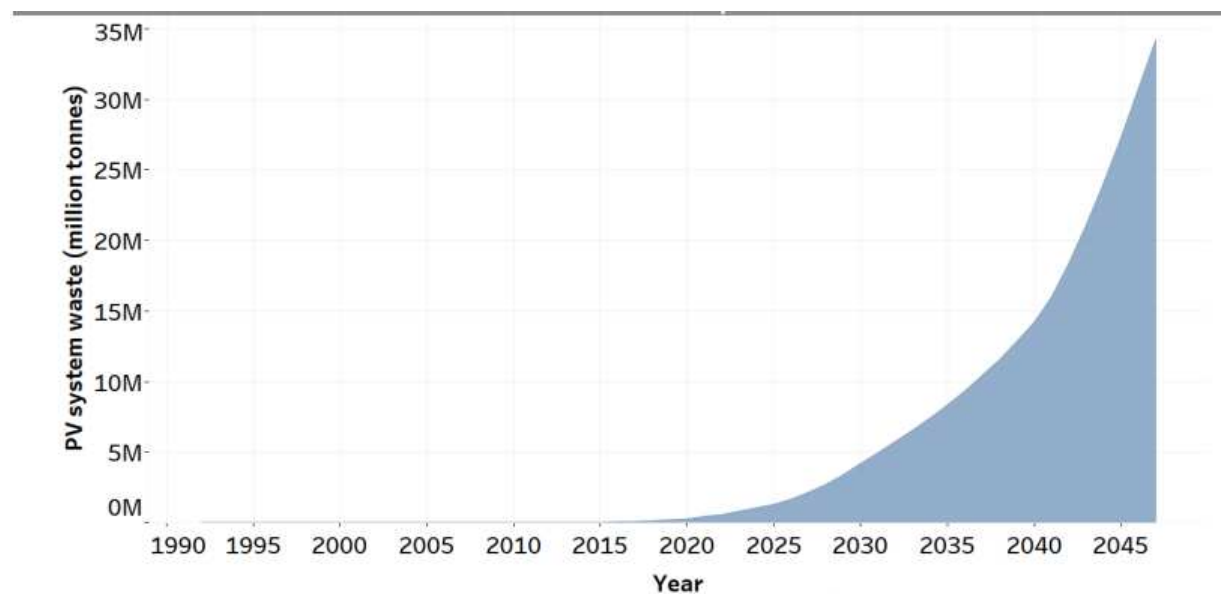
## 2.5 KOLIČINE OTPADNIH FOTONAPONSKIH PANELA

Predviđa se da će kapaciteti PV instalacija doživjeti eksponencijalni porast do 2030., ali stopa rasta će se nakon toga početi ujednačavati. 4 133 GW instaliranih PV panela i 10

968 GWh BESS-a (baterije za pohranu energije) može se očekivati do 2050. Iako je količina otpadnih fotonaponskih panela još uvijek relativno mala tijekom sljedećih nekoliko godina, značajna se povećanja mogu očekivati od otprilike 2028. godine. Uzimajući u obzir prosječni životni vijek od 20 godina predviđa se 195 332 kilo tona otpada od fotonaponskih ploča do 2050. godine. S druge strane, nedavno usvajanje BESS-a doživjet će postupno povećanje do 2030. i nakon toga se znatno povećati. EoL BESS zalihe će se akumulirati bržom brzinom kao rezultat kraćeg životnog ciklusa ovog sustava. [24]

U EU-u je do kraja 2020. bilo 136 GW instaliranih kapaciteta proizvodnje solarnih fotonaponskih sustava s time da je te godine dodatno ugrađeno više od 18 GW. Osiguravali su oko 5% ukupne proizvodnje električne energije u EU-u. Kako bi ostvarili cilj za energiju iz obnovljivih izvora za 2030. koji je predložila Komisija i ciljeve plana REPowerEU, predviđeno je znatno ubrzavanje postupka uvođenja solarne energije. U ovom desetljeću EU će u prosjeku morati ugraditi oko 45 GW godišnje. [25]

Na slici 8 prikazana su predviđanja količina fotonaponskog otpada.



Slika 8. Količine fotonaponskog otpada u milionima tona [24]



### 3. FOTONAPONSKI PANELI NA KRAJU ŽIVOTNOG VIJEKA

#### 3.1 KATEGORIZACIJA OTPADNIH FOTONAPONSKIH PANELA

Otpadni fotonaponski paneli spadaju u kategoriju električnog i elektroničkog otpada, koja predstavlja sve proizvode koji su za svoje pravilno djelovanje ovisni o električnoj energiji ili elektromagnetskim poljima, kao i opremu za proizvodnju, prijenos i mjerenje struje ili jakosti elektromagnetskog polja. Namijenjena je korištenju pri naponu koji ne prelazi 1.000 V za izmjeničnu i 1.500 V za istosmjernu struju i ne uključuje ambalažu. U smislu Zakona kojim se uređuje održivo gospodarenje otpadom u Republici Hrvatskoj, EE otpad (električni i elektronički otpad) uključuje sve komponente, podsklopove i potrošne materijale koji u trenutku odbacivanja čine dio proizvoda.

Količine elektroničkog i električnog otpada rastu za 10% godišnje, što je tri puta veći porast od porasta komunalnog otpada. Jedan od faktora koji utječe na nastanak EE otpada je vijek trajanja jer velik broj uređaja nakon svog vijeka trajanja postaje otpad, čemu je uzrok vrlo brzi razvoj tehnologije.

Električni i elektronički otpad se u propisima EU označava kraticom WEEE (Waste Electrical and Electronic Equipment). Najvažnije EU direktive kad je riječ o gospodarenju EE uređajima su: Direktiva (2002/96/EZ) o otpadnim elektroničkim i električnim uređajima i opremi (WEEE Direktiva) i Direktiva (2002/95/EZ) o ograničavanju upotrebe nekih opasnih tvari u elektroničkim i električnim uređajima i opremi (RoHS Direktiva). [26]

Prema zakonu o gospodarenju otpadom (NN 84/2021): *Proizvođač EE opreme dužan je snositi troškove gospodarenja EE otpadom. Posjednik EE otpada obavezan je EE otpad odvajati od miješanog komunalnog otpada i od ostalih vrsta otpada te ga predati u cijelosti i u stanju iz kojeg je vidljivo da nije prethodno rastavljan radi vađenja zasebnih komponenti ili dijelova. Takvim EE otpadom smatraju se i prethodno nerastavljeni dijelovi EE opreme koja se sastoji od više cjelina (npr. monitori računala, elektromotori crpki ili kompresora i sl.). Posjednik EE otpada u registriranoj osobi obavezan je posebno odvojiti i evidentirati EE otpad koji odgovara definiciji EE otpada iz kućanstva od ostalog EE otpada te ga odvojeno i uz ostali EE otpad predati sakupljaču uz odgovarajuće prateće listove. Predaja odvojeno sakupljenog EE otpada obavlja se bez naplate za kućanstva i registrirane osobe i na način koji omogućuje optimalne uvjete za pripremu*

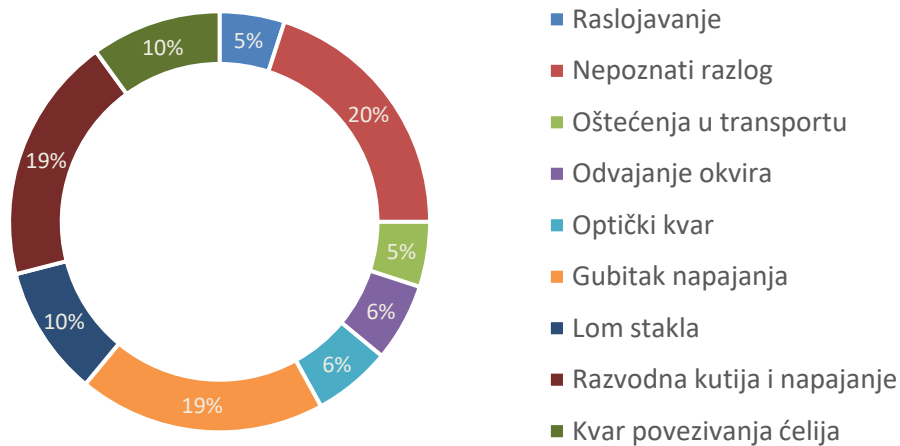
*za ponovnu uporabu, recikliranje i druge postupke oporabe te izdvajanje opasnih tvari iz EE otpada. Osobe koje preuzimaju i sakupljaju EE otpad obvezne su u sabirnim centrima posebno odvajati EE otpad prikladan za pripremu za ponovnu uporabu od ostalog prikupljenog EE otpada te prema potrebi i u svrhu edukacije, omogućiti pristup osoblju obrađivača osposobljenom za ponovnu uporabu. [27]*

U Katalogu otpada prema Uredbi o kategorijama, vrstama i klasifikaciji otpada s katalogom otpada i listom opasnog otpada, NN 50/05, NN 39/09) fotonaponski paneli spadaju u skupinu 16 (OTPAD KOJI NIJE DRUGDJE SPECIFICIRAN U KATALOGU) 02 (otpad iz električne i elektroničke opreme).

### 3.2 KVAROVI

U novim solarnim panelima je pronađeno relativno malo nedostataka koji se odnose na loš dizajn ili nedostatke koji nastaju tijekom proizvodnje. Drugi uzroci kvara panela su uzrokovani elektroničkom opremom, kao što su razvodne kutije, kutije s osiguračima, regulatori punjenja i kablovi, kao i problemi s uzemljenjem. U prvim godinama proizvodnje paneli su patili od degradacije EVA sloja, kao i od nedostatka koherentnosti zbog puknuća solarnih ćelija. Kvarovi su bili uzrokovani atmosferskim prilikama, kao na primjer snijegom ili vjetrom, kao i temperaturnim promjenama koje su uzrokovale degradaciju, nedostatke kontakata u razvodnim kutijama, lomljenje stakla, pucanje okvira i slično. Novija istraživanja pokazuju da je oko 40% kvarova uzrokovano mikroskopskim pukotinama i kvarovima, a to je najviše uobičajeno u novijim pločama proizvedenim nakon 2008. godina kada je započela proizvodnja tankoslojnih panela. [23] Na slici 9 prikazani su najčešći razlozi kvarova fotonaponskih panela:

## Najčešći kvarovi



Slika 9. Razlozi kvarova fotonaponskih panela [23]

### 3.3 GOSPODARENJE OTPADNIM FOTONAPONSKIM PANELIMA PO HIJERARHIJI OTPADA

Hijerarhija otpada primjenjuje se kao redoslijed prioriteta zakonodavstva i politike o sprečavanju nastanka otpada i gospodarenju otpadom. Riječ je o okosnici politika i zakonodavstva EU-a o otpadu, a utvrđena je u Okvirnoj direktivi EU-a o otpadu (Direktiva 2008/98/EZ). Njezin je cilj dvojak:

- smanjenje na najmanju moguću mjeru negativnih učinaka nastajanja otpada i gospodarenja otpadom
- poboljšati iskoristivost resursa.



Slika 10. Hijerarhija otpada [28]

Hijerarhija na slici 10 je prikazana u obliku obrnute piramide s najpoželjnijim opcijama u gornjem dijelu i odlaganjem na dnu kao posljednjom opcijom za gospodarenje otpadom.

- Sprječavanje: Mjere koje se poduzimaju prije nego što tvar, materijal ili proizvod postane otpad, s ciljem smanjenja količine otpada, štetnih učinka otpada na okoliš i zdravlje ljudi ili sadržaja štetnih tvari u materijalima i proizvodima.
- Priprema za ponovnu uporabu: Postupci uporabe koji uključuju provjeru, čišćenje ili popravak, u okviru kojih se proizvodi ili dijelovi proizvoda pripremaju kako bi se mogli ponovno uporabiti bez dodatne obrade.
- Recikliranje: Svaki postupak uporabe kojim se otpadni materijali prerađuju u proizvode, materijale ili tvari za izvornu ili drugu svrhu. Obuhvaća preradu organskog materijala (npr. kompostiranje), ali ne uključuje energetska uporaba i preradu u materijal koji se koristi kao gorivo ili materijal za nasipavanje.
- Drugi postupci uporabe (npr. energetska uporaba): Svaki postupak čiji je glavni rezultat otpad koji je koristan jer zamjenjuje druge materijale koje bi inače trebalo upotrijebiti za tu određenu svrhu, ili otpad koji se priprema kako bi ispunio tu svrhu, u tvornici ili u širem gospodarskom smislu.

- Odlaganje: Svaki postupak koji nije uporaba, čak i kad postupak ima za sekundarnu posljedicu obnovu tvari ili energije (npr. odlaganje na odlagalište, spaljivanje). [29]

### 3.3.1 SPRJEČAVANJE NASTANKA OTPADA

Industrija solarnih panela se razvija rapidnom brzinom, instalirani kapaciteti svakodnevno rastu te je sprječavanje nastanka otpada na kraju životnog vijeka gotovo nemoguće. Zato se treba fokusirati na pravilno gospodarenje u ostalim segmentima hijerarhije otpada; ponovnu uporabu i recikliranje, energetska uporabu te na kraju, odlaganje.

### 3.3.2 PONOVDNA UPORABA

Recikliranje je danas zadana strategija za povučene PV module u Europi. Međutim, u sljedećih 10-15 godina, procjenjuje se da će se do 80% toka fotonaponskog „otpada” sastojati od proizvoda s preuranjenim kvarovima (IRENA/IEA-PVPS, 2016.), kao što su proizvodni nedostaci ili oštećenja uzrokovana transportom. Procijenjeno je da se oko 2/3 ovih PV modula može popraviti ili obnoviti. Stoga se oko 50% PV "otpada" može preusmjeriti s puta recikliranja. U stvarnosti, omjer će vjerojatno biti čak i veći budući da funkcionalni fotonaponski moduli koji su povučeni iz upotrebe također ulaze u tok otpada. [30]

Solarni paneli gube dio svoje učinkovitosti tijekom vremena, što motivira neke solarne korisnike da zamijene starije, ali još uvijek funkcionalne, panele s novijim, učinkovitijim panelima. Postoji uspješno tržište za ponovnu uporabu solarnih panela, što su omogućila tržišta kao što je Energy Bin i brojne tvrtke specijalizirane za stavljanje solarnih instalacija izvan pogona i preusmjeravanje korištenih panela drugim kupcima. Izvorni kupci često su željni preprodati rabljene panele, stavljajući sredstva u džep ili koristeći ih za nadoknadu troškova novijeg sustava, a novi kupci su često željni kupiti panele po sniženim cijenama. Postoje i tvrtke koje pronalaze inovativne načine za panele drugog životnog vijeka za proizvodnju jeftine čiste električne energije za pogon industrijskih procesa koji bi inače koristili fosilna goriva. Solarni paneli koji nisu polomljeni ili

neispravni također se doniraju neprofitnim organizacijama kao što je Habitat for Humanity. [31]

### 3.3.3 RECIKLIRANJE

U idealnom zatvorenom životnom ciklusu, materijal koji se vrti u ciklusu je maksimiziran. Drugim riječima, otpad koji izlazi iz životnog ciklusa u svakoj fazi je minimiziran, a korištenje prirodnih resursa je minimizirano, dok su ostala opterećenja za okoliš također minimalna. Realnost životnog ciklusa PV modula nije tako savršena. Trenutno postoji velika ovisnost o nabavi metala iz prirodnih izvora, a znatni gubici metala nastaju tijekom proizvodnje sirovina. Recikliranje proizvodnog otpada postoji, ali stupanj recikliranja uvelike ovisi o vrsti otpada.

Iako je 80% tipičnih fotonaponskih panela napravljeno od materijala koji se mogu reciklirati, njihovo rastavljanje i ponovno dobivanje materijala visoke čistoće iznimno je teško.

Recikliranje fotonaponskih panela je postupak koji uključuje prikupljanje, rastavljanje i obradu različitih komponenti panela radi ponovne uporabe. Samo recikliranje aluminijskog okvira, stakla i plastične podloge ne predstavlja tehnološki zahtjevniji postupak, što nije slučaj sa solarnim ćelijama i zaštitnim filmovima EVA. Postoje različite metode recikliranja fotonaponskih panela koje se koriste u praksi, a neke od njih uključuju termičko recikliranje, mehaničko recikliranje i kemijsko recikliranje.

#### 3.3.3.1 MEHANIČKA OBRADA

Mehaničkom obradom otpada ne mijenjaju se kemijska svojstva otpada koji se obrađuje, već se samo izdvajaju pojedine komponente ili frakcije iz ulaznog toka, odnosno mijenja se stanje usitnjenosti smjese. Cilj je učinkovita separacija komponenata otpada kako bi se dobilo što više kvalitetnih frakcija za daljnju uporabu. Najvažniji materijali čija se separacija odvija unutar mehaničkih procesa obrade su staklo, plastika, papir i metali. [32]

Mehaničko razdvajanje slojeva solarnih panela može se postići različitim metodama, ovisno o vrsti panela i materijalima koji se koriste. Jedna od uobičajenih metoda uključuje primjenu strojne sile na panel kako bi se razdvojili različiti slojevi.

Primjerice, kod tankoslojnih solarnih panela, slojevi se mogu razdvojiti korištenjem posebnih strojeva koji primjenjuju mehaničku silu i vibracije na panel. Postupak se sastoji od nekoliko faza, uključujući uporabu kemijskih otopina za uklanjanje zaštitnih slojeva, a zatim korištenje stroja za uklanjanje pojedinih slojeva panela.

Kod mehaničke obrade paneli se prvenstveno rastavljaju uklanjanjem aluminijskog okvira, razvodnih kutija i ugrađenih kablova. Okvir, kao zadnja komponenta koja se pričvršćuje na modul, služi kao spojna komponenta, izolira rubove modula i osigurava mehaničku čvrstoću dok cjelokupnu strukturu održava laganom. Nakon što se okvir odvoji od modula, može se oporabiti kroz sekundarnu metalurgiju. Kao tipični sastojci aluminijskih legura još su prisutni željezo, silicij i nikal. [33,34,35,36]. Zamjena elemenata u solarnim ćelijama radi popravka sustava ograničena je na zamjenu električnih komponenti i ne uključuje odvajanje materijala ili obradu ćelija. Popravljanjem grešaka na razvodnoj kutiji može se povećati izlazna snaga starijih solarnih panela. Međutim, ova se metoda može koristiti samo za vanjske razvodne kutije koje se nalaze izvan glavnog tijela solarne ploče. [37,38]

Moduli se u početku mogu i usitnjavati mlinom s nožem, a zatim se obrađuju odvajanjem, mljevenjem i prosijavanjem. Tim je procesom moguće oporabiti 76% stakla i 100% metala.

### 3.3.3.2 KEMIJSKO-TERMIČKA OBRADA

Kemijska obrada koristi kemikalije kako bi se otapali i razdvajali različiti materijali u panelima. Na primjer, otopine koje sadrže fluorovodičnu kiselinu mogu se koristiti za uklanjanje zaštitnih slojeva s kristalnih silicijskih solarnih panela. Termička obrada uključuje zagrijavanje panela na visoku temperaturu kako bi se razdvojili različiti slojevi i materijali. Primjerice, kada se kristalni silicijski solarni paneli zagriju na visoku temperaturu, sloj silicija se može odvojiti od metala i stakla. Tako se dobivaju različiti materijali kao što su staklo, bakar, aluminij, čisti silicij i drugi koji se mogu koristiti u drugim industrijama. [39]



Na tablici 1 prikazan je pregled metoda recikliranja silicijskih panela:

Tablica 1 PREGLED METODA RECIKLIRANJA SILICIJSKIH PANELA [2]

<i>Tehnologija</i>	<i>Proces</i>	<i>Prednosti</i>	<i>Nedostaci</i>
<i>Raslojavanje</i>	Fizička dezintegracija	Učinkovito rukovanje	Miješanje materijala s EVA Oštećenje solarnih ćelija Razgradnja aparature
	Organsko otapanje	Uklanjanje organskih slojeva sa stakla Kemijska uporaba otpada Jednostavno uklanjanje EVA	Skupa oprema Različito vrijeme otapanja Opasno za ljudsko zdravlje
	Otapanje u dušičnoj kiselini	Kompletno uklanjanje EVA i metalnog sloja Moguć oporavak cijele ćelije	Opasne emisije Defekti ćelije zbog anorganske kiseline <sup>3</sup>
	Termička obrada	Kompletno uklanjanje EVA Moguć oporavak cijele ćelije	Velika potrošnja energije Opasne emisije
	Ultrazvučna radijacija	Ubrzavanje procesa otapanja Jednostavno uklanjanje EVA	Vrlo skup proces Potrebna obrada otpadne otopine
<i>Separacija materijala</i>	Suha i mokra mehanička obrada	Ne-kemijski proces Jednostavan proces Zahtjeva malo energije Dostupna oprema	Ne uklanjaju se otopljene čvrste tvari
	Jetkanje	Jednostavan i efektivan proces Oporaba materijala visoke čistoće	Velika potrošnja energije zbog visokih temperatura Korištenje kemikalija

Na tablici 2 dan je pregled metoda recikliranja tankoslojnih panela:

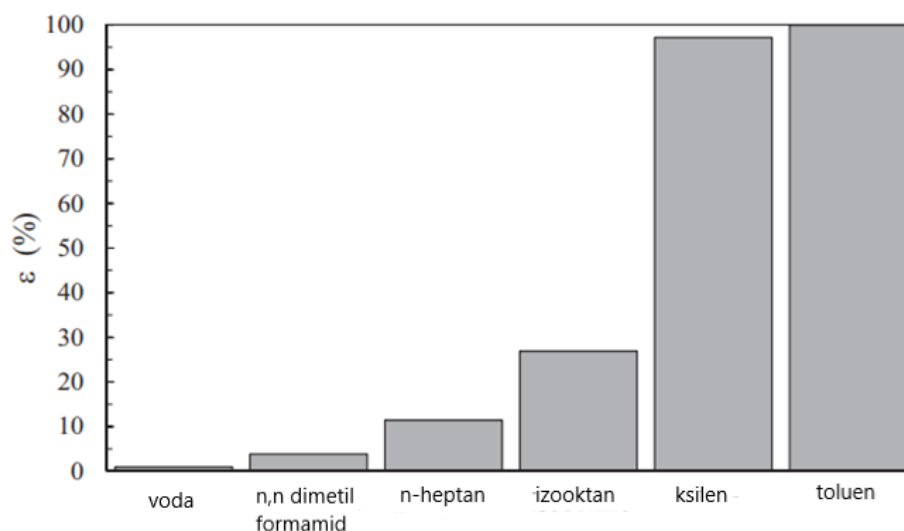
Tablica 2 PREGLED METODA RECIKLIRANJA TANKOSLOJNIH PANELA [23]

<i>Tehnologija</i>	<i>Proces</i>	<i>Prednosti</i>	<i>Nedostaci</i>
<i>Raslojavanje</i>	Fizička dezintegracija	Moguća obrada raznolikog otpada	Miješanje frakcija različitih materijala Gubici u svakoj frakciji materijala Staklo djelomično spojeno s EVA Lom solarnih ćelija
	Organsko otapanje	Uklanjanje organskih slojeva sa stakla	Različito vrijeme otapanja

		Otopine moguće ponovo koristiti Jednostavno uklanjanje EVA	Djelomično otapanje; EVA i dalje djelomično na staklu
	Termička obrada	Kompletno uklanjanje EVA Moguć oporavak cijele ćelije	Velika potrošnja energije Opasne emisije
	Obrada radijacijom	Jednostavno uklanjanje EVA	Vrlo skup proces Spor proces
<i>Separacija materijala</i>	Erozija	Bez kemikalija Staklo se može oporabiti	Potrebna dodatna obrada ili predpročišćivanje
	Jetkanje	Jeftin i efektivan proces Oporaba materijala visoke čistoće	Velika potrošnja energije zbog visokih temperatura Korištenje kemikalija
	Vakuumsko pjeskarenje	Uklanjanje poluvodiča bez kemijskog otapanja Staklo se može oporabiti	Emisija metalnih frakcija Relativno dug proces
	Suha i mokra mehanička obrada	Ne-kemijski proces Jednostavan proces Zahtjeva malo energije Dostupna oprema	Ne uklanjaju se otopljene čvrste tvari
	Tensidna kemija	Tensidi se mogu ponovo koristiti Potpuno uklanjanje metala iz stakla	Emulzije se moraju prilagođavati različitim FN tehnologijama
	Ispiranje	Kompletna ekstrakcija metala iz stakla Moguća daljnja ekstrakcija metalnih otopina	Velika količina kemikalija Zahtjevna kontrola kemijskih reakcija
	Flotacija	Relativno jednostavna metoda Limitirano korištenje kemikalija	Materijali se odvajaju u različitim fazama flotacije Neadekvatna čistoća materijala
<i>Pročišćavanje materijala</i>	Hidrometalurški	Komercijalno primjenjivo Niske i kontrolirane emisije Jednostavno upravljanje vodom	Puno koraka separacije i apsorpcije Kemijski proces se mora prilagoditi tehnologiji
	Pirometalurški	Uspostavljeni industrijski proces Sirovina može sadržavati različite materijale	Gubljenje materijala u troski Teški i neželjeni materijali Potrebna visoka propusnost

### 3.3.4 ISTRAŽIVANJA TEHNOLOGIJA RECIKLIRANJA

I dalje ne postoji najbolje općepriznato otapalo za EVA sloj te se znanstveni eksperimenti s ciljem pronalaska istog i dalje provode. U Italiji je ispitan kemijski proces koji se sastoji od otapanja s organskim otapalima EVA sloja koji drži zajedno obnovljive materijale; staklo, metale i nosač. Parametri procesa koji su uzeti u obzir tijekom eksperimentalnih ispitivanja bili su: vrsta otapala, vrijeme zadržavanja, temperatura, toplinska predobrada na 200 °C i korištenje ultrazvuka na 200 W. Za procjenu učinkovitosti procesa definiran je specifičan parametar, stupanj odvajanja. Provedene su dvije serije testova. Prvi je omogućio odabir najboljeg otapala između šest testiranih (voda, toluen, ksilen, 2,4-trimetilpentan, n-heptan i N,N-dimetilformamid) i kao najbolji se pokazao toluen koji je omogućio maksimalno odvajanje, kao što je prikazano na Slici 11. Druga serija testova provedena je korištenjem samo toluena, uz optimizaciju procesa nakon što su pronađeni optimalni uvjeti (60 °C, vrijeme zadržavanja manje od 60 min, upotreba ultrazvuka, bez termičke prethodne obrade). Zaključili su da korištenje ultrazvuka uvelike pogoduje odvajanju, dok toplinska predobrada ne. [38]



Slika 11. Stupanj otapanja u različitim otapalima [38]

Primjenjuju se organska otapala na solarne panele od kristalnog silicija kako bi uklonili EVA sloj, za koji je utvrđeno da je topiv u različitim vrstama organskih otapala, od kojih je trikloretilen pronađen kao najučinkovitiji. Solarni paneli (125 mm x 125 mm) obrađeni su u procesu pomoću mehaničkog pritiska, što je bilo bitno za suzbijanje bubrenja EVA

tijekom namakanja u trikloretilenu tijekom 10 dana na 80 °C. Regenerirane Si ploče mogle bi se učinkovito koristiti nakon procesa recikliranja. [39]

Kim i Lee su koristili ultrazvučnu sondu za otapanje etilen vinil acetata (EVA) u fotonaponskim modulima u različitim organskim otapalima, uključujući O-diklorbenzen (O-DCB), trikloretilen (TCE), benzen i toluen. Pokusi su provedeni pri različitim koncentracijama otapala, temperaturama, ultrazvučnim snagama i vremenima zračenja. U prisutnosti 450 W ultrazvučnog zračenja, EVA u FN modulima potpuno je otopljen u 3 M toluena na 70 °C; međutim, PV ćelija je oštećena zbog bubrenja EVA. Pri snazi zračenja od 900 W, omjer otapanja bio je veći od onog dobivenog pri snazi od 450 W, a učinci snage ultrazvuka potvrđeni su pri 70 °C. U TCE i benzenu opaženo je smanjenje otapanja EVA kako je temperatura porasla s 55 na 70 °C zbog pojave reakcija pirolize i pirolitičke reakcije, koje su pripisane niskom vrelištu, odnosno ultrazvučnoj degradaciji otapala. Osim kada je korišten O-DCB, uočene su pukotine u FN ćeliji i postignuto je potpuno otapanje EVA. Stoga je O-DCB najučinkovitije otapalo za obnavljanje FN ćelija putem ultrazvučnog zračenja. [40]

Shin i sur. reciklirali su 60 multikristalnih Si pločica primjenom termičke obradu za odvajanje slojeva solarnih panela. Ploče su prvo obložene pastom fosforne kiseline, a zatim zagrijavane 2 minute na pet temperatura u rasponu od 320 °C do 400 °C. Ag i Al metalne elektrode otopljene su uzastopce u otopinama HNO<sub>3</sub> i KOH kako bi se dobile Si pločice. Nečistoće s površine pločice uklonjene su pastom za jetkanje koja je sadržavala H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>. Ova metoda je ekološki prihvatljiva jer može smanjiti potrošnju vode tijekom procesa i eliminirati upotrebu štetnih aktivnih tvari. Rezultirajuće obnovljene pločice uspješno su korištene u proizvodnji solarnih panela i utvrđeno je da je učinkovitost ćelija slična onoj izvornog proizvoda. [41]

Ispitivana je i mogućnost korištenja trivijalnih uvjeta ispiranja za dobivanje uglavnom srebra i indija iz proizvodnog otpada CIGS solarnih ćelija, zajedno s razinama onečišćenja u procjednoj vodi. Istodobno je procijenjena mogućnost selektivnog ispiranja onečišćivala, s ciljem čišćih tokova vrijednih metala i njihove ponovne uporabe u novim proizvodima. Rezultati pokazuju povećanje u prinosima ispiranja Ag i In kada se poveća koncentracija kiseline i omjer površine i tekućine, međutim time se povećava i kontaminacija. Potpuno izdvajanje Ag i 85% obnavljanje In postignuto je s 2 M HNO<sub>3</sub> i A:L jednakim 1:3 cm<sup>2</sup>/ml nakon 24 h ispiranja na sobnoj temperaturi. Pod istim uvjetima,

ispiranje s 0,5 M HNO<sub>3</sub> ekstrahira 85% Ag i 30% In, uz odgovarajuće smanjene razine kontaminacije. Konačno, ispiranje s 0,1 M HNO<sub>3</sub> pokazalo se obećavajućim za postizanje veće čistoće Ag kroz početni korak selektivnog ispiranja Zn tijekom 1 h. [42]

Zhang i Ciftja istraživali su uklanjanje inkluzija SiC i Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> iz silicijevih ostataka solarnih ćelija filtracijom s pjenastim filtrima. Testirani su različiti modeli za uklanjanje inkluzija i učinkovitost pjenastog keramičkog filtra. Mehanizmi za uklanjanje inkluzija iz silicija filtracijom uključuju „filtraciju kolača“ za uklanjanje velikih Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> štapića i velikih SiC inkluzija, dubinsku filtraciju manjih Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> inkluzija i većine SiC čestica, stvaranje velikih SiC klastera i mostova preko pora, otapanje silicija u ugljenim filtrima i naknadnu reakciju za stvaranje slojeva SiC. Međutim, rezultati pokusa pokazali su da je onečišćenje iz filtra glavna prepreka industrijskoj primjeni predloženih metoda. [43]

Wang i sur. istraživali su potencijalnu izvedivost uporabe silicijevog praha primjenom postupka centrifugiranja. Otopina glikola i fragmenti željeza su uklonjeni pomoću acetona i dušične kiseline. Zatim je primijenjeno centrifugiranje kako bi se odvojili SiC rezovi i SiC abrazivi pomoću teške tekućine s gustoćom između Si i SiC. Taloženjem volumne koncentracije čvrste tvari na 6,5%, gustoće teške tekućine na 2,35 g/cm<sup>3</sup>, vremena miješanja na 60 min i vremena centrifugiranja na 60 min, dobiva se produkt čistoće Si od 90,8%. Oporavljeni Si može se ponovo koristiti ako se pravilno obradi. Međutim, predloženi postupak je imao neke nedostatke povezane s koncentracijom, uključujući upotrebu teške toksične tekućine, dugo vrijeme obrade i nemogućnost uklanjanja submikronskih SiC čestica. [44]

Doni i Dughiero predstavili su elektro-termički proces grijanja razvijen na Sveučilištu u Padovi za jednostavno uklanjanje stakla sa c-Si solarnih modula. Predložena metoda temelji se na toplinskom učinku izmjeničnog magnetskog polja na rad dielektričnog materijala. Nakon zagrijavanja jezgre c-Si PV panela pomoću radiofrekventnog elektro-termalnog uređaja za grijanje, stakleni fragmenti su se lako mogli ukloniti iz laminata, omogućujući odvajanje stakla koje se može reciklirati. Predložena metoda djeluje na temperaturama nižim od temperature razgradnje EVA i supstrata, značajno smanjujući utjecaj recikliranja PV modula na okoliš. [45]

Berger i sur. predstavili su razvoj dviju održivih strategija recikliranja fotonaponskih modula tankog filma kao rezultate EU-LIFE projekta RESOLVED. U skladu sa strategijama, kompletni tankoslojni fotonaponski moduli su termički raslojeni u staklo

koje služi kao nosač i pokrovno staklo. Pokrovno staklo može ući u proces recikliranja stakla bez daljnje obrade, a noseće staklo tretirano je pjeskarenjem radi uklanjanja slojeva poluvodiča. Slomljeni moduli obrađeni su mehanički drobljenjem i mljevenjem radi smanjenja veličine zrna i otkrivanja sloja poluvodiča. Poluvodički sloj je uklonjen u procesu mokrog mehaničkog trenja. Predkoncentracija CIS- i CdTe-finih čestica učinjena je mokrim mehaničkim procesima poput flotacije. Naravno, proizvodi flotacije CdTe moraju se pročistiti do poluvodičkog materijala kako bi bili korisni za proizvodnju novih modula. Prema studiji LCA, predloženi proces recikliranja ima jasne prednosti u usporedbi s opcijama odlaganja i spaljivanja te još uvijek postoje mogućnosti za optimizaciju obje strategije recikliranja u pogledu potrošnje energije. [46]

### 3.4 ODLAGANJE

Istraživači s Instituta za istraživanje električne energije (EPRI) proveli su studiju za američke komunalne tvrtke koje posjeduju fotonaponske panele kako bi planirali gospodarenje na kraju životnog vijeka. Zaključili su da se odlaganje solarnih panela ne preporučuje zbog potencijalnog ispiranja toksičnih tvari (kao što su kadmij, selen i olovo) koje bi završile u tlu ili vodi. Osim toga, odlaganjem fotonaponskog otpada na odlagališta gubi se mogućnost uporabe vrijednih materijala. [47]

No, mnogi fotonaponski paneli na kraju životnog vijeka ipak završavaju na odlagalištima. Prema procjenama iz podataka Međunarodne agencije za obnovljivu energiju, samo se 1 od 10 panela koji se povuku iz upotrebe zapravo reciklira. [48]

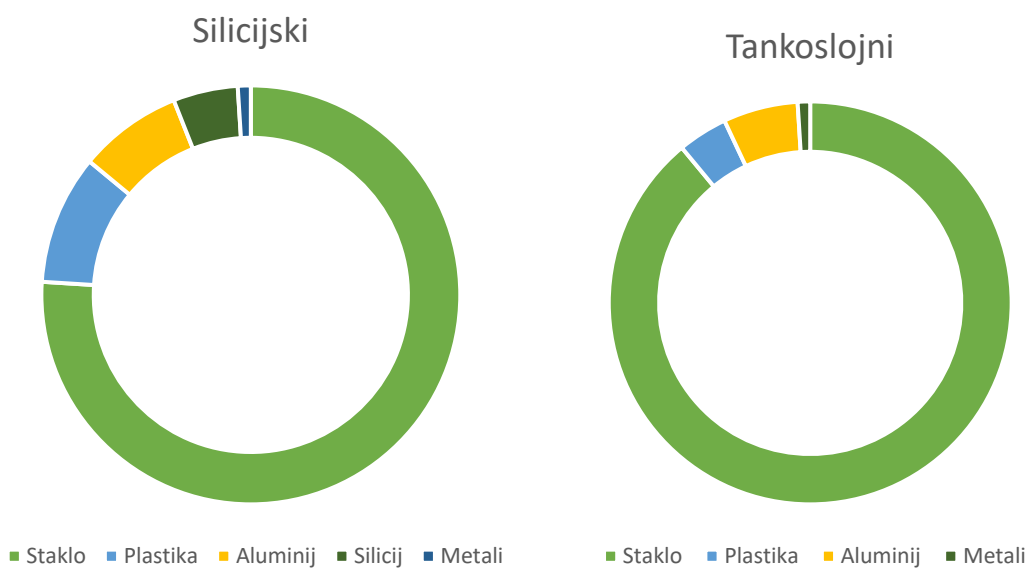
### 3.5 POTENCIJAL RECIKLIRANJA FOTONAPONSKIH PANELA

Nedovoljno se pažnje kod solarnih panela usmjerava na potencijalan utjecaj na okoliš i ljudsko zdravlje, ako se tim sustavima nepravilno gospodari na kraju životnog vijeka (engl. end-of-life- „EoL“). Rijetki materijali kao što su rutenij, galij, indij i telur bitne su komponente fotonaponskih panela, dok se baterije za pohranu energije (battery energy storage system- „BESS“) sastoje se od različitih kemijskih tvari (litij-ion, olovna kiselina, nikal kadmij, slana voda i redox baterije). Odgovarajuća EoL strategija upravljanja solarnim fotonaponskim sustavima je prijeko potrebna, ne samo za sprječavanje i/ili

ublažavanje budućih ekoloških problema, već i za smanjenje potražnje rijetkih zemljanih materijala.

Glavni problem koji proizlazi iz ove vrste otpada je prisutnost tvari toksičnih za okoliš i loša biorazgradivost otpada koji zauzima velike količine kada se odlaže na odlagalište. Za sad još nema pritiska za osiguravanje kapaciteta za recikliranje fotonaponskih panela jer je njihov vijek trajanja relativno dug, a oni su kao tehnologija relativno novi. Tehnologije obrade EoL fotonaponskih panela nisu „zelene“, ali znanstvenici diljem svijeta rade na poboljšanjima u smislu učinkovitosti i ekološke prihvatljivosti. Države će s porastom količine otpadnih fotonaponskih panela morati osigurati vlastite strukture za zbrinjavanje ili će svoj fotonaponski otpad predavati drugima, uz visoke troškove i bez povrata sirovina koje se dobiju recikliranjem. Za sad oštećeni fotonaponski moduli pokriveni garancijom većinom završavaju kod proizvođača koji osigurava zbrinjavanje, tj. predaje obrađivačima. Najveći problem će najvjerojatnije postati fotonaponski sustavi koji su proizvedeni prije politike produljenja odgovornosti proizvođača, ali i oni od strane proizvođača koji više ne postoje. Predviđa se da će za fotonaponske sustave proizvedene od 2010. do sada veće potrebe za recikliranjem u Hrvatskoj trebati tek nakon 2030. godine. Stoga bi ovo prijelazno razdoblje trebalo iskoristiti za financiranje i razvoj učinkovitih i ekološki prihvatljivih tehnologija recikliranja kako bi se što više materijala sadržanih u solarnim modulima mogao reciklirati u budućnosti. [24]

Na slici 12 prikazan je sastav silicijskih i tankoslojnih panela:



Slika 12. Sastav silicijskih i tankoslojnih panela [24]

Prijelaz na kružno gospodarstvo omogućit će do sada neiskorištene prilike za sve sudionike duž opskrbnog lanca. Omogućavanje EoL strategije može pomoći u sprječavanju nedostatka rijetkih materijala za zadovoljavanje buduće potražnje za solarne sustave. Proizvođači mogu smanjiti svoje proizvodne troškove ponovnim korištenjem materijala te smanjiti svoju ovisnost o uvozu sirovina. Distributeri i instalateri mogu postići bolju konkurentnost i povjerenje kupaca preko zelene strategije. Kad je društveni aspekt u pitanju, kružno korištenje materijala omogućit će otvaranje radnih mjesta u prikupljanju i sektorima recikliranja kao i sa smanjenjem rizika za zdravlje ljudi i štete za okoliš. Kako bi se napravila tranzicija s linearno na kružno gospodarstvo u opskrbnom lancu solarnih sustava, potrebni su prikladni propisi i poticaji za poticanje svih sudionika opskrbnog lanca na proaktivnost i suradnju. Proširena odgovornost proizvođača, obavezno prikupljanje, recikliranje i dijeljenje odgovornosti između sudionika samo su neke od mogućih strategija za promicanje sudjelovanja u EoL prikupljanju i recikliranju. [24]

### 3.6 PREPREKE PRI IMPLEMENTACIJI KRUŽNOG GOSPODARSTVA

#### 1. Nedostatak isplativosti recikliranja EoL fotonaponskih panela

To uključuje visoku cijenu kemikalija koje su potrebne tijekom procesa recikliranja, velike troškove prijevoza za prikupljanje, kao i kapitalne troškove za uspostavu centara za prikupljanje te pogone i strojeve za samu reciklažu. D'Adamo i suradnici su 2017. proučavali ekonomsku isplativost recikliranja otpadnih solarnih panela od kristalnog silicija te zaključili nedostatak profitabilnosti: po svakom kilogramu recikliranja trošak je između 0,50 i 1,19 eura.

#### 2. Nedostatak određene državne regulative

Bez regulatornih mehanizama za upravljanje istima, nema pravnih protokola koji bi vodili potrošače i industriju kad je u pitanju pravilno prikupljanje i uporaba kako bi se izbjegli neželjeni utjecaji na okoliš. Propisima bi se izvršio potreban pritisak na proizvođače, uvoznike, trgovce i preprodavače kako bi se postigli ciljevi oporavka i dodijelila odgovornost svakom sudioniku opskrbnog lanca.

#### 3. Nedostatak standardnih i koherentnih poslovnih modela za prikupljanje i oporavak



Trenutačni poslovni modeli ne nude dovoljno poticaja potrošačima za obnavljanje ili recikliranje, posebice u nedostatku pritiska od strane vlada. Dobrovoljni programi koje uvode vlade rijetko postižu ciljeve budući da većina potrošača nije voljna platiti ekološku premiju, točnije, većina potrošača ne vjeruje da bi trebali platiti prikupljanje i recikliranje.

#### 4. Nedostatak koordinacije između proizvođača i obrađivača

Tvrtke koje recikliraju se suočavaju s poteškoćama u određivanju najbolje metode za recikliranje fotonaponskih panela jer proizvođači nerado dijele zaštićene informacije o proizvodi i/ili nemaju sofisticiranu opremu za obradu koja može razgraditi različite komponente ili oporabiti vrijedne resurse.

#### 5. Tržišne prepreke

Što se tiče tržišnih prepreka, tri su temeljna čimbenika. Prvo je relativno nerazvijeno tržište fotonaponskih panela, što znači da je i dalje malo dostupnih EoL proizvoda za recikliranje što sam proces čini neisplativim. Druga tržišna prepreka je generalno slabo povjerenje tržišta u obnovljene i reciklirane proizvode, to jest percepcija potrošača da se recikliranjem smanjuje učinkovitost. Naposljetku, mnogi novi proizvođači fotonaponskih panela iz novo industrijaliziranih zemalja proizvodit će jeftine proizvode s malo brige za ekološke zahtjeve koji se očekuju od etabliranih svjetskih proizvođača. Možda je jedina opcija u ovom slučaju obavezni uvjet registriranja u shemu kolektivnog recikliranja te obavezni održivi dizajn proizvoda.

#### 6. Emisije i onečišćenja-ekološka barijera

Proces recikliranja može uključivati opsežnu upotrebu kemikalija, toplinsku obradu ili uporabu strojeva tijekom faze odvajanja modula. Iako su nedavni razvoji metoda recikliranja znatno smanjili emisije i onečišćenja, visoka potrošnja energije ostaje ključni izazov.

#### 7. Složenost EoL procesa

Složenost uključuje neizvjesnu kvalitetu vraćenih EoL panela, raspršenost po različitim geografskim lokacijama, tehničke izazove zbog različitih materijala unutar panela, različite tehnologije koje su potrebne za recikliranje različitih vrsta panela itd. Nedostatak odgovarajućih centara za prikupljanje i postrojenja za recikliranje također velika prepreka. Budući da su fotonaponski sustavi raspoređeni po različitim geografskim lokacijama, potrebno je uspostaviti optimalnu mrežu prikupljanja i recikliranja. [24]

Državni propisi trebaju propisati jasne smjernice i ciljeve za poduzeća koja posluju unutar svakog koraka opskrbnog lanca i provoditi kazne za nepoštivanje. Takvi bi propisi mogli uključivati sheme upravljanja proizvodima, kodekse ponašanja u industriji, obvezne ciljeve uporabe, kao i standarde dizajna proizvoda koji na primjer uključuju kriterije za lako rastavljanje. Tako bi se stavila odgovornost na sve sudionike opskrbnog lanca za provedbu potrebnih mjera. Produljena odgovornost proizvođača je najčešći tip propisa koji se primjenjuje za upravljanje elektroničkim otpadom nakon upotrebe. Tako se proizvođače i uvoznike tjera na odgovornost za aktivnosti prikupljanja i recikliranja. Ova shema je učinkovit pristup za omogućavanje recikliranja internalizacijom troškova recikliranja unutar početne cijene proizvoda, iako će utjecati na pristupačnost fotonaponskih sustava ako se ne otkriju isplativije tehnologije recikliranja.

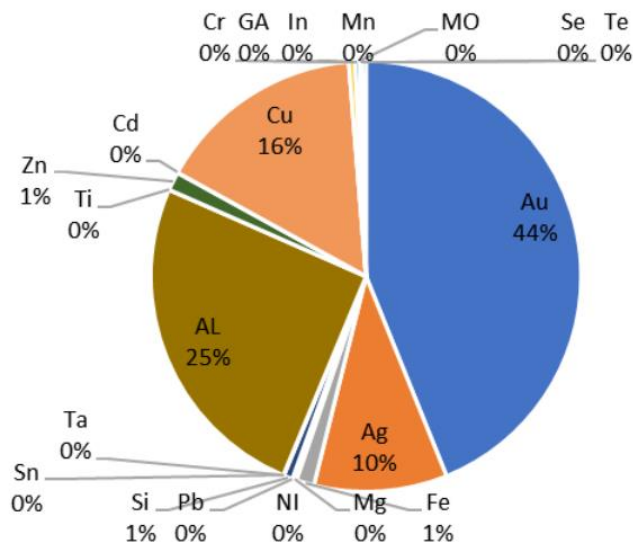
S obzirom na to da će fotonaponski sustav biti jedan od primarnih izvora energije u budućnosti, količina otpada bi u dogledno vrijeme trebala biti dovoljna da bi proces recikliranja bio isplativ. Potrebno je uspostaviti standard kvalitete za obnovljene i recikliranje proizvode. Standardizacija kroz certificiranje bit će dobar dokaz za potrošače da su obnovljeni i reciklirani proizvodi zadovoljili strogi standard kvalitete i inspekciju. Osim toga, nuđenje korisničkih jamstava potrošačima koji kupuju obnovljene i reciklirane fotonaponske sustave osigurat će veći interes potrošača za kupnju istih, koji bi mogli biti i znatno cjenovno pristupačniji. To će potaknuti i proizvođače i druge sudionike u lancu da obavljaju aktivnosti prikupljanja i recikliranja.

Aktivnosti prikupljanja i recikliranja predstavljaju složen proces koji zahtijeva međusobno razumijevanje i razmjenu znanja između potrošača, proizvođača, tvrtki za recikliranje, vlada i nevladinih organizacija. Same vlade moraju podići javnu ekološku svijest o mogućnostima bolje prakse recikliranja kroz kampanje podizanja svijesti i profesionalno obrazovanje. [24]

### 3.7 EKONOMSKI POTENCIJAL RECIKLIRANJA OTPADNIH FOTONAPONSKIH PANELA

Ekonomska analiza pokazuje da će vrijednost ukupnog otpada koji će nastati od 2020. do 2047. oko 645 trilijuna američkih dolara prema sadašnjoj cijeni robe, od čega se 70% troška (453 trilijuna američkih dolara) može povratiti recikliranjem. Slika ispod jasno pokazuje da su glavni izvori doprinosa s ekonomskog gledišta zlato (44%), aluminij

(26%), bakar (16%) i srebro (10%). Većinu ekonomske vrijednosti čini otpad od plemenitih i neplemenitih metala. Štoviše, kritični metali poput galija, magnezija, indija i telura također imaju zamjetnu ekonomsku prisutnost. Plemeniti metali imaju visoku ekonomsku vrijednost i također su rijetki; srebro se koristi u C-Si solarnim ćelijama fotonaponskih modula, a i srebro i zlato se koriste u pretvaračima. [49] Na slici 13 prikazani su glavni izvori doprinosa sa ekonomskog gledišta:



Slika 13. Glavni izvori doprinosa sa ekonomskog gledišta

### 3.8 REGULATIVE U EUROPSKOJ UNIJI I SVIJETU

Europa je apsolutno vodeća u svijetu kad su u pitanju regulatorne inicijative koje upravljaju EoL fotonaponskim panelima putem direktive WEEE (The Waste Electrical and Electronic Equipment Regulations). Zahvaljujući tome, Velika je Britanija u 2015. godini uspješno oporabila 84,7%, a Francuska 96,1%. Paket kružnog gospodarstva koji je Europska komisija uvela 2016. godine omogućila je veće ciljeve recikliranja i strožu provedbu mjera za sprječavanje i ponovnu upotrebu otpada.

Strategija EU-a za solarnu energiju:

*„Europska komisija u 2023. planira predložiti dva obvezna instrumenta unutarnjeg tržišta koji bi se primjenjivali na solarne fotonaponske module, invertere i sustave koji se prodaju u EU-u: Uredbu o ekološkom dizajnu i Uredbu o označivanju energetske učinkovitosti. Te bi se mjere odnosile na učinkovitost, trajnost te mogućnost popravka i recikliranja proizvoda i sustava kako bi se potaknula proizvodnja okolišno održivih*

uređaja. Komisija procjenjuje i mogućnosti koje obuhvaćaju kvalitetu postupka proizvodnje i ugljičnog otiska fotonaponskih modula. Osim učinka na održivost, od tih se mjera očekuje da potaknu inovacije i osiguraju potencijalnim kupcima zajednički okvir za usporedbu različitih proizvoda. EU će putem Obzora Europa nastaviti podupirati istraživanja i inovacije kako bi se smanjili troškovi tehnologija solarne energije te pritom povećala njihova energetska učinkovitost i održivost, među ostalim u etapi proizvodnje. Te nove tehnologije uključuju heterospojne ćelije, perovskite i tandemske ćelije, koje su učinkovitije od komercijalnih tehnologija. Financijska potpora potrebna je i za inovacije u tehnologijama solarne toplinske energije ili koncentrirane solarne energije, kao i u proizvodima prilagođenima inovativnim načinima uvođenja. Predstojeći program rada od 2023. do 2024. uključivat će vodeću inicijativu za podupiranje istraživanja i inovacija u području solarne energije usmjerenu, između ostalog, na nove tehnologije, okolišnu i socioekonomsku održivost te integrirani dizajn. Poboljšanje učinkovitosti resursa i kružnosti jednako je važno za rješavanje tog pitanja. Zakonodavstvom EU-a od 2012. poziva se na uporabu, ponovnu upotrebu i recikliranje fotonaponskih modula. Reciklažna industrija danas može pružiti visoke razine kružnosti, no i dalje su potrebne dodatne inovacije. Količina fotonaponskih ploča koje se približavaju kraju svojeg životnog vijeka znatno će se povećati od 2025. To će zahtijevati osiguranje inherentne mogućnosti popravka i recikliranja nove opreme te stvaranje ekosustava za učinkovito recikliranje rabljenog materijala. Mjere za ekološki dizajn fotonaponskih sustava uključivale bi zahtjeve za informiranje o tim aspektima kako bi se promicao bolji dizajn proizvoda kojim se postižu bolja energetska svojstva te omogućuju recikliranje i popravak.“ [50]

Osim Europe, i neke države u SAD- u (npr. Washington, Texas, Minnesota itd.) imaju snažnu implementaciju produžene odgovornosti proizvođača za različite EoL elektroničke uređaje.

U zemljama u razvoju gdje su vladine strategija za obnovljivu energiju manje intenzivne ili čak nepostojeće ne postoje inherentni pritisci ili poticaji znanstvenoj zajednici i industriji kako bi se fokus skrenuo na EoL upravljanje fotonaponskim panelima. Glavni je razlog toga što je industrija fosilnih goriva i dalje ekonomski jeftinija. Izuzetak je Kina, koja se u samo jednom desetljeću pokazala kao vodeća država po instaliranim fotonaponskim kapacitetima te i velik broj proizvodnih tvrtki za fotonapone ima sjedište u Kini. Mnogi su istraživači u Kini započeli istraživanja usmjerena na ublažavanje

nadolazećeg fotonaponskog otpada, iako većina kineskih PV sustava još nije na kraju svog životnog ciklusa. [5,51,52]

### 3.9 PRIMJERI DOBRE PRAKSE

SolarWorld je njemačka tvrtka posvećena proizvodnji i marketingu fotonaponskih proizvoda diljem svijeta integracijom svih komponenti lanca solarne energije, od sirovine do proizvodnje modula, od trgovine solarnim panelima do promocije i izgradnje solarnih elektrana. Njihov proces recikliranja je sljedeći: dotrajali moduli se spaljuju gdje plastične komponente izgaraju u složenom procesu zaštite poluvodiča na 600 °C. Preostali materijali poput solarnih ćelija, stakla i metala odvajaju se ručno. Staklo i metal šalju se na reciklažu. Solarne ćelije se ponovo ugrađuju u pločice. Prema studiji PV cycle-a iz 2007. godine, reciklirane pločice su nakon obrade solarnih ćelija jednake vrijednosti kao i nove pločice i mogu se ponovno obraditi u standardnoj liniji za proizvodnju solarnih ćelija i integrirati u fotonaponske module (vidi sliku 3). Proces može obnoviti više od 84% težine ulaznog modula s do 6 N čistoće frakcija. Više od 90% stakla može se obnoviti za korištenje u novim proizvodima i 95% poluvodičkih materijala za korištenje u novim solarnim modulima. Energija spaljivanja polimera mogla bi se koristiti u drugim procesima ili za predgrijavanje novih punjenja u budućoj proizvodnji. Toplinski proces obnavlja 0–98% ćelija, ovisno o prethodnom oštećenju modula, vrsti strukture modula i korištenim solarnim ćelijama. Ako ćelije imaju odlomljene rubove, mikropukotine itd., ne mogu se mogu reciklirati u novu pločicu, već se umjesto toga koriste za dobivanje sirovog materijala silicija. Trenutni postupak treba poboljšati u automatiziranom odvajanju komponenti s obzirom na neučinkovitost procesa termičkog delaminiranja za zaštitu poluvodiča za module s tankim pločicama i ručnog odvajanja stakla, metala i ćelija. [53]

FirstSolar je američki proizvođač tankoslojnih fotonaponskih panela te pružatelj fotonaponskih elektrana i pratećih usluga uključujući financije, izgradnju, održavanje i EoL obradu. FirstSolar je razvio postupak za recikliranje CdTe modula tankog filma. Proces je proširen na sve proizvodne pogone u SAD-u, a replicira se u Frankfurtu na Odri, u Njemačkoj. Otprilike 90% (po masi) svakog prikupljenog FirstSolar PV modula reciklira se u nove proizvode. Glavni proces recikliranja je sljedeći: moduli na kraju životnog vijeka prvo se usitnjavaju i melju čekićem u komade dovoljno male da prekinu

laminacijske veze. Zatim se poluvodički filmovi uklanjaju postupkom ispiranja uz dodatak kiseline i vodikovog peroksida u sporo rotirajućem bubnju od nehrđajućeg čelika. Preostala količina u bubnju zatim se spušta do klasifikatora koji odvaja krutinu (uključujući staklo i laminatne materijale) od tekućine bogate metalima. Vibrirajuće sito odvaja staklo od većih komada laminatnog materijala. Staklo se dalje čisti kako bi se uklonili ostaci poluvodičkog materijala, a zatim se pakira za recikliranje. U međuvremenu se tekućina bogata metalima pumpa u jedinicu za taloženje. Metalni spojevi se talože u tri stupnja pri rastućem pH i zatim koncentriraju u spremniku za zgušnjavanje. Dobiveni nerafinirani materijal bogat metalima pakira se za obradu od strane treće strane za proizvodnju proizvoda od telura i kadmija. Proces može obnoviti 90% stakla za korištenje u novim proizvodima i 95% poluvodičkih materijala za korištenje u novim solarnim modulima. Iskorištenje telura je 80% ili bolje. [54]

ANTEC Solar GmbH uspostavio je pilot-postrojenje temeljeno na procesu recikliranja tankoslojnih fotonaponskih modula CdTe/CdS. U ovom procesu, moduli se prvo fizički rastavljaju na fragmente. Fragmenti modula zatim se izlažu atmosferi koja sadrži kisik na temperaturi od najmanje 300 °C, uzrokujući pirolizu EVA. Nakon toga, fragmenti modula su izloženi atmosferi plina koji sadrži klor na temperaturi višoj od 400 °C, uzrokujući proces jetkanja u kojem se generiraju CdCl<sub>2</sub> i TeCl<sub>4</sub>. Stvoreni CdCl<sub>2</sub> i TeCl<sub>4</sub> zatim se kondenziraju i talože hlađenjem. [54]

Procesi tvrtki FirstSolar i ANTEC Solar GmbH fokusirani su na tankoslojne module, dok je SolarWorld fokusiran na recikliranje Si. Fizičku delaminaciju koriste FirstSolar i ANTEC Solar GmbH. Iako je dokazano da je takav postupak tehnički izvediv, ekonomski isplativ i sposoban za rješavanje miješanog otpada fotonaponskih modula, njime nije moguće u potpunosti ukloniti sloj poluvodiča s nosećeg stakla, a zbog toga je potrebno uključiti i druge postupke odvajanja, kao što je piroliza. Također, nije moguća izravna uporaba ćelija nakon fizičke delaminacije. Proces toplinske razgradnje koristi se u SolarWorld procesu recikliranja. U usporedbi s fizičkim postupkom delaminacije, toplinski proces ima prednost moguća izravne ponovne uporabe za neoštećene solarne ćelije i uporabu materijala visoke čistoće. Međutim, zahtijeva veliku energiju i stvara emisije u zrak. Također se može primijetiti da je ANTEC Solar GmbH usvojio postupak suhog jetkanja umjesto mokro-mehaničkog procesa i procesa ispiranja za odvajanje materijala. Ovaj proces ima prednost što je ekonomičniji i ekološki prihvatljiviji. [54]

#### 4. ZAKLJUČAK

Fotonaponski paneli su postali ključna tehnologija u proizvodnji čiste energije, ali kako se njihova upotreba širi, važno je razmotriti dugoročne utjecaje na okoliš. Pravilno gospodarenje fotonaponskim panelima na kraju životnog vijeka od velike je važnosti. Fotonaponski paneli sadrže materijale kao što su silicij, staklo, aluminij i druge metale koji se mogu ponovno upotrijebiti. Ovi materijali, ako se pravilno recikliraju, mogu se koristiti za proizvodnju novih panela ili drugih proizvoda. Međutim, ni jedan komercijalni proces recikliranja još uvijek ne može oporaviti sve korisne materijale iz fotonaponskih panela i ne postoji konsenzus o najboljem načinu za postizanje tog cilja. Više košta razbiti ploču i povratiti sirovine nego što same sirovine vrijede. Kad bi se više materijala moglo obnoviti uz veću čistoću, oni bi imali veću tržišnu vrijednost i učinili bi recikliranje ekonomski privlačnijim. Ali ekstrakcija materijala visoke čistoće također zahtijeva više koraka obrade, što povećava troškove. Rješavanje ove dileme moglo bi biti ključno za razvoj održive industrije recikliranja fotonaponskih panela. Ono što je važno u ovom trenutku je što više produljiti vijek trajanja fotonaponskih panela dok se odgovarajuće tehnologije ne razviju do kraja. Fotonaponski paneli koji više ne rade stopostotnim kapacitetom svedeno se mogu koristiti u industrijske ili komercijalne svrhe. Sam razvoj tehnologija ne osigurava i njihovo prihvaćanje na tržištu. Zato nove tehnologije moraju imati odgovarajuću ekonomsku, ekološku, društvenu i političku podlogu. Tek kad se te tehnologije kroz navedene segmente usvoje i na tržištu vidjet će se napredak.

## 5. LITERATURA

1. Energetski institut Hrvoje Požar: Energija u Hrvatskoj- godišnji energetski pregled 2021. Ministarstvo gospodarstva i održivog razvoja Republike Hrvatske
2. Fuk B. Solarni paneli i što s njima kad postanu otpad. Sigurnost 64 2022. (2) 191 – 195. <https://hrcak.srce.hr/file/405711>
3. Granić, G. (ur.) SUNEN program korištenja energije sunca. Zagreb: Energetski institut Hrvoje Požar; 1998.
4. Schmalensee, Richard. The future of solar energy: A personal assessment, Energy Economics, Elsevier, 2015.; 52(S1), 142-148.
5. Xu, Y., Li, J., Tan, Q., Peters, A.L., Yang, C., 2018. Global status of recycling waste solar panels: a review. Waste Manage. 75, 450-458. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.01.036>
6. Energy Education. Photovoltaic cell - Energy Education [Internet]. Energyeducation.ca. 2018. Dostupno na: [https://energyeducation.ca/encyclopedia/Photovoltaic\\_cell](https://energyeducation.ca/encyclopedia/Photovoltaic_cell)
7. How Does a Photovoltaic Cell Work ? [Internet]. www.planete-energies.com. Dostupno na: <https://www.planete-energies.com/en/media/article/how-does-photovoltaic-cell-work>
8. aluminumsolarframe. What is Solar Panel Frame? (with picture) [Internet]. Solar Panel Frame. Dostupno na: <https://aluminumsolarframe.com/what-is-solar-panel-frame/#:~:text=Solar%20panel%20frame%20is%20also>
9. EVA Sheet: An Important Constituent of a Solar Module; Explained - Saur Energy International [Internet]. www.saurenergy.com. Dostupno na: <https://www.saurenergy.com/solar-energy-blog/eva-sheet-an-important-constituent-of-a-solar-module-explained#:~:text=A%20Solar%20EVA%20sheet%20is>
10. How To Choose And Use Solar Panel Junction Box? [Internet]. www.linkedin.com. Available from: <https://www.linkedin.com/pulse/how-choose-use-solar-panel-junction-box-solar-panel-products#:~:text=The%20junction%20box%20is%20a>
11. <https://www.cleanenergyreviews.info/blog/solar-panel-components-construction>
12. Circuit Globe (n.d.). Photovoltaic or Solar Cell. Dostupno na <https://circuitglobe.com/photovoltaic-or-solar-cell.html>



13. Zimmer T. (n.d.). Photovoltaic Cell Types. Retrieved October 15, 2019. Dostupno na: [https://www.labri.fr/perso/billaud/Helios2/resources/en06/Chapter\\_6\\_UB\\_zimmer.pdf](https://www.labri.fr/perso/billaud/Helios2/resources/en06/Chapter_6_UB_zimmer.pdf)
14. Kato T., Wu J., Hirai Y., Sugimoto H. and Bermudez V. (2019). Record Efficiency for Thin-Film Polycrystalline Solar Cells Up to 22.9% Achieved by Cs-Treated Cu(In,Ga)(Se,S)<sub>2</sub>. IEEE Journal of Photovoltaics, 9(1), 325-330. DOI:10.1109/JPHOTOV.2018.2882206
15. 1.Solarni Paneli - Solarni Portal [Internet]. solarnipaneli.energy.Dostupno na: <https://solarnipaneli.energy/category/solarni-paneli/>
16. What are the advantages and disadvantages of thin-film solar? - Power From Sunlight [Internet]. www.powerfromsunlight.com. 2023. Dostupno na: <https://www.powerfromsunlight.com/what-are-the-advantages-and-disadvantages-of-thin-film-solar/>
17. Energy Informative (n.d.). Best Thin Film Solar Panels – Amorphous, Cadmium Telluride or CIGS? Dostupno na: <https://energyinformative.org/best-thin-film-solar-panels-amorphouscadmium-telluride-cigs/>
18. Kaminski P. M., Lisco F., and Walls J.M. (2014). Multilayer broadband antireflective coatings for more efficient thin film CdTe solar cells, IEEE Journal of Photovoltaics, 4(1), 452–456. DOI: 10.1109/JPHOTOV.2013.2284064
19. Basol B.M. and McCandless (2014). Brief review of cadmium telluride-based photovoltaic technologies. Journal of Photonics for Energy, 4(1), 1-8. DOI: 10.1117/1.JPE.4.040996
20. Ong K., Agileswari R., Maniscalco B., Arnou P., Kumar C, Bowers J. and Marsadek M. (2018). Review on Substrate and Molybdenum Back Contact in CIGS Thin Film Solar Cell. International Journal of Photoenergy Volume 2018, Article ID 9106269. <https://doi.org/10.1155/2018/9106269>
21. IRENA. International Renewable Energy Agency (IRENA) [Internet]. Irena.org. 2019. Available from: <https://www.irena.org/>
22. Stephen Peake. Renewable Energy: Power for a Sustainable Future, 4th ed. Oxford, UK: Oxford University Press, 2018.
23. Chowdhury MdS, Rahman KS, Chowdhury T, Nuthammachot N, Techato K, Akhtaruzzaman Md, et al. An overview of solar photovoltaic panels' end-of-life material recycling. Energy Strategy Reviews [Internet]. 2020 Jan;27:100431.

Dostupno na: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211467X19301245>

24. Hengky K. Salim, Rodney A. Stewart, Oz Sahin, Michael Dudley, Drivers, barriers and enablers to end-of-life management of solar photovoltaic and battery energy storage systems: A systematic literature review, *Journal of Cleaner Production*, Volume 211, 2019 537-554,
25. Europa.eu. 2022. Dostupno na: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HR/TXT/HTML/?uri=CELEX:52022DC0221&from=EN>
26. Anić Vučinić A. Posebne kategorije otpada. Nastavni materijali za kolegij Osnove gospodarenja otpadom. Geotehnički fakultet u Varaždinu, ak.god. 2022/23
27. Izvješće o električkom i elektroničkom otpadu za 2009. Godinu (25-10-1993/36); Agencija za zaštitu okoliša, [www.azo.hr](http://www.azo.hr)
28. Hijerarhija gospodarenja otpadom [Internet] Dostupno na: <http://www.reciklaznodvoriste.solin.hr/index.php/gospodarenje-otpadom/hijerarhija-gospodarenja-otpadom>
29. 6.EUR-Lex - waste\_hierarchy - EN - EUR-Lex [Internet]. eur-lex.europa.eu. Dostupno na: [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HR/ALL/?uri=LEGIS-SUM:waste\\_hierarchy](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HR/ALL/?uri=LEGIS-SUM:waste_hierarchy)
30. Projects S. Second life PV modules | Circusol [Internet]. www.circusol.eu. Dostupno na: <https://www.circusol.eu/en/topics/second-life-pv-modules>
31. Solar Photovoltaic (PV) Panels: Reusing, Recycling, & Disposal [Internet]. CA Solar & Storage Association. 2022. Dostupno na: <https://calssa.org/blog/2022/7/22/solar-photovoltaic-pv-panels-reusing-recycling-amp-disposal>
32. Hidroplan; Elaborat za odabir tehnološkog rješenja MBO otpada na ŽCGO Kaštijan u Puli, Pula, 2007
33. Kamaruzzaman Sopian b, Nowshad Amin b, P. Dias, H. Veit, Recycling crystalline silicon photovoltaic modules, in: *Emerging Photovoltaic Materials: Silicon & beyond*, John Wiley & Sons, 2018, pp. 61–102.
34. V. Savvilotidou, A. Antoniou, E. Gidakos, Toxicity assessment and feasible recycling process for amorphous silicon and CIS waste photovoltaic panels, *Waste Manag.* 59 (2017) 394–402.

35. P. Dias, L. Schmidt, L.B. Gomes, A. Bettanin, H. Veit, A.M. Bernardes, Recycling waste crystalline silicon photovoltaic modules by electrostatic separation, *J. Sustain. Metall.* 4 (2) (2018) 176–186.
36. J. Pern, *Module Encapsulation Materials, Processing and Testing (Presentation)* (No. NREL/PR-520-44666), National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States), 2008.
37. Lin, W., Chen, E., Sun, Y.L., n.d. Analysis of old photovoltaic component junction box disassembling mode. *Sol. Energy* Volume 7, Pages 26-29.
38. D. Orac, T. Havlik, A. Maul, M. Berwanger, Acidic leaching of copper and tin from used consumer equipment, *J. Min. Metall. B: Metallurgy* 51 (2) (2015) 153–161.
39. Maurianne Flore Azeumo, Conte Germana, Nicolò Maria Ippolito, Medici Franco, Piga Luigi, Santilli Settimio, Photovoltaic module recycling, a physical and a chemical recovery process, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Volume 193, 2019, Pages 314-319, ISSN 0927-0248, <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2019.01.035>.
40. Y. Kim, J. Lee, Dissolution of ethylene vinyl acetate in crystalline silicon PV modules using ultrasonic irradiation and organic solvent, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 98 (2012) 317–322.
41. J. Shin, J. Park, N. Park, A method to recycle silicon wafer from end-of-life photovoltaic module and solar panels by using recycled silicon wafers, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 162 (2017) 1–6.
42. Ioanna Teknetzi, Stellan Holgersson, Burçak Ebin, Valuable metal recycling from thin film CIGS solar cells by leaching under mild conditions, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Volume 252, 2023, 112178, ISSN 0927-0248, <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2022.112178>.
43. L. Zhang, A. Ciftja, Recycling of solar cell silicon scraps through filtration, Part I: experimental investigation, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 92 (11) (2008) 1450–1461.
44. T.Y. Wang, Y.C. Lin, et al., A novel approach for recycling of kerf loss silicon from cutting slurry waste for solar cell applications, *J. Cryst. Growth* 310 (15) (2008) 3403–3406.

45. A. Doni, F. Dughiero, et al., Electrothermal heating process applied to c-Si PV recycling, in: Proceedings of the 38th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2012, pp. 757–762
46. W. Berger, F.-G. Simon, et al., A novel approach for the recycling of thin film photovoltaic modules, *Resour. Conserv. Recycl.* 54 (10) (2010) 711–718.
47. Shellenberger M. If Solar Panels Are So Clean, Why Do They Produce So Much Toxic Waste? [Internet]. Forbes. Dostupno na: <https://www.forbes.com/sites/michaelshellenberger/2018/05/23/if-solar-panels-are-so-clean-why-do-they-produce-so-much-toxic-waste/?sh=758fdf30121c>
48. Kisela R. California went big on rooftop solar. Now that’s a problem for landfills [Internet]. Los Angeles Times. 2022. Dostupno na: <https://www.latimes.com/business/story/2022-07-14/california-rooftop-solar-pv-panels-recycling-danger>
49. Ayush Gautam, Ravi Shankar, Prem Vrat, End-of-life solar photovoltaic e-waste assessment in India: a step towards a circular economy, *Sustainable Production and Consumption*, Volume 26, 2021, 65-77, <https://doi.org/10.1016/j.spc.2020.09.011>.
50. 7.Europa.eu. 2022. Available from: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HR/TXT/HTML/?uri=CELEX:52022DC0221&from=EN>
51. Khoury, J., Mbayed, R., Salloum, G., Monmasson, E., Guerrero, J., 2016. Review on the integration of photovoltaic renewable energy in developing countries - special attention to the Lebanese case. *Renew. Sust. Energy Rev.* 57, 562-575. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.062>
52. Sovacool, B.K., 2017. Reviewing, reforming, and rethinking global energy subsidies: towards a political economy research agenda. *Ecol. Econ.* 135, 150-163. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2016.12.009>
53. K. Larsen, End-of-life PV: then what? *Renew. Energy Focus* 10 (4) (2009) 48–53.
54. Tao, J., Yu, S.R., 2015. Review on feasible recycling pathways and technologies of solar photovoltaic modules. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 141, 108-124. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2015.05.005>

## 6. POPIS SLIKA

Slika 1. Udio obnovljivih izvora energije u RH do 2021. ....	3
Slika 2. Princip rada fotonaponske ćelije.....	5
Slika 3. Princip rada fotonaponskog panela.....	6
Slika 4. Raspored slojeva fotonaponskog modula .....	8
Slika 5. Usporedba monokristalnog (lijevo) i polikristalnog (desno) panela .....	9
Slika 6. Tankoslojni fotonaponski panel.....	10
Slika 7. Količine fotonaponskih panela po vrsti u 2014. i 2020. i predviđanja za 2030. .....	12
Slika 8. Količine fotonaponskog otpada u milionima tona.....	13
Slika 9. Razlozi kvarova fotonaponskih panela .....	15
Slika 10. Hijerarhija otpada .....	16
Slika 11. Stupanj otapanja u različitim otapalima.....	23
Slika 12. Sastav silicijskih i tankoslojnih panela.....	27
Slika 13. Glavni izvori doprinosa s ekonomskog gledišta.....	31

## 7. POPIS TABLICA

Tablica 1 PREGLED METODA RECIKLIRANJA SILICIJSKIH PANELA .....	20
Tablica 2 PREGLED METODA RECIKLIRANJA TANKOSLOJNIH PANELA .....	21