

**ANALIZA TOKOVA MATERIJALA FOTONAPONSKIH PANELA****MATERIAL FLOW ANALYSIS OF PHOTOVOLTAIC PANELS**Stefan Miljković, Nemanja Stanisavljević, *Fakultet Tehničkih Nauka, Novi Sad***Oblast – INŽENJERSTVO ZAŠTITE ŽIVOTNE SREDINE**

**Кратак садржај** U ovom radu je dat prikaz jednog od problema koji je usko vezan za sektor energetike i sektor zaštite životne sredine, a to je proizvodnja električne energije iz fotonaponskih panela i upravljanje otpadom koju nastaje nakon isteka njihovog životnog veka. Na samom početku dat je opis osnovnih elemenata fotonaponskih panela, nakon čega slede odgovori na pitanja vezana za metodu Analize tokova materijala, njen značaj i mogućnost primene u energetici. U ovom radu je takođe predstavljen model cirkularne.

**Ključne reči:** fotonaponski paneli, električna energija, cirkularna ekonomija, zaštita životne sredine

**Abstract** This paper describes one of the problems that is closely related to the energy sector and the environmental protection sector, which is the production of electricity from photovoltaic panels and the management of waste that occurs after the end of their life. At the very beginning, a description of the basic elements of photovoltaic panels is given, followed by answers to questions related to the Material Flow Analysis method, its importance and the possibility of application in the energy sector. This paper also presents a circular model.

**Keywords:** photovoltaic panels, electricity, circular economy, environment protection

**1. UVOD**

Svesni činjenice da je potreba za energijom iz dana u dan sve veća, a resursa i zaliha energenata sve manja, dolazimo do povećanog interesovanja za upotrebu obnovljivih izvora energije i razvoja čistih energetske tehnologije. Jedan od takvih vidova energije je solarna energija. Energija sunčevog zračenja ili solarna energija, predstavlja osnovu gotovo svih drugih izvora energije na Zemlji. Kao akumulisani oblik solarne energije javljaju se fosilna goriva (ugalj, nafta i prirodni gas). Racionalizacijom situacije nastale krajem drugog i početkom trećeg milenijuma vrlo se jasno primećuje trend prekomerne eksploatacije ovakvih izvora energije kao i njen nepovoljan uticaj na životnu sredinu.

**NAPOMENA:**

Ovaj rad je proistekao iz master rada čiji mentor je bio dr. Nemanja Stanisavljević, redovni profesor.

Stoga, prirodno se javila potreba za pronalaženjem alternativnih i obnovljivih izvora za dobijanje električne energije koji smanjuju ili u potpunosti eliminišu probleme kao što su velike emisije ugljen dioksida, metana i ostalih toksičnih gasova sa efektom staklene bašte.

Kada se govori o solarnoj energiji kao oblasti energetike, misli se na direktno iskorišćenje energije sunčevog zračenja za potrebe proizvodnje električne energije. U ovom radu će se izučavati primena fotonaponskih panela, sastav i proizvodnja fotonaponskih panela, kao i šta raditi nakon isteka njihovog veka proizvodnje električne energije.

**2. OSNOVNI ELEMENTI FOTONAPONSKOG SISTEMA**

Fotonaponske (FN) ćelije pretvaraju sunčevu energiju direktno u električnu energiju, a sastavni su deo fotonaponskih sistema koji se mogu podeliti u tri glavne grupe: on-grid (priključeni na mrežu), off-grid (autonomni sistemi), i hibridni sistemi. FN sistemi se sastoje od FN modula (povezane FN ćelije), koji su osnova svakog sistema, a uz njih dolaze i prateći uređaji poput baterija i invertora. Pojedinačna FN ćelija ima relativno nisku izlaznu snagu (1-2W), pa se FN ćelije povezuju u veće module, a ti moduli u panele, čime se povećava izlazna snaga Sistema [9].

FN ćelije obuhvataju zaštitni providni sloj, antirefleksni sloj koji povećava efikasnost smanjenjem refleksije svetlosti, mrežu električnih kontakata, aktivni poluprovodnički sloj (p-n spoj), i druge slojeve koji omogućavaju konverziju svetlosne energije u električnu. Postoje tri glavne vrste solarnih panela, koje se razlikuju po strukturi ćelija:

- **Monokristalni:** Najefikasniji i najskuplji, napravljeni od jednog kristala silicijuma.
- **Polikristalni:** Jeftiniji, ali sa nižom efikasnošću, sastoje se od više kristala silicijuma.
- **Tankoslojni:** Fleksibilni i lakši, ali sa najnižom efikasnošću, obično korišćeni u specifičnim aplikacijama.

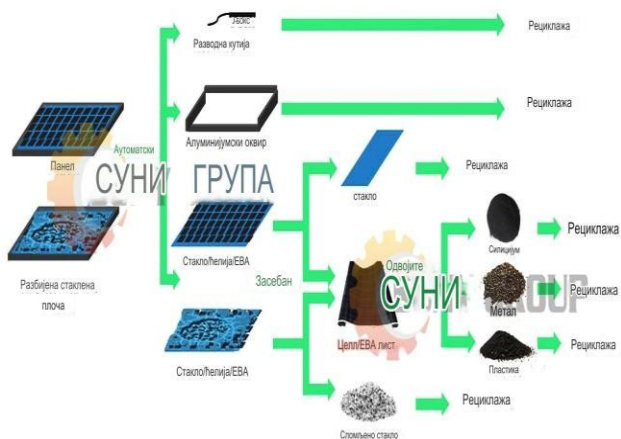
Svi FN sistemi zahtevaju precizno dimenzionisanje u odnosu na dostupno sunčevo zračenje i potrebe korisnika, a skladištenje energije pomoću baterija omogućava rad tokom noći ili oblačnih dana. S obzirom na rastuću potražnju za obnovljivim izvorima energije, FN sistemi postaju sve važniji deo održive budućnosti, s ciljem smanjenja emisije štetnih materija i prelaska na ekološki prihvatljive izvore energije [1].

### 3. RECIKLIRANJE FOTONAPONSKIH PANELA

Reciklaža solarnih panela donosi brojne ekološke i ekonomske prednosti, poput očuvanja resursa, smanjenja otpada i ugljeničnog otiska, te oporavka materijala poput silicijuma, aluminijuma i retkih metala. Ona promovise održivu praksu i doprinosi kružnoj ekonomiji, gde se materijali ponovo koriste. Reciklaža postaje ključna zbog sve većeg broja solarnih panela koji dostižu kraj životnog veka, a uvođenje efikasnijih tehnologija može doneti značajne ekonomske koristi. Međutim, izazovi uključuju visoke troškove i tehničku složenost, ali potencijalne koristi značajno nadmašuju nedostatke.

#### 3.1. Metode reciklaže

Solarni paneli, ključni za obnovljive izvore energije, sadrže materijale sa visokom reciklabilnom vrednošću. Dve osnovne vrste panela su monokristalni silicijum (C-Si) i kadmijum teluridski (CdTe) paneli, koje zahtevaju različite metode recikliranja. Proces recikliranja uključuje tri glavne faze: raslojavanje, odvajanje materijala i ekstrakciju. U C-Si panelima, modul se usitnjava i odvaja mehaničkim, hemijskim ili termičkim procesima. U CdTe panelima, fragmentacija i hemijska obrada uklanjaju metale i odvajaju staklo. Glavni izazov u reciklaži su nečistoće koje smanjuju vrednost oporavljenih materijala. [12].



Slika 3.1.1 Proces reciklaže [12]

#### 3.2. Analiza otpada prilikom reciklaže monokristalnog fotonaponskog panela

Solarni paneli sadrže materijale s visokom reciklabilnom vrednošću, uključujući silicijumske pločice (5-10% težine panela), aluminijumske okvire (5-10%), staklo (75-80%), EVA film (oko 5%), pozadinske ploče (3-5%) i konektore sa žicama (1%). Reciklaža omogućava ponovno korišćenje tih materijala, čime se smanjuje oslanjanje na nove resurse i smanjuje otpad. Efikasno recikliranje podržava održivi razvoj sektora obnovljivih izvora energije, čuvajući resurse i minimizirajući uticaj na životnu sredinu. [3].

#### 3.3. Štetni materijali po okolinu u fotonaponskim panelima

Proizvodnja solarnih panela proizvodi toksične nusproizvode, posebno tokom rudarstva i prerade silicijuma, što uključuje emisiju štetnih gasova kao što su ugljen-dioksid i sumpor-dioksid. Proces koji koristi peći za preoblikovanje silicijuma, zajedno sa tretiranjem ploča, oslobađaju hemikalije poput tetrahlorida i kiselina, koje

moгу загађивати водене tokove. Iako solarni paneli doprinose čistoj energiji, ekološki uticaj njihove proizvodnje, posebno rudarstva silicijuma i stvaranja otpadnih materijala, ne sme se zanemariti [6].

Kristalno silicijumski (Si) paneli čine većinu na tržištu i, iako zahtevaju energiju za proizvodnju, koriste manje toksične materijale i imaju bolje razvijene sisteme za reciklažu. Proces reciklaže ovih panela je dobro razvijen, što smanjuje potrebu za novim sirovinama i minimizira njihov ukupni uticaj na životnu sredinu. Tokom reciklaže, aluminijum i silicijum se mogu ponovo koristiti, dok je toksičnost relativno niska u poređenju sa drugim vrstama panela. S druge strane, tankoslojni paneli, poput kadmijum-teluridnih (CdTe) i bakar-indijum-galijum-diselenidnih (CIGS), koriste ređe i potencijalno opasnije materijale. CdTe paneli koriste toksični kadmijum, a CIGS paneli koriste retke elemente kao što su indijum i galijum, što predstavlja izazove u pogledu reciklaže i ekološke bezbednosti. Iako su ovi paneli efikasniji i često jeftiniji za proizvodnju, njihova toksičnost i složenost u procesu reciklaže zahtevaju pažljivo upravljanje da bi se smanjili ekološki rizici. Ekološka razmatranja postaju još složenija kada se uzme u obzir загађење koje nastaje tokom proizvodnje ovih panela. Na kraju njihovog životnog ciklusa, solarni paneli često završavaju na deponijama, gde toksični materijali poput kadmijuma i olova mogu kontaminirati zemljište i vodene resurse. Ovo je posebno izraženo kod tankoslojnih panela, dok silicijumski paneli nemaju toliko opasnih hemikalija [7].

### 4. KAPACITETI FOTONAPONSKIH ELEKTRANA U SRBIJI

Solarna energija u Srbiji ima značajan potencijal, s obzirom na to da sunčevo zračenje na njenoj teritoriji premašuje za oko 30% prosečne nivoe u Centralnoj Evropi. Uprkos tome, solarna energija trenutno učestvuje sa samo 0,04% u ukupnoj proizvodnji električne energije u Srbiji. Ipak, prema energetske strategiji Ministarstva rudarstva i energetike, planira se da do 2030. godine kapacitet solarnih elektrana bude povećan za 1,54 GW. Ovaj potencijal mogao bi da obezbedi čak 3 puta više električne energije nego što je zemlji trenutno potrebno. U Srbiji već postoji nekoliko solarnih elektrana sa snagom oko 1 MW, uključujući projekte poput "B2 Sun Power" u Martonošu (999 kW), "Electron Energy Alpha" u Tavankutu (350 kW) i "Solar S2022" u Bikovu (990 kW) [2].

U poređenju sa državama kao što su Nemačka, Ukrajina i Austrija, koje su značajno napredovale u razvoju solarne energije, Srbija zaostaje, ali potencijal za rast je ogroman. Na primer, Ukrajina je pre rata imala 1,205 GW solarne energije u domaćinstvima, dok je Nemačka sa svojih 68 GW instaliranih kapaciteta iz solarnih panela pokrivala 10% svojih potreba za električnom energijom [4].

### 5. STUDIJA SLUČAJA ANALIZE TOKOVA MATERIJALA FOTONAPONSKIH PANELA U SRBIJI

Razvoj solarne energije doprinosi energetskej održivosti, ali povećava i potencijalnu količinu elektronskog otpada, jer životni vek solarnih panela obično iznosi od 25 do 30 godina [5]. U Srbiji je trenutno instalirano 17,14 MW kapaciteta fotonaponskih sistema, što će u narednih 15

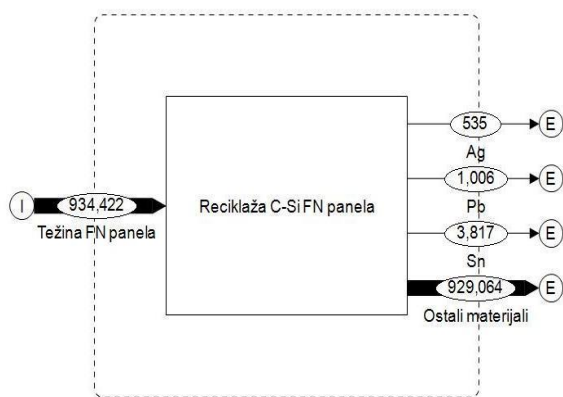
godina proizvesti oko 934.422 tona otpada. Ovaj otpad sadrži dragocene materijale kao što su silicijumske pločice, aluminijum, staklo i plemeniti metali, koji se reciklažom mogu ponovo upotrebiti. Reciklaža solarnih panela postaje ključna za sprečavanje nagomilavanja otpada i očuvanje prirodnih resursa. Pravilno upravljanje i reciklaža panela omogućavaju vraćanje dragocenih materijala u ekosistem, čime se štiti životna sredina i smanjuje potreba za deponijama. Uspostavljanje robusne infrastrukture za reciklažu solarnih panela može doneti i ekonomske koristi, kao što su smanjenje troškova energije i stabilizacija lanca snabdevanja materijalima. Dok se tehnologije reciklaže usavršavaju, a ekološki propisi postaju stroži, recikliranje zastarelih panela predstavlja priliku za nove ekonomske tokove, koji dodatno podstiču razvoj obnovljivih izvora energije.

### 5.1. Analiza štetnih materijala u fotonaponskim panelima

Solarni paneli sastoje se uglavnom od stakla, aluminijuma, bakra i silicijuma, što ih čini pogodnim za reciklažu. Međutim, zabrinutost raste zbog prisustva toksičnih materijala poput olova i kadmijum telurida (CdTe). Olovo, koje se koristi za lemljenje, prisutno je u oko 14 grama po panelu, a industrija solarne energije planira značajno smanjenje njegove upotrebe do 2026. godine. CdTe, iako kancerogen, koristi se u specijalizovanim panelima tankog filma, ali zbog obavezne inkapsulacije ne propušta toksične supstance u okolinu [8].

#### 5.1.1. Kristalno silicijumski fotonaponski paneli

Kristalni fotonaponski paneli igraju ključnu ulogu u smanjenju emisija štetnih gasova, ali njihova proizvodnja uključuje teške metale poput olova i srebra, kao i hemikalije koje mogu štetiti životnoj sredini. U Srbiji je instalirano 17,14 MW solarne energije, što će nakon isteka životnog veka panela proizvesti značajne količine štetnih materijala: oko 534,77 kilograma srebra, 1006,12 kilograma olova i 3817,08 kilograma kalaja.

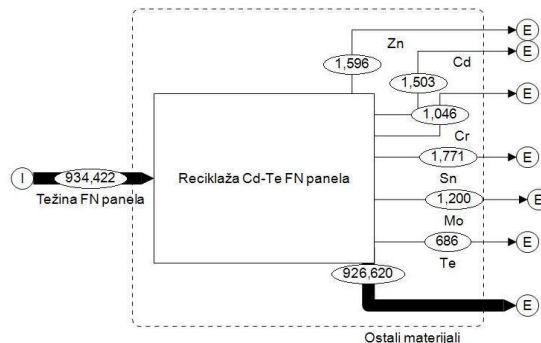


Slika 5.1.1.1 Količina štetnih materijala koji nastaje prilikom reciklaže C-Si fotonaponskih panela

#### 5.1.2 Kadmijum teluridski fotonaponski paneli CdTe

Kadmijum teluridski (CdTe) paneli spadaju među najefikasnije tankoslojne solarne tehnologije, ali sadrže toksične materijale kao što su kadmijum, koji može ugroziti životnu sredinu ako se ne odlaže pravilno. Nakon

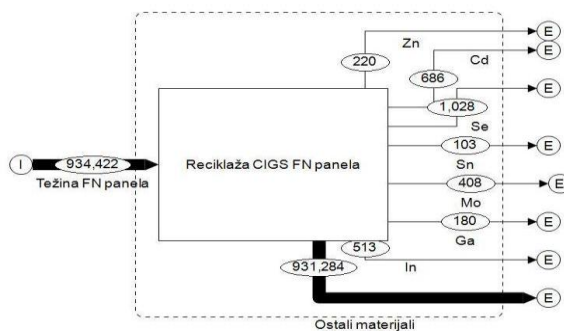
životnog veka ovih panela, instalirani kapacitet Srbije od 17,14 MW mogao bi generisati značajne količine štetnih materijala: oko 1503,18 kilograma kadmijuma, 1045,54 kilograma hroma, 1199,8 kilograma molibdena, 1770,56 kilograma kalaja, 685,6 kilograma telurida i 1595,73 kilograma cinka.



Slika 5.1.2.1 Količina štetnih materijala koji nastaje prilikom reciklaže CdTe fotonaponskih panela

#### 5.1.3 Bakar indijum galijum diselenid fotonaponski paneli CIGS

CIGS fotonaponski paneli, napravljeni od kombinacije bakra, indijuma, galijuma i selenia, nude izuzetnu efikasnost u pretvaranju sunčeve energije u električnu i sve češće se koriste u industriji solarne energije. Međutim, ova tehnologija uključuje retke materijale koji, iako manje toksični od kadmijuma u CdTe panelima, zahtevaju pažljivo rukovanje i reciklažu zbog mogućih uticaja na životnu sredinu tokom proizvodnje i odlaganja. Procene pokazuju da bi Srbija, s instaliranim kapacitetom od 17,14 MW solarne energije, mogla imati oko 6,86 kilograma kadmijuma, 179,97 kilograma galijuma, 512,49 kilograma indijuma, 407,93 kilograma molibdena, 1028,4 kilograma selenia, 102,84 kilograma kalaja i 219,39 kilograma cinka nakon isteka životnog veka ovih panela.



Slika 5.1.2.1 Količina štetnih materijala koji nastaje prilikom reciklaže CIGS fotonaponskih panela

Metodologija analize tokova materijala (MFA) omogućava detaljno istraživanje ovih potencijalnih tokova otpada, kao i procenu količina materijala koji se mogu reciklirati i ponovo upotrebiti. Primenom MFA analize, mogu se identifikovati mogućnosti za optimizaciju sistema reciklaže i prevenciju otpada. Na taj način, možemo osigurati da ovi materijali imaju manji uticaj na životnu sredinu, kao i povećati efikasnost i održivost industrije

