

# Analiza i vrednovanje recikličnosti fotonaponskih panela

---

**Maglica, Anton**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2022**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:149457>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-05**

*Repository / Repozitorij:*

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



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I  
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA**

**Stručni studij**

**ANALIZA I VREDNOVANJE RECIKLIČNOSTI  
FOTONAPONSKIH PANELA**

**Završni rad**

**Anton Maglica**

**Osijek, 2022.**

# SADRŽAJ

<b>1. UVOD</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1. Zadatak završnog rada</b> .....	<b>1</b>
<b>2. FOTONAPONSKA TEHNOLOGIJA</b> .....	<b>2</b>
<b>2.1. Povijesni razvoj fotonaponske ćelije</b> .....	<b>2</b>
<b>2.2. Fotonaponska ćelija</b> .....	<b>3</b>
2.2.1. Karakteristike fotonaponske ćelije.....	4
2.2.2. Fizikalne osnove .....	7
<b>2.3. Podjela fotonaponskih sustava</b> .....	<b>8</b>
<b>3. PROBLEMI ODRŽIVOSTI FOTONAPONSKIH SUSTAVA</b> .....	<b>10</b>
<b>3.1. Problemi gomilanja zaliha</b> .....	<b>10</b>
<b>3.2. Ponovna uporaba materijala</b> .....	<b>11</b>
<b>3.3. Zakonska regulativa EE otpada u RH</b> .....	<b>12</b>
<b>4. ANALIZA I VREDNOVANJE RECIKLIČNOSTI FOTONAPONSKOG PANELA</b> 14	
<b>4.1. Postupak recikliranja</b> .....	<b>14</b>
<b>4.2. Rastavljanje fotonaponskog panela</b> .....	<b>15</b>
<b>4.3. Analiza recikličnosti</b> .....	<b>19</b>
<b>4.4. Ekonomsko – ekološka analiza</b> .....	<b>23</b>
<b>4.5. Konstrukcijske smjernice recikličnosti</b> .....	<b>26</b>
<b>5. TEHNOLOGIJE RECIKLIRANJA FOTONAPONSKIH PANELA</b> .....	<b>27</b>
<b>5.1. Recikliranje fotonaponskih panela na bazi silicija</b> .....	<b>27</b>
<b>5.2. Recikliranje fotonaponskih panela na bazi kadmij telura</b> .....	<b>28</b>
<b>6. ZAKLJUČAK</b> .....	<b>30</b>
<b>SAŽETAK</b> .....	<b>31</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>32</b>
<b>LITERATURA</b> .....	<b>33</b>
<b>ŽIVOTOPIS</b> .....	<b>34</b>

# 1. UVOD

Kroz čitavu povijest čovječanstva, ljudi si pokušavaju osigurati i omogućiti što kvalitetniji, sigurniji i jednostavniji život, a napredak tehnologije je to značajno ubrzao. Napretkom tehnologije došla je i sve veća potreba za električnom energijom što dovodi do trošenja neobnovljivih izvora energije. Kako bi se osigurao dugi vijek upotrebe električne energije uvode se fotonaponski paneli koji iskorištavaju sunčevu energiju za proizvodnju električne energije. Proces postavljanja fotonaponskih panela nije kompliciran, a korisniku može osigurati uštedu nakon određenog vremena, a i koristi se obnovljivi izvor energije. Također, osim potrebe za proizvodnjom električne energije dolazi i do velikih količina otpada elektroničke opreme na odlagalištima što predstavljam problem jer bi se ta oprema trebala reciklirati i ponovno upotrijebiti. Upravo zbog poveznice da se fotonaponski paneli sve više koriste, a količina otpada raste cilj je reciklirati fotonaponske panele kako bi se omogućila ponovna uporaba recikličnih materijala, stvarale manje količine na odlagalištima i više se koristili obnovljivi izvori energije u kućanstvima za proizvodnju električne energije. Od velike je važnosti napraviti fotonaponski panel koji će se moći što jednostavnije reciklirati, a upravo su proizvođači fotonaponskih panela najviše zaduženi za to. Razlog tomu je odabir vrste materijala jer sa što većim brojem materijala koji se mogu reciklirati fotonaponski panel postaje jednostavniji za reciklirati. Trenutno su troškovi za električnu energiju izrazito narasli, a sukladno time počela je veća proizvodnja elektrana za kuću u Europskoj uniji. Upravo to je dovelo do razmišljanja o budućnosti i količinama otpada koje se očekuju, a s time se pokušava pronaći najbolje rješenje za recikliranje fotonaponskih sustava.

## 1.1. Zadatak završnog rada

U završnom radu ukratko će se opisati fotonaponska tehnologija (povijesni razvoj, fizikalne osnove i karakteristike fotonaponske ćelije te podjela fotonaponskih sustava), također će se ukratko ukazati na probleme gomilanja zaliha fotonaponskih sustava u svijetu, ali s druge strane i na količine materijala koji se mogu ponovno iskoristiti nakon recikliranja. U glavnom središnjem dijelu razrade prije odrađene analize i vrednovanja recikličnosti na primjeru fotonaponskog panela potrebno je definirati pojam recikličnosti. U završnom dijelu prije zaključka biti će prikazana zakonska regulativa, kao i dostupne tehnologije recikliranja fotonaponskih panela.

## **2. FOTONAPONSKA TEHNOLOGIJA**

Proces fotonaponske pretvorbe ne bi bio moguć bez sunca, kao ni život na zemlji. Sunce je zvijezda u centru Sunčevog sustava, a energija koju emitira Sunce prema Zemlji, kao i prema svemiru, posljedica je procesa nuklearne fuzije koji se odvija u jezgri Sunca. S obzirom da je energija koja dopire do Zemljine površine puno veća nego što je potrebno čovječanstvu, smatra se obnovljivim izvorom energije. Problem predstavlja neiskorištavanje punog potencijala koje Sunce pruža jer sunčevo zračenje ima jako mali udio u energetske iskorištavanjima [1].

Sunčeva energija se najviše upotrebljava za dobivanje toplinske energije, a udio izravnog pretvaranja u električnu energiju je značajno manji. Razlog tomu je veća učinkovitost pri pretvorbi za dobivanje toplinske energije, nego što je u slučaju sa električnom energijom. U zadnjih nekoliko godina zbog enormnih poticaja od strane Europske unije te velikog i brzog napredka tehnologije fotonaponski sustavi se sve više ugrađuju.

Solarne termoelektre imaju određeni broj koraka pri pretvorbi sunčeve energije u električnu. Prvo se sunčeva energija pretvara u toplinsku, zatim se toplinska pretvara u mehaničku i zatim se mehanička energija pretvara u električnu. Prednost fotonaponskih ćelija (elektrana) je što sunčevu energiju pretvaraju direktno u električnu te samim time imaju veću učinkovitost nego što je u slučaju sa klasičnim solarnim termoelektrenama [1].

### **2.1. Povijesni razvoj fotonaponske ćelije**

Jedan od prvih znanstvenika, odnosno u ovom slučaju fizičara koji je prepoznao fotonaponski učinak bio je Alexandre-Edmond Becquerel 1839. godine. A.E. Becquerel u eksperimentu sa elektrodama u otopini elektrolita primjetio je fotonaponski efekt. Prilikom eksperimenta A.E. Becquerel primjetio je fotonaponski efekt kada se „stvorio“ napon za vrijeme dok su elektrode bile izložene svjetlu [2].

Nekoliko godina nakon prve pojave fotonaponskog efekta, godine 1870. Hertz je uspješno ostvario pretvorbu svijetla u elektricitet efikasnosti koji je iznosio oko 1% za vrijeme proučavanja selena (Se).

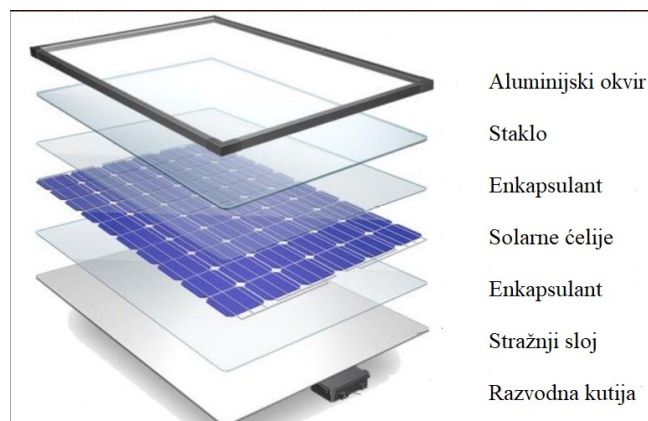
Prva FN ćelija dizajnirana je od strane Charlesa Frittsa 1883. godine sa učinkovitošću kao što je imala i Hertzova (oko 1%). Koristio je selen s tankim slojem zlata kao poluvodič, ali problem je predstavljala visoka cijena, pa se iz tog razloga prva FN nije koristila za proizvodnju električne energije, no korištena je u druge svrhe [2].

Trinaest godina nakon prve pretvorbe krenula su otkrića i napredak fotonaponskih ćelija. Razni veliki i poznati znanstvenici kao što su C. Fritts, E. Weston, N. Tesla i A. Einstein pridonijeli su razvoju i napretku fotonaponske tehnologije.

Kao što je ranije navedeno, najveći problem ove tehnologije predstavlja visoka cijena proizvodnje. Razvojem proizvodnje čistog silicija počinje rast ove vrste tehnologije. U početku su se fotonaponske ćelije koristile za opskrbu električne energije satelita koji su kružili Zemljinom orbitom te su se pokazali kao kvalitetna i pouzdana tehnologija. Nakon što se kvaliteta proizvodnje poboljšala i unatoč nadolazećoj naftnoj krizi koja pomaže u smanjenju troškova sedamdesetih godina 20. stoljeća dolazi do velikog napretka i fotonaponske ćelije počinju napajati baterije za svjetionike, telekomunikacijsku opremu, kao i ostalu opremu koja je ovisila o električnoj energiji. Nakon toga, fotonaponske ćelije su se počele koristiti u uređajima kao što su: kalkulatori, radio uređaji, satovi, lampe i sličnim uređajima. Sam kraj ovog perioda obuhvaća izgradnju ove vrste tehnologije u mjestima gdje nije izgrađena električna mreža i u početku su se počeli koristiti na krovovima farmi, a danas se sve više upotrebljavaju u kućanstvima. [3]

## 2.2. Fotonaponska ćelija

Poluvodički element pomoću kojeg se izvodi izravna pretvorba svjetlosti u električnu energiju naziva se fotonaponska ćelija. Slikom 2.1. prikazani su dijelovi fotonaponske ćelije.

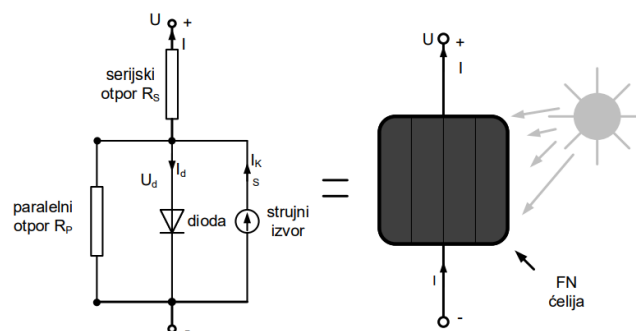


Slika 2.1: Dijelovi fotonaponske ćelije

Dijelovi fotonaponske ćelije su: aluminijski okvir, staklo, enkapsulant, solarne ćelije, stražnji sloj i razvodna kutija.

### 2.2.1. Karakteristike fotonaponske ćelije

Metalni kontakti imaju primarni zadatak prikupljati struju induciranu fotonima na ćelijama te su postavljeni s obje strane ploče. Preko tamne (donje) površine i na bridu svjetle (gornje) površine omogućen je kontakt. Ostatom gornje površine tanka vodljiva očica skuplja struju i propušta prolaz svjetla. Kako bi se smanjila refleksija koristi se prednje lice ćelije koja sadrži antirefleksirajuću oplatu. Kao mehanička zaštita koristi se zaštitno staklo s prozirnim ljepljivom. Slikom 2.2. prikazana je nadomjesna shema fotonaponske ćelije [1].



Slika 2.2: Nadomjesna shema fotonaponske ćelije [1]

Struja prikazane fotonaponske ćelije definira se sljedećim izrazom [1]:

$$I = I_{fs} - I_d - I_p = I_{fs} - I_0 \times \left[ e^{\frac{e(U+IR_s)}{m k T}} - 1 \right] - \frac{U}{R_p} \quad (2-1)$$

Kad bi se zanemario serijski i paralelni otpor tada izraz izgleda [1]:

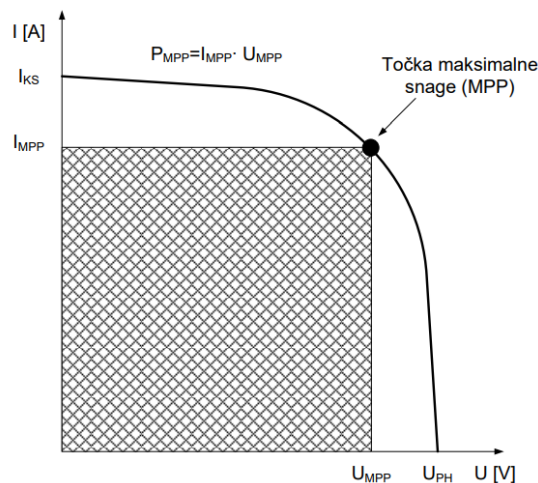
$$I = I_{fs} - I_0 \times \left[ e^{\frac{e(U+IR_s)}{m k T}} - 1 \right] \quad (2-2)$$

Gdje:

- $I$  predstavlja struju sklopa
- $I_{fs}$  predstavlja fotostruju
- $I_d$  predstavlja struju diode
- $I_p$  predstavlja struju kroz paralelni otpor
- $U$  predstavlja napon
- $R_p$  predstavlja paralelni otpor ćelije
- $I_0$  predstavlja struju zasićenja

- $e$  predstavlja elementarni naboj koji iznosi  $e = 1,602176462 \cdot 10^{-19}$  As
- $R_s$  predstavlja serijski otpor ćelije
- $m$  predstavlja parametar ćelije
- $k$  predstavlja Boltzmanovu konstantu koja iznosi  $k = 1,3806 \cdot 10^{-23}$  J/K
- $T$  predstavlja temperaturu

Slikom 2.3. prikazana je strujno-naponska karakteristika fotonaponske ćelije.



Slika 2.3: I-U karakteristika FN ćelije [1]

Na slici su uočljive tri karakteristične točke:

- točka  $I_{KS}$  – predstavlja kratki spoj, odnosno definira kada su stezaljke kratko spojene. Struja je u ovom slučaju jednaka fotostruji, odnosno  $I_{KS} = I_{fs}$ , a napon je tada 0 V.
- točka  $U_{PH}$  – predstavlja napon praznog hoda, odnosno definira kada su stezaljke otvorene
- točka  $P_{MMP}$  – predstavlja točku maksimalne snage

Stupanj korisnog djelovanja, odnosno učinkovitost FN ćelije predstavlja omjer između električne snage koju ćelija može ostvariti i snage sunčevog zračenja koja djeluje na njezinu površinu, a izraz je sljedeći [1]:

$$\eta_{FNC} = \frac{P_{MMP}}{A_{FNC} \times G} \times 100 = F \times \frac{U_{PH} \times J_{KS}}{G} \times 100 \quad (2-3)$$

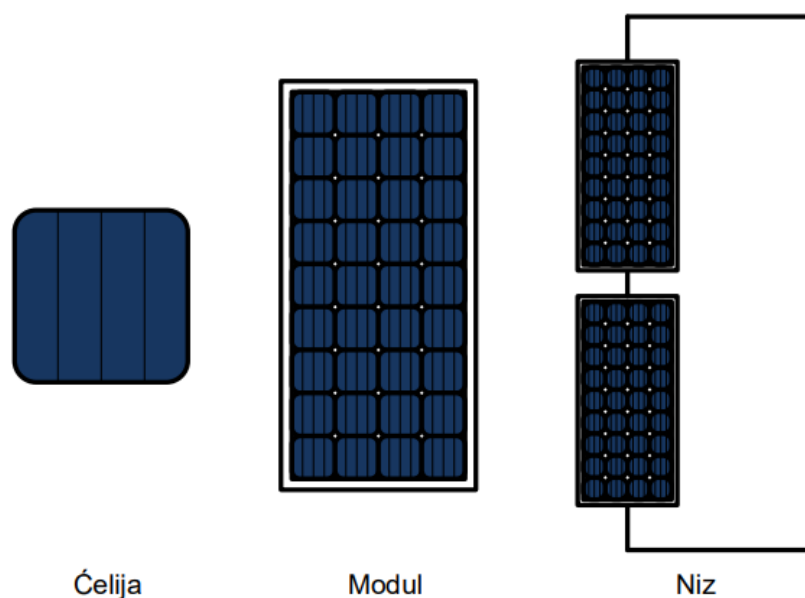


Gdje je:

- $A$ : površina fotonaponske ćelije [ $\text{m}^2$ ]
- $G$ : snaga sunčevog zračenja [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]
- $J_{KS}$ : gustoća struje KS [ $\text{A}/\text{m}^2$ ]

Važno je napomenuti i faktor ispunje koji predstavlja omjer maksimalne snage i umnoška struje KS i napona PH fotonaponske ćelije. Faktor ispunje određuje kvalitetu FN ćelije, a kreće se u rasponu od 0,7 do 0,9.

S obzirom da je iznos napona koju jedna ćelija proizvodi je oko 0,5 V gotovo da se nikad ne koristi samo jedna ćelija. Iz tog razloga koristi se fotonaponski modul koji u sebi sadrži više spojenih ćelija u kućište koje je otporno na vremenske prilike. Klasični fotonaponski modul sastoji se od 60 ćelija što znači da mu je izlazni napon oko 30 V. Kako bi se dobio veći iznos napona, to jest veća struja, moduli se spajaju u seriju ili paralelu i onda više fotonaponskih modula čine fotonaponski niz. Ukoliko je cilj postizanje većeg izlaznog napona moduli se spajaju u seriju, a u slučaju povećanja vrijednosti struje spajaju se u paralelu. Nizovi se sastoje od više modula spojenih u seriju. Slikom 2.4 prikazani su ćelija, modul i niz [1].



Slika 2.4: Prikaz dobivanja fotonaponskog niza [1]

### 2.2.2. Fizikalne osnove

Jedan od najvažnijih materijala za izradu fotonaponskih ćelija su kristali koji predstavljaju čvrsta tijela te se sastoje od atoma, iona ili molekula gdje se njihov trodimenzionalni raspored ponavlja s ravnomjerno međusobnom udaljenostima i tvori kristalnu rešetku. Fotonaponske ćelije se uglavnom proizvode od Si-ćelija (Silicij). Struktura kristala utječe na električna, toplinska, magnetska i mehanička svojstva kristala. Pri izradi fotonaponskih ćelija razlikuju se [4]:

- monokristali: obujam ćelije sastoji se od samo jednog kristala
- polikristali: u procesu rasta većih kristala formira se više kristala i reže se pločica za izradu FN ćelije
- amorfne tvari

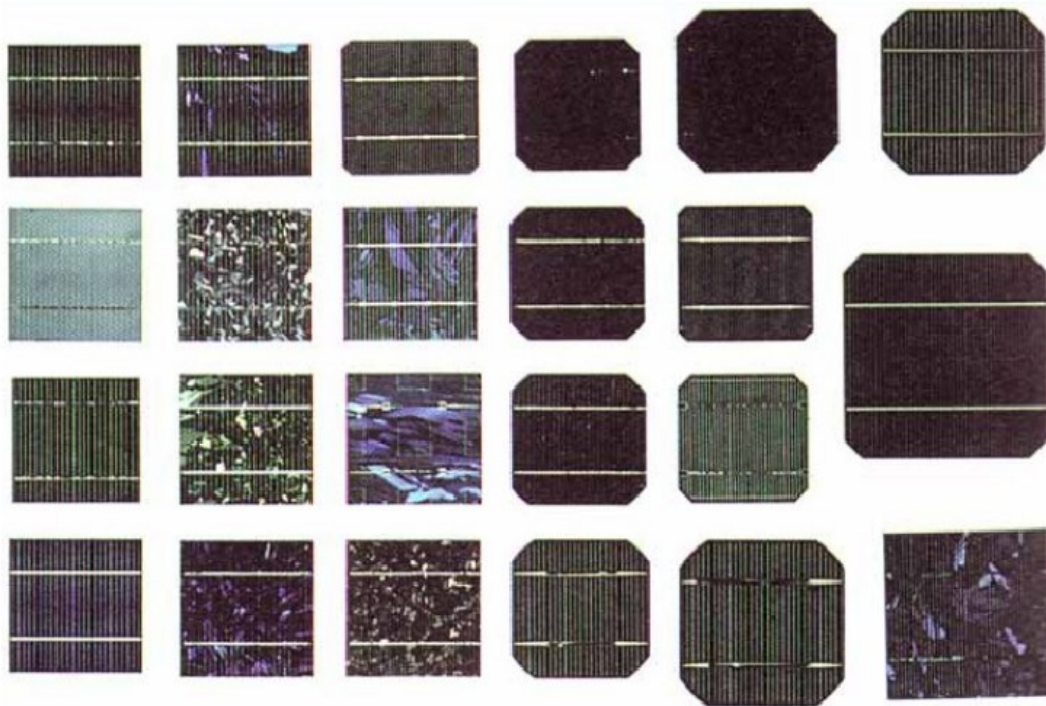
Tablicom 2.1 prikazani su parametri (napon, gustoća struje  $J_{KS}$  i učinkovitost) ranije navedenih fotonaponskih ćelija.

Tablica 2.1: Parametri fotonaponskih ćelija [4]

VRSTA ĆELIJE	$U$ [V]	$J_{KS}$ [mA/cm <sup>2</sup> ]	$\eta$
Monokristalna	0,65	30	0,17
Polikristalna	0,6	26	0,15
Amorfna	0,85	15	0,09

Iz tablice 2.1. vidljivo je kako najveću učinkovitost ima monokristalna-Si ćelija, dok najmanju ima amorfna-Si ćelija iz razloga što učinkovitost raste sa povećavanjem napona i gustoće struje kratkog spoja.

Osnovni materijal koji se koristi za izradu fotonaponskih ćelija je silicij, te ima veliku dominaciju, odnosno čak 98% proizvedenih fotonaponskih ćelija koristi silicij. Najčešća tehnologija proizvodnje monokristalnog silicija je „Czohralski postupak“ ili tehnologija lebdeće zone. S obzirom da je proizvodnja monokristalnog silicija skuplja, očekuje se da ima najveću učinkovitost. Najveći nedostatak predstavlja velika debljina aktivnog sloja što znači da se sunčevo zračenje ne iskorištava u najvećoj mogućoj mjeri. U današnje vrijeme mogu se pronaći razne silicijeve fotonaponske ćelije sa različitim dimenzijama i bojama. Dimenzije su predstavljene u cm, a najčešće su: 21x21, 15x15, 12.5x12.5, 10x10. Slikom 2.5 prikazane su kristalne ćelije različitih dimenzija i boja [4].



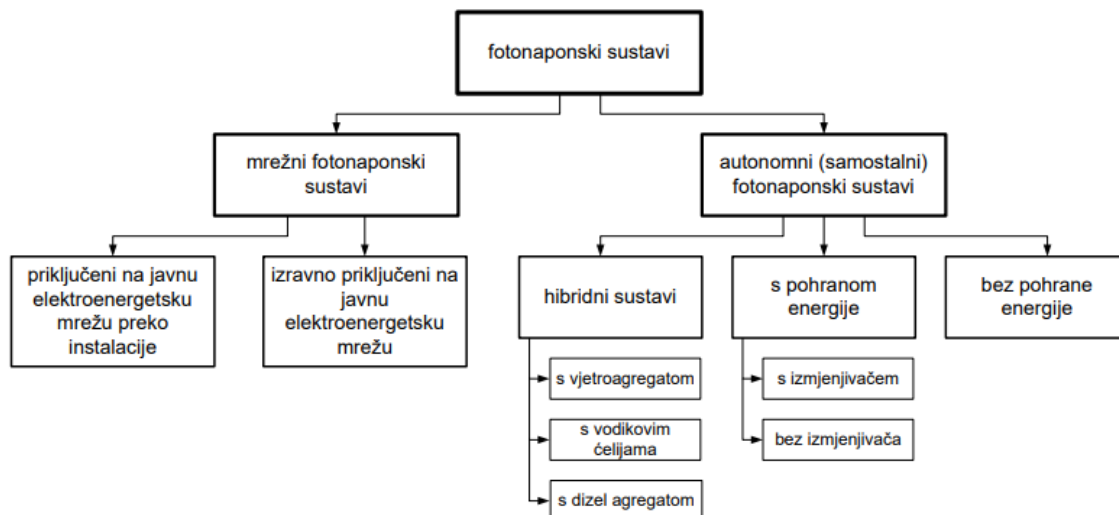
Slika 2.5: Kristalne ćelije različitih dimenzija i boja [4]

Kako bi se smanjila cijena fotonaponskih ćelija, potrebno je koristiti i upotrebljavati jeftinije materijale, a s time i pojednostaviti izradu istih. U zadnje vrijeme došlo je do usavršavanja izuzetno visoke učinkovitosti koncentrirajuće solarne ćelije. Ugrađuju se u fotonaponske sustave koji imaju mogućnost pratiti kretanje Sunca. Stupanj djelovanja ćelija iznosi 35%, dok stupanj modula iznosi oko 25% [4].

### 2.3. Podjela fotonaponskih sustava

Nakon što se završila naftna kriza sedamdesetih godina prošlog stoljeća, uloženi su veliki naponi u napredak sustava fotonaponskih ćelija za komercijalnu uporabu u kućanstvima. Za to vrijeme razvijeni su samostalni sustavi (off-grid) i sustavi spojeni na mrežu (on-grid). Pojam fotonaponska elektrana podrazumijeva svu opremu, uređaje i jedinice koje čini fotonaponsku instalaciju koja je nužna za rad.

Samostalni fotonaponski sustavi, odnosno oni sustavi koji nisu priključeni na mrežu mogu biti s pohranom energije i bez pohrane energije, a to ovisi o načinu potrošnje energije i vrsti primjene. Slikom 2.6. prikazana je podjela FN sustava.



Slika 2.6: Podjela fotonaponskih sustava [1]

Sustavi koji pripadaju u grupu s pohranom energije su sa i bez izmjenjivača. Također samostalni FN sustavi mogu biti i hibridni sustavi koji se dijela na s: vjetroagregatom, s vodikovim ćelijama ili s dizel agregatom. Sustavi koji su spojeni na mrežu razlikuju se kao izravno priključeni na javnu elektroenergetsku mrežu preko kućne instalacije ili izravno priključeni na javnu elektroenergetsku mrežu [1].

### **3. PROBLEMI ODRŽIVOSTI FOTONAPONSKIH SUSTAVA**

Kao što svi proizvodi imaju svoj određeni rok trajanja, tako imaju i fotonaponski sustavi. U prosjeku životni ciklus traje 25 godina. Trenutno su fotonaponski sustavi i dalje relativno mladi, jer je njihova ekspanzija u kućanstvima u cijelom svijetu tek počela rasti, što za posljedicu ima porast količine EE otpada. Danas su to još malo količine, no u skorije vrijeme kada završi životni ciklus fotonaponskih panela biti će potrebno pronaći adekvatna postrojenja za recikliranja. S obzirom da su fotonaponski sustavi tek nedavno u nešto većim količinama (u zadnjih 20 – 25 godina) instalirani u kućanstvima nastaje problem gomilanja zaliha fotonaponskih sustava, ali s druge potrebno je ukazati na količinu materijala koja se može ponovno iskoristiti nakon recikliranja.

#### **3.1. Problemi gomilanja zaliha**

Nakon godina korištenja fotonaponskih panela, oni se moraju promijeniti, a stare ploče odbaciti. Problem nastaje u velikim količinama nastajanja otpada, pa je iz tog razloga potrebno razviti postrojenja za reciklažu. U Njemačkoj već sad postoje postrojenja koja imaju mogućnost recikliranja fotonaponskih panela [5].

S porastom i napretkom fotonaponskih panela rasti će i poboljšati se tehnologija i procesi za učinkovito recikliranje ove vrste opasnog otpada. Prve značajne količine instaliranih fotonaponskih panela se sada odbacuju. Prolazeći tehnološku evoluciju, fotonaponske panele je moguće klasificirati u tri generacije. Prva generacija obuhvaća monokristalne ili polikristalne silicijeve ploče koje je moguće razlikovati po stupnju čistoće, a posljedično tome i u učinkovitosti pretvorbe električne energije. Druga generacija predstavlja slaganje tankih filmova nanesenih na određenu podlogu (staklo, nehrađajuće podloge i slično) s jednim ili više slojeva. Koriste se različiti materijali za obradu tankog filma kao što su: amorfni silicij, kadmij telurid ili bakar indij galij selenid. Najnovija, treća generacija, uključuje nove tehnologije koje obuhvaćaju: fotonaponske koncentratore, fotonaponske ćelije osjetljive na boje, organske ćelije i hibridne ćelije [6].

### 3.2. Ponovna uporaba materijala

Kao što je ranije navedeno u prethodnom poglavlju, u Njemačkoj postoje postrojenja koja imaju mogućnost recikliranja fotonaponskih panela, a ta postrojenja nakon recikliranja mogu ponovno upotrebljavati od 85% do 90% materijala. Za ovako veliku učinkovitost ponovnog korištenja nakon recikliranja potrebni su razni kemijski i termički procesi i obrade koji će odvajati svaki metal i komponentu na kvalitetan i siguran način kako se ne bi stvarao opasan otpad koji zagađuje okoliš. U pogledu materijala od kojih je sačinjen, fotonaponski panel sadrži materijale kao što su: staklo, aluminijski okvir, fotonaponsku ćeliju, razvodnu kutiju, zaštitnu foliju i montažne vijke. Tablicom 3.1 prikazani su materijali jednog tipa fotonaponskog panela i njihova masa izražena u gramima [6].

Tablica 3.1: Masa materijala slučajno odabranog fotonaponskog panela [6]

Materijali	Masa (g)
Aluminij	1370
Silicij	226
Bakar	78
Kadmij	0,407
Teludij	0,406
Cink	0,4
Molibden	0,295
Kositar	0,12
Galij	0,119
Selenij	0,119
Indij	0,119
Staklo	6915
Polimer	1172

Iz tablice se može vidjeti da se fotonaponski panel sastoji najvećom masom od stakla, aluminija, polimera, a u manjoj mjeri su pristuni silicij i bakar. Svi ostali navedeni elementi su izrazito malo korišteni.

### **3.3. Zakonska regulativa EE otpada u RH**

Prema Pravilniku o gospodarenju otpadom električnom i elektroničkom otpadom (NN 42/2014-782, 2014. godina) kako bi se osigurala zaštita okoliša i ljudi, potrebno je propisati određenu zakonsku regulativu vezanu za gospodarenje otpada električne i elektroničke opreme. Od velike je važnosti smanjiti štetne učinke od EE otpada jer će imati velik utjecaj u budućnosti. Svi proizvodi zajedno sa sastavnim dijelovima koji primarno ovise o električnoj energiji ili elektromagnetskom polju koji za svoje svrhe i namjene za korištenje ne prelaze napon veći od 1000 V za izmjeničnu i 1500 V za istosmjernu struju predstavljaju EE opremu. EE oprema iz kućanstva podrazumijeva EE opremu koja se koristi u komercijalne, industrijske i ostale djelatnosti. EE otpad podrazumijeva EE opremu koja spada u otpad uključujući sve komponente i materijale određenog proizvoda. Recikliranje EE otpada podrazumijeva svaki postupak kojim se materijali iz EE otpada ponovo koriste u novim proizvodima i materijalima, osim ako je ta svrha uporaba u energetske svrhe [7].

Svu opremu koju proizvođač stavlja na tržište mora osigurati da na EE opremi bude jasna i neizbrisiva oznaka o obaveznom odvojenom sakupljanju EE otpada. Ukoliko proizvođač prvi put stavlja novu vrstu EE oprema na tržište, dužan je najkasnije u roku od godine dana o vlastitom trošku osigurati sve potrebne informacije za ponovnu uporabu i obradu EE otpada. Serviseri su dužni u potpunosti besplatno od krajnjeg korisnika preuzeti EE opremu za koju je sigurno da popravak nije moguć ili je komercijalno neisplativ. Proizvođači, obrađivači i sakupljači dužni su se upisati i konstantno dostavljati podatke u „Registar gospodarenja posebnim kategorijama otpada“ [7].

Proizvođač EE opreme ima dužnost snositi sve troškove gospodarenja EE otpadom. Posjednik EE otpada dužan je odvajati EE otpad od komunalnog otpada i ostalih vrsta otpada te ga predati u cijelosti bez da je prethodno rastavljan. Sakupljač preuzima od posjednika EE otpad i predaje ga obrađivaču u stanju u kakvom ga je dobio. Zatim obrađivač ima dužnost preuzeti sav EE otpad od sakupljača uz ovjeru pratećeg lista sakupljača i bez naplate te ga u skladu s pravilnikom obraditi u potpunosti [7].

Prema Zakonu u gospodarenju otpadom (NN 84/2021, 2021. godina) godišnja stopa EE otpada mora iznositi najmanje 65% prosječne mase i elektroničke opreme stavljene na tržište u prethodne tri godine ili 85% EE otpada proizvedenog na teritoriju Republike Hrvatske, a ciljevi vezani za EE otpad su sljedeći [8]:

- postupkom uporabe mora se obraditi najmanje 85% ili postupkom pripreme za ponovnu uporabu i postupkom recikliranja najmanje 80% mase sakupljene velike opreme s dimenzijama većim od 50 cm ili opreme za izmjenu topline
- postupkom uporabe mora se obraditi najmanje 80% ili postupkom pripreme za ponovnu uporabu i postupkom recikliranja najmanje 70% mase sakupljenih monitora, zaslona i opreme čija je površina zaslona veća od 100 cm<sup>2</sup>
- postupkom uporabe mora se obraditi najmanje 75% ili postupkom pripreme za ponovnu uporabu i postupkom recikliranja najmanje 55% mase male informatičke opreme i opreme za telekomunikacije, kao i ostale male sakupljene opreme čije vanjske dimenzije nisu veće od 50 cm
- godišnje je potrebno obraditi najmanje 80% mase sakupljenih žarulja postupkom recikliranja



## **4. ANALIZA I VREDNOVANJE RECIKLIČNOSTI FOTONAPONSKOG PANELA**

Prije provedbe praktičnog dijela analize i vrednovanja recikličnosti, potrebno je definirati osnovne pojmove koji će se koristiti u praktičnom dijelu rada.

Recikličnost označava prikladnost proizvoda ili materijala odvajanju iz otpada i vraćanju u uporabu kao funkcionalno ispravnog dijela ili kao sirovine za ponovno dobivanje materijala. Osim prethodno navedene definicije, recikličnost se može definirati kao prerada dotrajalog proizvoda u sirovinu za dobivanje novog materijala koristeći određene postupke. Pod pojmom recikličnosti podrazumijeva se prikladnost dotrajalog proizvoda materijalnom iskorištenju. Proizvod u ovom smislu označava sklop sastavljen od više dijelova [9].

Ponovna uporaba proizvoda se definira kao uporaba rabljenog proizvoda ili njegovih dijelova za istu (prvobitnu) namjenu. Obnavljanje proizvoda podrazumijeva postupak kojim se dotrajali proizvod industrijskim postupkom prerađuje u novo stanje proizvoda. Materijalno korištenje dotrajalog proizvoda, gdje se isti koristi kao sirovina naziva ponovna uporaba materijala [10].

### **4.1. Postupak recikliranja**

Recikliranje se kao tehnološki postupak može podijeliti na nekoliko operacija [10]:

- prikupljanje dotrajalih i/ili odbačenih proizvoda
- rastavljanje
- razvrstavanje komponenti / materijala
- skladištenje
- transport
- prerada kojom se dobiva upotrebljivi materijal

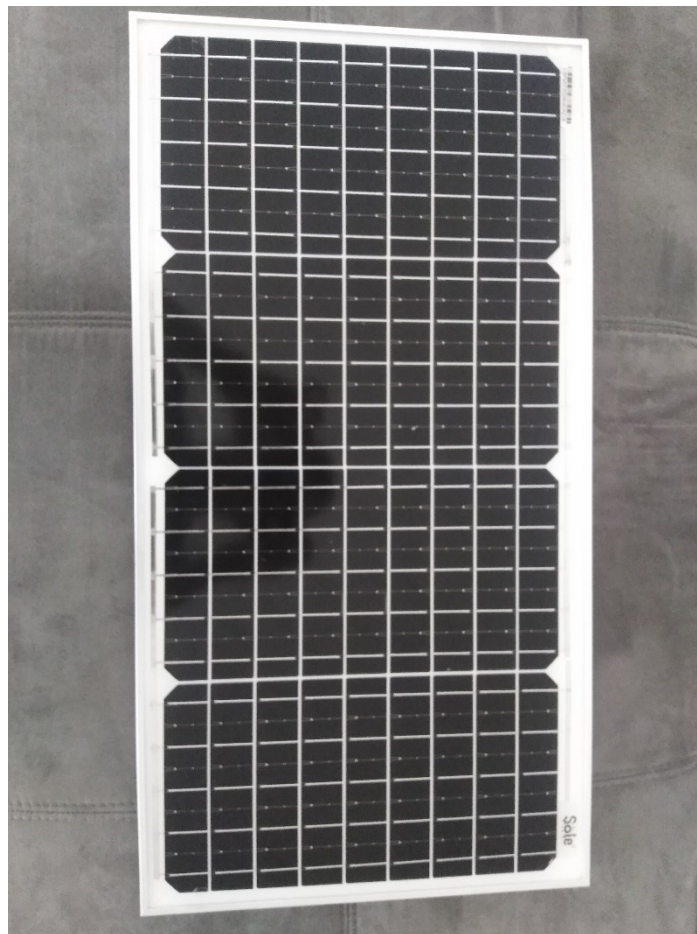
Prije postupka recikliranja potrebno je prvo prikupiti dotrajale, odnosno odbačene proizvode koji imaju mogućnost recikliranja i ponovne upotrebe u ovom slučaju u istu ili različitu svrhu, sa mogućnošću prethodne dorade.

Rastavljanje može biti djelomično ili cjelovito, a pod pojmom rastavljanja podrazumijeva se razdvajanje proizvoda na ugradbene elemente koji su sastavljeni od dijelova, sklopova i bezobličnih tvari. Rastavljanje postaje sve važniji dio recikliranja jer zahtjeva puno rada, što znači i veće troškove. Cilj je automatizirati rastavljanje kako bi se smanjili visoki troškovi ljudskog rada, ali i opasnosti po čovjeka od dodira s opasnim tvarima.

Nakon rastavljanja potrebno je razvrstati komponente po vrsti materijala. Zatim se te komponente skladište i spremne su za transport do mjesta gdje će se preradom dobiti upotrebljivi materijal za ponovno korištenje.

## 4.2. Rastavljanje fotonaponskog panela

Nakon što se prikupio potrebni dotrajali proizvod za recikliranje slijedi postupak rastavljanja. Proizvod koji će se rastavljati, odnosno reciklirati je fotonaponski panel proizvođača SOLE modela MODULE SL30 AA te je prikazan na slikama (4.1. i 4.2.).



Slika 4.1: Prednja strana fotonaponskog panela



Slika 4.2: Zadnja strana fotonaponskog panela

Sljedećom tablicom prikazane su tehničke karakteristike fotonaponskog panela za recikliranje.

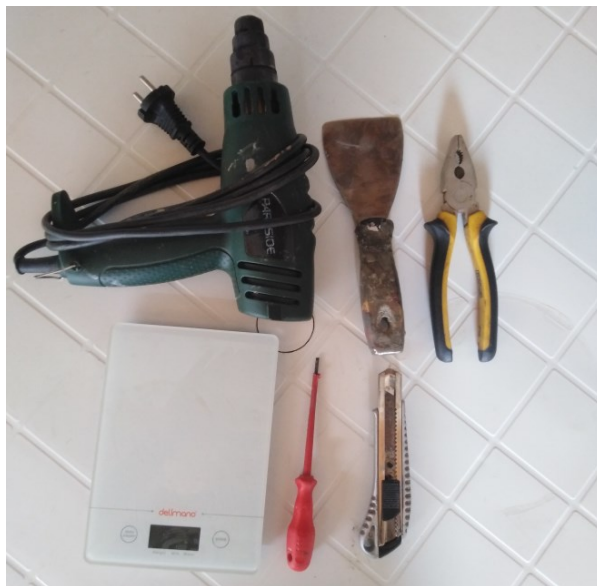
Tablica 4.1: Karakteristike fotonaponskog panela

Model	Module SL 30AA 36
Napon	22,6 V
Struja kratkog spoja	1,8 A
Napon pri maksimalnoj snazi	18,4 V
Struja pri maksimalnoj snazi	1,64 A
Maksimalni napon cjelokupnog sustava	1000 V

Razlog zašto se ovaj fotonaponski panel smatra odbačenim i neispravnim proizvodom spremnim za recikliranje je što su se solarne ćelije unutar fotonaponskog panela razbile i usitnile. Razlog tomu je pogreška proizvođača pri postupku lemljenja.

Pri rastavljanju fotonaponskog panela važno je odvojiti sve moguće elemente i dijelove pomoću određenih alata kako bi se moglo bilježiti vrijeme rastavljanja u tablicu i operacije koje su bile potrebne za rastavljanje. Potrebni alati za rastavljanje fotonaponskog panela su sljedeći:

- Kliješta
- Odvijač
- Skalpel
- Fen za vrući zrak
- Metalna špahtla



Slika 4.3: Korišteni alati za vrijeme recikliranja fotonaponskog panela

Fen za vrući zrak koristio se iz razloga što su gotove sve komponente bile čvrsto zalijepljene te se nisu mogle ručno odvajati, a uz pomoć fena za vrući zrak, skalpela i ručnog povlačenja uz malo duže vrijeme skidanja uspješno su odvojene komponente te su spremne za analizu recikličnosti.



Slika 4.4: Elementi nakon rastavljanja

Fotonaponski panel rastavljen je na sljedeće komponente: stakleni pokrov, antirefleksni sloj + P i N sloj, aluminij, metalne žice, razvodna kutija, vijci te plastična folija.

Tablicom 4.2. prikazano je vrijeme rastavljanja i postupci koji su se provodili za vrijeme operacije rastavljanja fotonaponskog panela.

Tablica 4.2.: Vrijeme rastavljanja

		<b>VRIJEME RASTAVLJANJA</b>		
	Naziv proizvoda: Fotonaponski panel			Datum:20.8.2022.
Redni broj	Naziv operacije	Vrijeme odvajanja	Kumulativno vrijeme odvajanja	Alat
		Sek	Sek	
i		$t_i$		
1	2	3	4	5
1	Odvajanje aluminija	87.13	87.13	Kliješta
2	Odvajanje razvodne kutije	31.14	118.27	Odvijač
3	Odvijanje vijaka od razvodne kutije	44.58	162.85	Odvijač
4	Čupanje metalne žice	204.04	366.89	Kliješta
5	Skidanje zaštitne folije	359.66	726.55	Skalpel + ručno
6	Skidanje antirefleksnog te P i N sloja	2880.31	3606.86	Fen za vrući zrak + metalna špahtla

Najviše vremena utrošeno je na skidanje antirefleksnog te P i N sloja sa fotonaponskog panela koje ne bi bilo moguće bez fena za vrući zrak. Iz slike se može očitati kako ukupno vrijeme trajanja rastavljanja iznosi 3606.86 sekundi što na kraju iznosi nešto više od jednog sata, a razlog dugotrajnom rastavljanju je ne dovoljno dobar alat za recikliranje fotonaponskog panela. Rastavljanje ovdje završava iz razloga što je zadnji korak kemijski postupak odvajanja metalnog dijela od antirefleksnog te P i N sloja.

### 4.3. Analiza recikličnosti

Postoje razne metode vrednovanja recikličnosti proizvoda kao što su [10]:

- metoda VRDC
- metoda prema DEEDS
- metoda prema Onuki

Od navedenih metoda niti jedna još službeno u svijetu nije opće prihvaćena.

Kako bi se dobila ocjena recikličnosti proizvoda, potrebno je analizirati sastavne elemente, a nakon toga obradom tih podataka dobiva se pokazatelj recikličnosti proizvoda koji se računa prema sljedećoj formuli [10]:

$$R = \sum_{i=1}^n b_i \times m_i \times r_i \times \frac{1}{M \times r_{max}} \quad (4-1)$$

Gdje je:

- $R$  - recikličnost proizvoda
- $b_i$  - broj ponavljanja u proizvodu
- $m_i$  - masa [kg]
- $r_i$  - ocjena recikličnosti i-tog dijela
- $r_{max}$  - najveća ocjena recikličnosti (najviše 5)
- $M$  - ukupna masa [kg]

Određivanje recikličnosti ovisi o sljedećim faktorima [10]:

- strukturi proizvoda
- sastavu materijala
- vrstama spojeva i veza

Recikličnost proizvoda temelji se na analizi dotrajalog proizvoda, određivanju elementarnih pokazatelja i izračunavanju složenih pokazatelja. Recikličnost proizvoda se iskazuje preko odnosa sume recikličnosti pojedinačnih dijelova i idealne (maksimalne) recikličnosti.

Određivanje recikličnosti proizvoda temeljeno je vrednovanju recikličnosti elemenata, a ocjene za vrednovanje recikličnosti su sljedeće [10]:

- 0,75 – 1 – povoljna recikličnost
- 0,5 – 0,74 – potrebna rekonstrukcija proizvoda ili selektivno rastavljanje
- < 0,5 – niža kvaliteta reciklata

Svaki materijal ima različitu ocjenu recikličnosti, a ocjene su od 1 do 5 te su prikazani idućom slikom.

Kako bi se dobila ocjena recikličnosti proizvoda potrebno je odrediti ocjene recikličnosti materijala koje su prikazane tablicom 4.3.

Tablica 4.3. Ocjena recikličnosti materijala [10]

OCJENA	OPIS MJERILA
0	dio ili sklop koji sadrži opasne tvari, zahtjeva posebno postupanje
1	materijal s nepoznatom tehnologijom reciklaže
2	organski materijal, može se koristiti kao izvor energije, ali se ne može reciklirati
3	materijal je tehnološki moguće reciklirati, ali to zahtjeva dodatnu obradu, te razvoj postojećih procesa i materijala
4	materijal se tehnološki može reciklirati, ali oprema nije dostupna
5	materijal je recikličan, postupak recikliranja poznat i uspješno se primjenjuje
/	PRIMJERI
0	tiskane pločice, katodne cijevi, kondenzatori (PCB), baterije, negoriva plastika, živin prekidač, dijelovi koji sadrže azbestna vlakna, živu (prekidači, žarulje), selen, LCD, itd.
1	duroplasti, viskeri, nerazvrstani usitnjeni otpad, kompoziti
2	polimeri nepoznate vrste, materijali na bazi celuloze (energetski iskoristivo)
3	željezo-bakar pomiješani, elektromotori, mješavina polimera
4	kabeli i izolirani vodiči, željezo + keramika, metal + plastika
5	željezo, bakar, aluminij i slitine, polimeri poznate vrste

Za analizu recikličnosti potrebno je upisati sve rastavljene elemente, njihovu vrstu, od koje vrste materijala su sastavljeni, stupanj recikličnosti, masu elemenata te ocjenu recikličnosti elemenata, a zatim izračunati prema prethodnoj formuli za analizu recikličnosti. Postupak provedene analize i izračunavanje potencijala recikličnosti prikazani su tablicom 4.4.



Tablica 4.4.: Analiza recikličnosti

	<b>Naziv proizvoda:</b>	Fotonaponski panel			<b>Masa:</b>	2700 g		
	<b>Proizvođač:</b>	SOLE			<b>Uzrok dotrajanja:</b>	Razbijene i usitnjene fotonaponske ćelije		
	<b>God. proizvodnje</b>	Nepoznato			<b>Datum obrade:</b>	20.8.2022.		
Redni broj	Naziv elementa	Vrsta elementa (SE, PE, SK)	Vrsta materijala	Masa elementa	Komada po proizvodu	Štupanj recikličnosti	Masa elemenata (5x6)	Recikličnost elementa (8x9)
				g/kom	kom	0...5	Grams	
<i>l</i>			<i>vm<sub>i</sub></i>	<i>m<sub>i</sub></i>	<i>b<sub>i</sub></i>	<i>r<sub>i</sub></i>	<i>m<sub>i</sub> · b<sub>i</sub></i>	<i>m<sub>i</sub> · b<sub>i</sub> · r<sub>i</sub></i>
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>
1	Aluminij	SE	Al	141,0	1	5	141,0	705,0
2	Vijak 0.5 x 1.8	SE	Fe	0,5	4	5	2,0	10,0
3	Razvodna kutija	PE	Nepoznati polimer	35,0	1	2	35,0	70,0
4	Žica	SE	FE	22,0	1	5	22,0	110,0
5	Folija	PE	Nepoznati polimer	184,0	1	2	184,0	368,0
6	Antirefleksni sloj + P i N sloj	SK	Opasni otpad	157,0	1	0	157,0	0,0
7	Stakleni pokrov	SE	Staklo	2200,0	1	4	2200,0	8800,0
8							2741,0	10063,0
9		$R = \sum_{i=1}^n b_i \times m_i \times r_i \times \frac{1}{M \times r_{max}}$						
10								
11								

Iz tablice je vidljivo kako je recikličnost fotonaponskog panela  $R = 0,734$  što znači da ne ulazi u kategoriju povoljne recikličnosti, nego u kategoriju da je potrebna rekonstrukcija proizvoda ili selektivno rastavljanje. Najveći problem predstavlja velika količina opasnog otpada.

#### 4.4. Ekonomsko – ekološka analiza

Kako bi se dobila ekonomsko – ekološka analiza potrebno je zbrojiti ukupne troškove zbrinjavanja koji se sastoje od troškova rastavljanja, usitnjavanja, recikliranja i odlaganja prema sljedećoj formuli [10]:

$$T = T_{ra} + T_u + T_r + T_o \quad (4-2)$$

Također, potrebno je izračunati i prihode od recikliranja koji se sastoje od prihoda od prodaje reciklata, prihoda od smanjena emisije i prihoda od uštede energije prema sljedećoj formuli [10]:

$$P = P_r + P_E + P_{\Delta e} \quad (4-3)$$

Apsolutna dobit računa se prema sljedećoj formuli [10]:

$$D_a = P - T = (P_r + P_E + P_{\Delta e}) - (T_{ra} + T_u + T_r + T_o) \quad (4-4)$$

Relativna dobit računa se prema sljedećoj formuli [10]:

$$D_r = \frac{P}{T} = \frac{P_r + P_E + P_{\Delta e}}{T_{ra} + T_u + T_r + T_o} \quad (4-5)$$

Ukupni troškovi prikazani su tablicama od 4.5. do 4.9.

Tablica 4.5.: Troškovi rastavljanja

<b>TROŠKOVI RASTAVLJANJA</b>	
naziv zahvata	trajanje, s
Odvajanje aluminija	87,13
Odvajanje razvodne kutije	31,14
Odvijanje vijaka od razvodne kutije	44,58
Čupanje metalne žice	204,04
Skidanje zaštitne folije	359,66
Skidanje antirefleksnog te P i N sloja	2880,31
<b>Ukupno vrijeme, t<sub>r</sub>, h</b>	<b>1,002</b>
<b>Cijena rastavljanja, c<sub>r</sub>, €/h</b>	<b>10,00</b>
<b>Troškovi rastavljanja, T<sub>ra</sub>, €</b>	<b>10,02</b>

Tablica 4.6.: Troškovi usitnjavanja

<b>TROŠKOVI USITNJAVANJA</b>			
naziv i-te komponente	masa, kg	$c_u$ , €/kg	$T_u$ , €
Složeni materijal	0,000	0,50	0,0000
<b>Ukupna masa, <math>m_u</math>, kg</b>	<b>0,000</b>		
<b>Ukupni troškovi usitnjavanja, <math>T_u</math>, €</b>			<b>0,0000</b>

Tablica 4.7.: Troškovi recikliranja

<b>TROŠKOVI RECIKLIRANJA</b>			
naziv i-te komponente	masa, kg	$(c_r)_i$ , €/kg	$(T_r)_i$ , €
Aluminij	0,141	0,65	0,0917
Željezo	0,225	0,65	0,1463
Nepoznati polimer	0,219	0,65	0,1424
Staklo	2,200	0,65	1,4300
<b>Ukupna masa, <math>m_r</math>, kg</b>	<b>2,785</b>		
<b>Ukupni troškovi recikliranja, <math>T_r</math>, €</b>			<b>1,8103</b>

Tablica 4.8.: Troškovi odlaganja

<b>TROŠKOVI ODLAGANJA</b>			
naziv i-te komponente	masa, kg	$(c_d)_j$ , €/kg	$(T_d)_j$ , €
Opasni otpad	0,157	0,40	0,0628
<b>Ukupna masa, <math>m_d</math>, kg</b>	<b>0,157</b>		
<b>Ukupni troškovi odlaganja, <math>T_d</math>, €</b>			<b>0,0628</b>

Tablica 4.9.: Rekapitulacija troškova

<b>REKAPITULACIJA TROŠKOVA</b>	
Troškovi rastavljanja, $T_{ra}$ , €	10,0200
Ukupni troškovi recikliranja, $T_r$ , €	1,8103
Ukupni troškovi odlaganja, $T_d$ , €	0,0628
Ukupni troškovi usitnjavanja, $T_u$ , €	0,0000
<b>UKUPNI TROŠKOVI, €</b>	<b>11,89</b>

Troškovi recikliranja za ovaj fotonaponski panel iznose 11,89 €, a najveći razlog je dugotrajno vrijeme rastavljanja.

Tablicom 4.10. prikazan je prihod od recikliranja koji se sastoji od prihoda od prodaje reciklata, prihoda od uštede energije i prihoda od smanjenja emisije svih komponenti.

Tablica 4.10.: Ukupni prihodi

PRIHOD OD RECIKLIRANJA									
Vrsta reciklata	Masa reciklata, kg	Cijena reciklata, C <sub>r</sub> , €	Prihod od prodaje reciklata, P <sub>r</sub> , €	Ušteda energije ostvarena recikliranjem, $\Lambda e$ , €/kg	Prihod od uštede energije, P <sub>Λe</sub> , €	Smanjenje emisije, E, kg/kg	Pristojba za emisiju, p <sub>E</sub> , €/kg	Prihod od smanjenja emisije, P <sub>E</sub> , €	UKUPNI PRIHOD, P, €
1	2	3	4=2x3	5	6=2x5	7	8	9=2x7x8	4+6+9
Aluminij	0,141	4,20	0,59	1,200	0,17	4,5	0,80	0,51	1,27
Željezo	0,225	0,17	0,04	0,300	0,07	1,2	0,80	0,22	0,32
Nepoznati polimer	0,219	0,09	0,02	0,020	0,00	0,0	0,80	0,00	0,02
Staklo	2,200	2,00	4,40	0,600	1,32	1,200	0,80	2,11	7,83
<b>UKUPNO</b>	<b>2,785</b>							<b>UKUPNO</b>	<b>9,45</b>
	<b>VAR 1</b>	<b>VAR 1 - djelomično rastavljanje (do razine podsklopova)</b>							
Ukupni troškovi, T, €	11,35								
Ukupni prihodi, P, €	9,45								
Dobit, P-T, €	<b>-1,90</b>								
Relativna dobit, P/T, €	<b>0,83</b>								

Za navedeni fotonaponski panel ukupni prihodi iznose -1,90 €, što znači da nije riječ o dobiti, nego o gubitku. Najveći razlozi gubitku su: dug proces rastavljanja i velika količina opasnog otpada, a mali udio količina komponenti koji se mogu reciklirati. Relativna dobit iznosi 0,83 €.

## 4.5. Konstrukcijske smjernice recikličnosti

Kako bi se postigla što veća recikličnost fotonaponskog panela, kao i očuvanje okoliša za naredne generacije, a i za lakše i jednostavnije recikliranje dotrajalih proizvoda potrebno je pratiti konstrukcijske smjernice recikličnosti [10]:

- Primjena modularne izvedbe konstrukcije
- Olakšati rastavljanje s jednostavnijom strukturom proizvoda
- Olakšati rastavljanje s jednostavnijim primjenama spojeva
- Smanjiti različite materijale
- Smanjiti broj materijala
- Odlučiti se za materijale prikladne za recikliranje
- Označiti materijale i dijelove
- Označiti iskoristive i opasne materijale
- Pokušati iskombinirati materijale koji neće otežati pri međusobnom recikliranju

Primjena konstrukcijskih smjernica recikličnosti na reciklirani fotonaponski panel treba u najvećoj mjeri smanjiti vrijeme trajanja operacije, no s obzirom da oprema s kojom se obavljalo recikliranje nije bila dovoljno prikladna, rezultati nisu toliko loši. Također, ovdje nije bio problem broj različitih materijala jer ih nema puno, no trebalo bi se pripaziti na opasni otpad i povećati broj poznatih polimera.

## 5. TEHNOLOGIJE RECIKLIRANJA FOTONAPONSKIH PANELA

S obzirom da bi se do 2050. godine mogao stvoriti veliki broj fotonaponskih panela (čak do 80 milijuna tona odbačenih fotonaponskih panela) koji više neće biti u funkciji, potrebno je pronaći odgovarajuća rješenja za njihovo recikliranje kako bi se određeni materijali mogli ponovo koristiti, a opasne tvari iz fotonaponskih panela mogle odbaciti.

Recikliranje fotonaponskog panela provedeno je ručno, što zahtjeva puno vremena, a rezultira manje učinkovitim recikliranjem. Iz tog razloga biti će napravljen pregled dostupnih tehnologija koje su dostupne i koriste se u svijetu.

U poglavlju vezano za praktični dio rada vidljivo je da fotonaponski paneli sadrže određene materijale i komponente koji se mogu reciklirati, a zatim ponovno koristiti. Recikliranje fotonaponskih panela može se obaviti pomoću dvije vrste tehnologija:

- recikliranje fotonaponskih panela na bazi silicija
- recikliranje fotonaponskih panela na bazi kadmij telura

### 5.1. Recikliranje fotonaponskih panela na bazi silicija

Prva tehnologija koristi se za recikliranje silicijskih fotonaponskih panela te je prikazana slikom 5.1.



Slika 5.1. Prikaz tehnološkog postupka recikliranja fotonaponskog panela na bazi silicija

Nakon recikliranja fotonaponskog panela ovom tehnologijom kao krajnji proizvod dobiju se sljedeći materijali: metal, polimer, silicij i staklo. Ovom vrstom tehnologije može se reciklirati gotovo do 80% cjelokupnog fotonaponskog panela. Postupak recikliranja je sljedeći [11]:

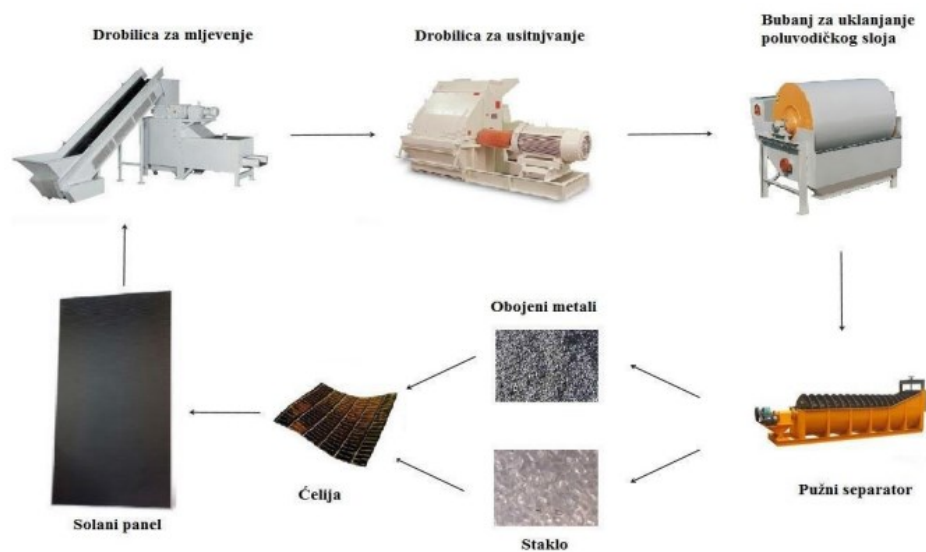
- skidanje aluminijskog okvira i stakla (najčešće ručno)
- skidanje razvodne kutije
- kada ostane samo fotonaponski panel sa silicijskim ćelijama laminiranim u sloj EVA slijedi proces od dva glavna dijela: prvo je potrebno spaliti laminat za lakše ručno rastavljanje, zatim se antirefleksni sloj i P-N spoj uklanjaju jetkanjem.
- kemijska obrada sastoji se od odvajanja metalnih dijelova, otapanja antirefleksnog sloja i jetkanja silicijske podloge kako bi se odvojio n-dopirani emiter što se u nekoliko koraka uklanja pomoću raznih kiselina

Za svaki fotonaponski panel drugači je postupak jetkanja te još nije opće priznat univerzalni postupak.

## **5.2. Recikliranje fotonaponskih panela na bazi kadmij telura**

Kadmij je otrovni teški metal koji se smatra opasnom tvari. Njegova proizvodnja ne ovisi o potražnji fotonaponskih panela jer nastaje kao sporedni produkt pri dobivanju bakra, cinka i olova. Telur je kao i kadmij rijedak te je blago otvoren metal. Uobičajeno se koristi kao dodatak za obradu željeza. Telur se dobiva industrijski zajedno sa selenom, ali isključivo kao sporedni proizvod elektrolitičke proizvodnje bakra i nikla [11].

Za razliku od recikliranja fotonaponskog panela na bazi silicija, ova vrsta tehnologije recikliranja fotonapona na bazi kadmij telura sastoji se od potpuno različitih operacija pri recikliranju te je prikazana slikom 5.2.



Slika 5.2.: Prikaz tehnološkog postupka recikliranja fotonaponskog panela na bazi kadmij telura [11]

Detaljan postupak operacija pri recikliranju fotonaponskih panela na bazi kadmij telura je sljedeći [11]:

- prikupljeni fotonaponski paneli prvo se rastavljaju na velike komade pomoću strojeva za lomljenje i mlinova (sitnilice), a zatim se usitnjavaju u drobnicama za usitnjavanje na veličinu do 5 mm što daje sigurnost da je sloj EVA polimera slomljena, što je nužno za idući korak recikliranja
- uklanjanje poluvodičkog sloja (filma) provodi se u bubnju koji mora biti od nehrđajućeg čelika u kojem se nalaze otopine kiseline i peroksida koji su nužni za odvajanje vodljivog sloja od stakla, a bubanj se rotira kako bi bilo omogućeno bolje ispiranje metala
- razdvajanje krutih materijala od tekućina provodi se tako da se mješavina iz bubnja iz prethodno navedenog koraka ispušta u pužni separator u kojem se odvija odvajanje i ispiranje krutih dijelova od tekućine
- ispiranje i odvajanje stakla se provodi sve dok se ne ukloni preostali poluvodički materijal sa stakla, a oprano i čisto staklo se koristi za daljnju uporabu, a za to vrijeme se skladišti
- u zadnjem koraku odvojena tekućina puna je metala pa je potrebno izvršiti taloženje gdje se zgrušavaju i skupljaju te se zatim pakiraju za daljne potrebe korištenja



## 6. ZAKLJUČAK

Fotonaponski paneli predstavljaju budućnost proizvodnje električne energije. Razlog tome su veći troškovi koje kućanstva dobivaju u zadnje vrijeme. Sve više kućanstava želi svoju vlastitu elektranu kako bi se smanjili troškovi. Problem predstavlja vijek trajanja fotonaponskih panela koji iznosi do 30 godina, a to znači da će nastati gomilanje fotonaponskih panela kad njihov vijek trajanja završi. Također, velik problem predstavlja jeftinija proizvodnja novog fotonaponskog panela, nego recikliranje istog. Iako se ta razlika smanjuje iz godine u godinu i dalje cijena recikliranja fotonaponskog panela nije dostigla cijenu proizvodnje novog fotonaponskog panela. Upravo iz tog razloga potrebno su napredni i učinkoviti tehnološki sustavi recikliranja fotonaponskih panela. Također, osim novih, naprednih i učinkovitih tehnoloških sustava, potrebno je pratiti konstrukcijske smjernice za recikliranje. Trenutno najvažnije konstrukcijske smjernice za recikliranje fotonaponskog panela su povećanje broja poznatih polimera, što više jednostavnih komponenti te smanjenje opasnog otpada. U praktičnom dijelu rada, nakon provedene ekonomsko-ekološke analize nije ostvarena dobit ovakvim pristupom rastavljanja tj. recikliranja, a najveći razlog tomu je dugotrajno rastavljanje fotonaponskog panela. Također, razlog negativnom prihodu je velika količina opasnog otpada i izrazito mali broj poznatih polimera za koje je iz najvećih razloga kriv proizvođač. Osim navedenih problema, važno je istaknuti da je ovo bilo prvo susretanje sa ručnim recikliranjem fotonaponskog panela te oprema za rastavljanje nije bila dovoljno kvalitetna za izvođenje rastavljanja fotonaponskog panela.

## SAŽETAK

Pomoću fotonaponskih panela omogućava se iskorištavanje obnovljivih izvora energije, no problem predstavlja kako i na koji način najefikasnije reciklirati fotonaponske panele. Recikliranjem fotonaponskih panela dolazi do ponovne uporabe istih materijala s ciljem stvaranja novih fotonaponskih panela. Problem gomilanja fotonaponskih panela još nije prisutan u Europskoj uniji jer se još nije došlo do velikih odbačenih količina fotonaponskih panela, no s obzirom da su troškovi električne energije znatno porasli i to će se promijeniti. Upravo zbog navedenog problema je i provedena analiza recikličnosti, kako bi se na praktičnom primjeru FN panela uvidjele neke od poteškoća u recikliranju istih. Cilj kvalitetnog recikliranja je pratiti konstrukcijske smjernice. Potrebno je smanjiti količinu opasnog otpada i povećati broj poznatih polimera. Ručno recikliranje je jako zahtjevno te je potrebna posebna oprema kako bi se izvelo kvalitetno recikliranje. S obzirom da fotonaponski paneli spadaju u elektrotehničku i elektroničku opremu potrebno je držati se određenih pravilnika i zakona.

***Ključne riječi:*** fotonaponski paneli, konstrukcijske smjernice, recikliranje

## **ABSTRACT**

### **ANALYSIS AND EVALUATION OF RECYCABILITY OF PHOTOVOLTAIC PANELS**

Photovoltaic panels enable the use of renewable energy sources, but the problem is how and in what way to recycle photovoltaic panels most effectively. With the recycling of photovoltaic panels comes the reuse of the same materials with purpose of creating new photovoltaic panels. The problem of accumulation of photovoltaic panels is not yet present in the European Union because there are no large amount of photovoltaic panels, but considering today's situation that the costs of electricity have gone significantly higher, this will change. Because of the mentioned problem the analysis of recyclability was carried out, in order to see some of the difficulties in recycling them on the practical example of FN panels. The goal of quality recycling is to follow construction guidelines. It is necessary to reduce the amount of hazardous waste and increase the number of known polymers. Manual recycling is very demanding and requires special equipment to perform quality recycling. Given that photovoltaic panels belong to electrotechnical and electronic equipment, it is necessary to adhere to certain regulations and laws.

***Key words:*** photovoltaic panels, construction guidelines, recycling

## LITERATURA

1. Šljivac, D., Topić, D.: Obnovljivi izvori električne energije, FERIT, Osijek, 2018.
2. Podrijetlo i povijest fotonaponske solarne energije, dostupno na: <https://www.renovablesverdes.com/hr/origenes-e-historia-de-la-energia-solar-fotovoltaica/>, pristupljeno: 10.6.2022.
3. Fotonaponski sustavi, dostupno na: [https://www.irena-istra.hr/uploads/media/Fotonaponski\\_sustavi.pdf](https://www.irena-istra.hr/uploads/media/Fotonaponski_sustavi.pdf), pristupljeno: 10.6.2022.
4. Majdandžić, Lj.: Fotonaponski sustavi, Tehnička škola Ruđera Boškovića u Zagrebu, 2010.
5. Reciklirajte solarne module ili panele, dostupno na: <https://www.renovablesverdes.com/hr/reciclar-los-modulos-o-paneles-solares/>, pristupljeno: 12.6.2022.
6. Holuszko Maria, E., Kumar A., Espinosa Denise C.R.: Electronic waste, Wiley, 2022.
7. Pravilnik o gospodarenju otpadnom električnom i elektroničkom opremom: NN 42/2014-782
8. Zakon o gospodarenju otpadom: NN 84/2021
9. Kljajin, M., Opalić, M., Pintarić, A.: Recikliranje električnih i elektroničkih proizvoda, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, 2006.
10. Materijali s predavanje: Recikliranje elektrotehničkih proizvoda, FERIT, Osijek
11. Bombach, E., Rover, I., Muller, A., Schlenker, S., Wambach, K., Kopecek, R., Wefringhaus, E.: Technical experience during thermal and chemical recycling of a 23 year old PV generator formerly installed on Pellworm island, Deutsche Solar AG, Solar Material, Alfred-Lange, Freiberg – Njemačka, 2015.

## **ŽIVOTOPIS**

Anton Maglica rođen je u Osijeku 28.10.1999. godine. Nakon završetka osnovne škole Vladimir Nator u Čepinu upisuje srednju Elektrotehničku i prometnu školu u Osijeku. Nakon uspješno završene srednje škole stječe zvanje „Elektrotehničar“. Zatim upisuje Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku 2018. godine gdje upisuje stručni studij – smjer elektroenergetika. Trenutno je zaposlen u Optimum ing. d.o.o. preko studentskog servisa gdje obavlja poslove vezane za projektiranje elektrotehničkih instalacija.

---

Potpis autora