

# Razvoj materijala na primjeru fotonaponskih sustava

---

**Pavić, Martina**

**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:200:390682>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-16**

*Repository / Repozitorij:*

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



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

**Sveučilišni studij**

**RAZVOJ MATERIJALA NA PRIMJERU  
FOTONAPONSKIH SUSTAVA**

**Završni rad**

**Martina Pavić**

**Osijek, 2022.**

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA **OSIJEK****Obrazac Z1P - Obrazac za ocjenu završnog rada na preddiplomskom sveučilišnom studiju**

Osijek, 19.09.2022.

Odboru za završne i diplomske ispite

**Prijedlog ocjene završnog rada na preddiplomskom sveučilišnom studiju**

<b>Ime i prezime Pristupnika:</b>	Martina Pavić
<b>Studij, smjer:</b>	Preddiplomski sveučilišni studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija
<b>Mat. br. Pristupnika, godina upisa:</b>	4719, 22.07.2019.
<b>OIB Pristupnika:</b>	31833323483
<b>Mentor:</b>	Doc. dr. sc. Goran Rozing
<b>Sumentor:</b>	Dalibor Buljić, dipl. ing.
<b>Sumentor iz tvrtke:</b>	
<b>Naslov završnog rada:</b>	Razvoj materijala na primjeru fotonaponskih sustava
<b>Znanstvena grana rada:</b>	<b>Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)</b>
<b>Zadatak završnog rad:</b>	
<b>Prijedlog ocjene završnog rada:</b>	Dobar (3)
<b>Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:</b>	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 2 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 1 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 2 bod/boda Razina samostalnosti: 2 razina
<b>Datum prijedloga ocjene od strane mentora:</b>	19.09.2022.
<b>Datum potvrde ocjene od strane Odbora:</b>	21.09.2022.

Potvrda mentora o predaji konačne verzije rada:	<i>Mentor elektronički potpisao predaju konačne verzije.</i>
	Datum:



**FERIT**

FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK

## IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA

Osijek, 21.09.2022.

**Ime i prezime studenta:**

Martina Pavić

**Studij:**

Preddiplomski sveučilišni studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija

**Mat. br. studenta, godina upisa:**

4719, 22.07.2019.

**Turnitin podudaranje [%]:**

12

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Razvoj materijala na primjeru fotonaponskih sustava**

izrađen pod vodstvom mentora Doc. dr. sc. Goran Rozing

i sumentora Dalibor Buljić, dipl. ing.

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija.

Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis studenta:

# SADRŽAJ

<b>1. UVOD</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1. Zadatak završnog rada</b> .....	<b>2</b>
<b>2. PREGLED RAZVOJA FOTONAPONSKIH SUSTAVA</b> .....	<b>3</b>
<b>2.1. Karakteristike fotonaponskih ćelija</b> .....	<b>6</b>
<b>2.2. Fizikalne osnove fotonaponskih ćelija</b> .....	<b>8</b>
<b>2.3. Prednosti i nedostaci fotonaponskih ćelija</b> .....	<b>9</b>
<b>3. FOTONAPONSKI SUSTAVI, MATERIJALI I TEHNOLOGIJE PROIZVODNJE</b> .....	<b>11</b>
<b>3.1. Materijali dostupni za proizvodnju fotonaponskih ćelija</b> .....	<b>13</b>
<b>3.1.1. Monokristalni silicij</b> .....	<b>13</b>
<b>3.1.2. Polikristalni silicij</b> .....	<b>16</b>
<b>3.1.3. Amorfni silicij</b> .....	<b>18</b>
<b>3.2. Podjela fotonaponskih sustava</b> .....	<b>20</b>
<b>3.3. Svojstva i struktura fotonaponskih ćelija</b> .....	<b>21</b>
<b>4. PRIMJERI PRIMJENE I PRAVCI RAZVOJA FOTONAPONSKIH SUSTAVA</b> .....	<b>24</b>
<b>4.1. Fotonaponski sustavi u svijetu</b> .....	<b>24</b>
<b>4.2. Fotonaponski sustavi u Hrvatskoj</b> .....	<b>26</b>
<b>4.3. Suvremeni materijali koji se istražuju za proizvodnju fotonaponskih modula</b> .....	<b>27</b>
<b>4.4. Problemi recikliranja solarnih panela</b> .....	<b>29</b>
<b>5. ZAKLJUČAK</b> .....	<b>30</b>
<b>SAŽETAK</b> .....	<b>31</b>
<b>SUMMARY</b> .....	<b>32</b>
<b>LITERATURA</b> .....	<b>33</b>
<b>ŽIVOTOPIS</b> .....	<b>36</b>

# 1. UVOD

Izvore energije možemo podijeliti na obnovljive i neobnovljive izvore energije. Neobnovljivim izvora pripadaju fosilna i nuklearna goriva. Najznačajnija njihova karakteristika je da su nalazišta i zalihe ograničene, te da se ne obnavljaju u prirodi nego su podložni iscrpljivanju. Obnovljivi izvori su neiscrpni, tj. obnavljaju se u prirodi. Toj skupini pripadaju energija vjetra, vode, biomasa, geotermalna energija i Sunčeva energija. Fotonaponski sustav skup je opreme pomoću koje solarnu energiju Sunca pretvara u električnu energiju. Oprema se sastoji od nosača modula, fotonaponskog modula, DC/AC izmjenjivača, regulatora punjenja, baterijskog sustava i ostalih dijelova. Zahvaljujući francuskom fizičaru Alexandru Edmondu Becquerelu, 1839. godine otkriven je fotonaponski efekt. Prilikom pada na površinu solarne ćelije, tj. fotoni predaju svoju energiju panelu i na taj način izbijaju negativno nabijene elektrone iz atoma. Izbijeni elektroni kreću se prema drugoj (negativnoj) strani panela i na taj način dolazi do razlike potencijala, tj. generira se električna energija [1]. Same solarne ćelije međusobno mogu biti povezane u serijskoj ili paralelnoj kombinaciji i tako povezane tvoriti fotonaponski sustav. Razlika između serijskog i paralelnog spajanja je da kod serijskog spoja, napon između negativnog i pozitivnog pola jednak je zbroju napona pojedinih fotonaponskih modula, dok kod paralelnog spoja ukupna struja jednaka je zbroju pojedinih modula, a napon jednog modula jednak je naponima ostalih modula. Iako ima bezbroj prednosti korištenja fotonaponskih sustava, kao jedna od najvažnijih ističe se ta da je energija Sunca besplatna i lako dostupna, višak energije može se skladištiti, odnosno spremati u akumulatore te svojim radom fotonaponski sustavi ne zagađuju okoliš.

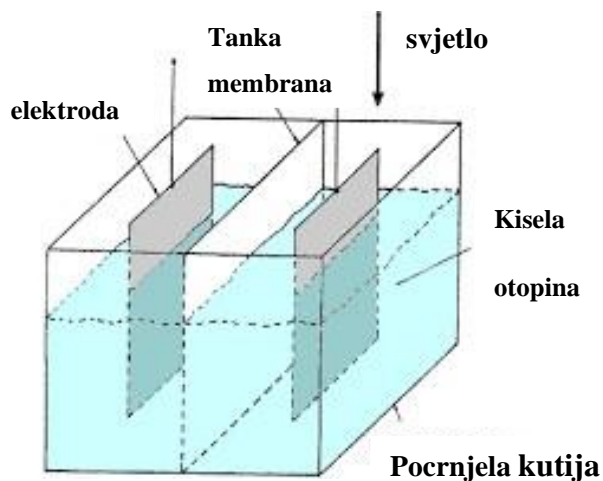
Za izradu fotonaponskih sustava najčešće se koristi silicij (u periodnom sustavu elemenata, atomski je broj 14., a simbol mu je Si) koji prema zastupljenosti u Zemljinoj kori zauzima drugo mjesto, odmah iza kisika, masenog udjela oko 27%. Najvažniji je materijal poluvodičke tehnike i mikrotehnike. Složenim procesom u kojem se jednostavni kvarcni pijesak pretvara u čisti kristalni silicij postaje pogodan materijal za izradu fotonaponskih modula i kao takvi razlikuju se: monokristalni, polikristalni i tankoslojni fotonaponski moduli. U izradi samih panela također uz silicij sudjeluju i ostali materijali kao što su staklo, bakar i plastika.

## **1.1.      Zadatak završnog rada**

U završnom radu potrebno je prikazati povijesni razvoj fotonaponske tehnologije i materijala. Također, objasniti fizikalne osnove i karakteristike fotonaponske ćelije, kao i primjenu fotonaponske tehnologije. Potrebno je prikazati podjelu fotonaponskih sustava i vrste fotonaponskih materijala, te opisati svojstva i postupke dobivanja navedenih materijala. Na više primjera detaljnije opisati primjenu fotonaponskih tehnologija i materijala te ukazati na pravce razvoja istih.

## 2. PREGLED RAZVOJA FOTONAPONSKIH SUSTAVA

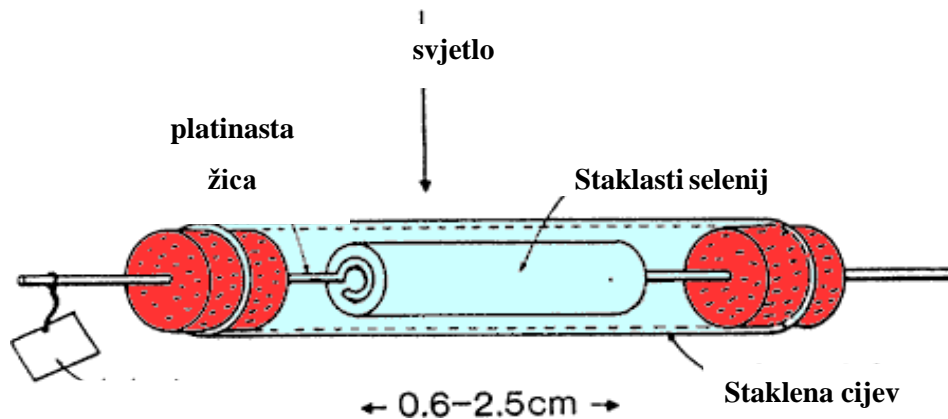
U prvoj polovici 19. stoljeća, 1839. godine francuski fizičar Alexandre Edmond Becquerel otkrio je fotonaponski efekt, kasnije poznat kao Becquerelov efekt, na principu tog fotonaponskog efekta rade sunčeve ćelije koje omogućuju pretvorbu Sunčevog svjetla u električnu energiju. Na slici 2.1 [2], prikazana je najranija fotonaponska ćelija koju je razvio Becquerel. Fotonaponska ćelija sastojala se od crno obložene posude s kiselim otopinom (elektrolitom) u kojoj se nalaze dvije elektrode koje su odvojene tankom membranom te spojene na vanjski krug. Crni premaz napravljen je da uhvati svjetlost, a dvije elektrode su obložene srebrovim kloridom, (AgCl), i srebrovim bakrom (AgBr). Kada svjetlost „pada“ na elektrode, nastaje struja vanjskog kruga. Ova fotonaponska ćelija smatra se najranijom fotonaponskom ćelijom.



Slika 2.1, Najranija fotonaponska ćelija [3]

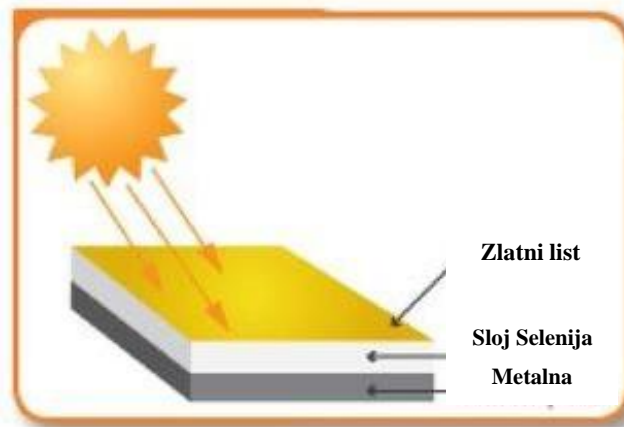


Godine 1877. WG Adams i RE Day objavili su članak pod naslovom 'Djelovanje svjetlosti na selenij' u Philosophical Transactions of the Royal Society of London. U članku, autori opisuju selenijsku fotonaponsku ćeliju na temelju otkrića Willoughbyja Smitha da, „kada električna struja prolazi kroz šipku kristalnog selenija, njezin je otpor manji kada je šipka bila izložena djelovanju svjetlosti nego u mraku.“ WG Adams i RE Day koristili su staklastu selenijsku šipku spoјenu na platinsku elektrodu. Ova postavka zatvorena je u staklenu cijev i svjetlo pada na staklenu cijev. Uočeno je da struja teče u vanjskom krugu [3].



**Slika 2.2, Prikazuje selenijsku fotonaponsku ćeliju [3]**

Godine 1883. CE Fritts je objavio istraživanje pod naslovom „O novom obliku fotoćelije selena“ u American Journal of Science. Ovo je bila prva tankoslojna selenijska solarna ćelija koja se sastojala se od metalne podloge (npr. mjed) na koju je utisnut sloj selena od 25 mikrona i na to je bio utisnut zlatni list (poluga) kao što je prikazano na slici 2.2 [4]. Kada je svjetlost upala na sloj selenija, uočeno je da struja teče u vanjskom krugu, a prikaz prve tankoslojne selenijske fotonaponske ćelije prikazuje slika 2.3.



**Slika 2.3, Prva tankoslojna selenijska fotonaponska ćelija [3]**

Na slici 2.4 [5] prikazan je prvi solarni niz iz 1884. kojega je postavio Charles Fritts na krovu New Yorka. Struja je bila kontinuirana, konstantna i znatne snage te je postizala stopu pretvorbe od 1 do 2%, usporedbe radi današnje, moderne fotonaponske ćelije imaju stopu pretvorbe od 15 do 20%. Tijekom 19. stoljeća uslijedila su brojna istraživanja fotonaponskih sustava, fotonaponskog efekta i same tehnologije, no veći razvoj slijedi tek u 20.stoljeću.



**Slika 2.4, Prvi solarni niz, 1884. godina [3]**

Godine 1900. Max Planck uveo je pojam kvantne fizike gdje je energija bila konceptualizirana kao diskretni paketi ili "kvanta", koja je opisana jednadžbom:

$$E = h * \nu \quad (2-1)$$

Gdje je:

**h**- Planckova konstanta, **6,625\*10<sup>-34</sup>J<sub>s</sub>**

**ν**- frekvencija elektromagnetskog zračenja **(1/s)**

U odvažnom napisanom radu objavljenom 1905., Einstein je otkrio da svjetlost sadrži pakete energije, koje je nazvao svjetlosnim kvantima (tj. fotonima). Tvrdio je da količina snage koju kvanti svjetlosti nose varira, kao što je Minchin sumnjao, prema valnoj duljini svjetlosti - što je valna duljina kraća, to je veća snaga. Najkraća valna duljina, na primjer, sadrži fotone koji su oko četiri puta jači od onih najdužih. U materijalima poput selena, snažniji fotoni nose dovoljno energije da izbace slabo povezane elektrone iz njihovih atomskih orbita. Kada se žice pričvrste na šipke selena, oslobođeni elektroni teku kroz njih u obliku elektriciteta. Istraživači devetnaestog stoljeća proces su nazvali fotoelektričnim, ali 1920-ih znanstvenici su taj fenomen nazivali fotonaponskim efektom [6].

## 2.1. Karakteristike fotonaponskih ćelija

Osvijetljena solarna ćelija može osigurati određeni fotonapon pri danoj fotostruji. Kombinacija vrijednosti fotostruje i fotonapona na kojoj solarna ćelija može raditi naziva se radna točka. Određena radna točka solarne ćelije je fiksirana s otporom opterećenja (R) zbog Ohmovog zakona, formule (2-2).

$$R = \frac{U}{I} \quad (2-2)$$

U smislu Ohmovog zakona, fotonapon je vrlo nizak pri vrlo niskom  $R$ , a fotostruja je vrlo niska pri vrlo visokim  $R$ . Uvjeti rada solarne ćelije u kratkom i otvorenom spoju definirani su kao, a  $R$  koji je jednak nuli ili koji je beskonačno visok. Vrijednosti fotostruje i fotonapona u uvjetima kratkog i otvorenog spoja nazivaju se struja kratkog spoja ( $I_{ks}$ ) i napon otvorenog spoja ( $U_{os}$ ). Električna snaga je jednaka nuli u kratkom i otvorenom spoju solarne ćelije. Učinkovitost pretvorbe solarne energije je odlučujući parametar za troškove i održivost proizvodnje fotonaponske energije, koja se računa prema formuli (2-3). Dakle, zaključak je: Što je veća vrijednost  $\eta$ , to je manja količina materijala i površine potrebna za fotonaponsku elektranu i obrnuto.

$$\eta = \frac{P_{el}}{P_{sol}} = \frac{U \cdot I}{E \cdot A} \quad (2-3)$$

gdje je:

$P_{el}$  - Izlazna električna snaga

$P_{sol}$  - Snaga zračenja (najčešće Sunčevog)

$U$  - Efektivna vrijednost izlaznog napona

$I$  - Efektivna vrijednost izlazne struje

$E$  - Specifična snaga zračenja (npr. u  $W/m^2$ )

$A$  - Površina

## **2.2. Fizikalne osnove fotonaponskih ćelija**

Većina energije koja dopijeva u fotonaponsku ćeliju u obliku sunčeve svjetlosti gubi se prije nego što se može pretvoriti u električnu energiju. Maksimalna učinkovitost pretvorbe sunčeve svjetlosti u električnu energiju za solarne ćelije kreće se do 30% (i čak više za neke vrlo složene izvedbe (ćelija), ali tipično učinkovitosti su od 10% do 15%. Najnoviji rad na fotonaponskim ćelijama je usmjeren na povećanje učinkovitosti uz smanjenje troškova. Određeni fizički procesi ograničavaju učinkovitost fotonaponske ćelije – neki su svojstveni i ne mogu se mijenjati; mnogi se mogu poboljšati pravilnim dizajnom.

**Glavni fenomeni koji ograničavaju učinkovitost fotonaponske ćelije su:**

1. Refleksija od površine ćelije
2. Svjetlost koja nije dovoljno jaka da odvoji elektrone od njihovih atomskih veza
3. Svjetlo koje ima dodatnu energiju iznad potrebne, odvaja elektrone od veza
4. Elektroni i rupe koje stvara svjetlost (prazne veze) nasumično se susreću i rekombiniraju
5. Svjetlom generirani elektroni i šupljine koji su spojeni površinskim i materijalnim nedostacima u fotonaponskim ćelijama
6. Otpor pri proticanju struje

## 2.3. Prednosti i nedostaci fotonaponskih ćelija

Uz sve dobrobiti koje Sunce pruža, stupanj iskorištenosti Sunčeve energije i dalje nije iskorišten u potpunosti, uz brojne prednosti uporabe fotonaponskih sustava postoje i nedostaci pri uporabi istih.

### **Prednosti uporabe fotonaponskih sustava [7]:**

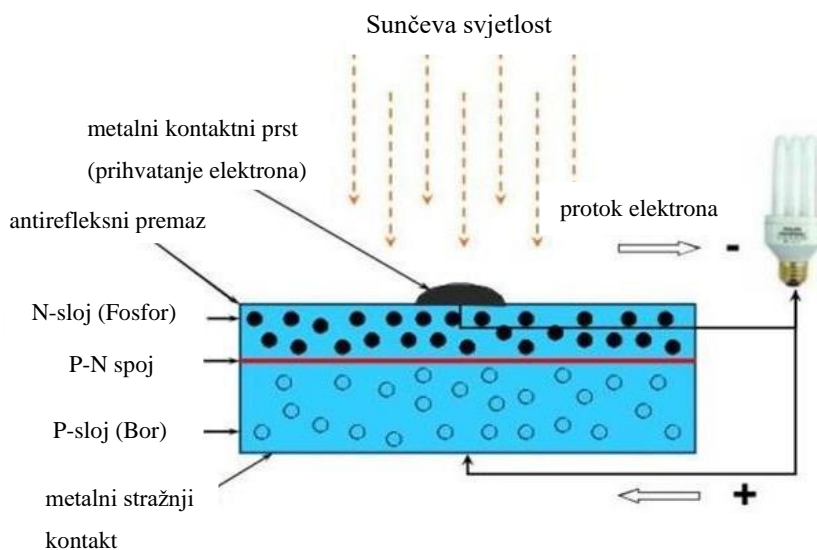
- Nema štetnih emisija stakleničkih plinova, stoga daju čistu, tj. Zelenu energiju
- Sunčeva energija je energija koju daje priroda, besplatna je i ima je u izobilju i kao takvu može biti dostupna svugdje gdje ima sunčeve svjetlosti
- Fotonaponski sustavi putem fotoelektričnog efekta proizvode električnu energiju na način izravne proizvodnje električne energije
- U usporedbi s ostalim obnovljivim izvorima energije troškovi se smatraju niskim, gotovo zanemarivim
- Imaju manje kvarova, zato što nemaju mehanički pomične dijelove (osim onih u slučajevima mehaničkih baza za praćenje sunca), stoga imaju manje kvarova i zahtijeva manje održavanja nego, npr. vjetroturbine
- Tihi su, ne proizvode buku
- Stambeni solarni paneli lako se postavljaju na krovove ili na tlo i takvi ne utječu na stambeni način života

## **Nedostatci uporabe fotonaponskih sustava [8]:**

- Problemi s prekidima, ukoliko je oblačno ili kišovito vrijeme
- Zahtijevaju dodatnu opremu poput invertera koji služi za pretvaranje istosmjerne električne energije u izmjeničnu koja se koristi u električnoj mreži
- Za kontinuiranu opskrbu električnom energijom, zahtijevaju i baterije za pohranu čime se povećavaju troškovi
- Ako se postavljaju na kopno, zahtijevaju velike površine za postavljanje na razdoblje od 15 do 20 godina, ili čak i duže
- Učinkovitost panela je niska, od 14% do 25%
- lako se mogu oštetiti jer su krhki, stoga se osiguravaju dodatni troškovi osiguranja koji su od najveće vrijednosti za zaštitu fotonaponskih sustava

### 3. FOTONAPONSKI SUSTAVI, MATERIJALI I TEHNOLOGIJE PROIZVODNJE

Tipična fotonaponska ćelija sastoji se od tanke pločice koja se sastoji od ultra tankog sloja silicija dopiranog fosforom (N-tip) na vrhu debljeg sloja silicija dopiranog borom (P-tip). Električno polje se stvara blizu gornje površine ćelije kada su ova dva materijala u kontaktu i naziva se PN spoj. Prema slici 3.1. kada sunčeva svjetlost udari u površinu fotonaponske ćelije, valentni elektroni (tj. elektroni u najudaljenijoj orbiti) sloja N-tipa apsorbiraju energiju, prekidaju veze i izlaze iz matičnog atoma. Apsorbirana energija, zajedno sa zamahom koji daje električno polje, stimulira elektrone i oni teku u vanjski krug (opterećenje). Kada elektron izađe iz matičnog atoma, na tom mjestu se stvara rupa. Drugim riječima, kada sunčeva svjetlost (fotoni) udari, u solarnoj ćeliji se stvara par elektron-rupa.



Slika 3.1, Princip rada fotonaponske ćelije [3]



Bez obzira na svoju veličinu, tipična silicijska solarna ćelija proizvodi od 0.5 do 0.6 V DC u uvjetima otvorenog kruga (bez priključenog opterećenja). Struja i izlazna snaga ćelije ovise o njezinoj učinkovitosti i veličini (površini) te su oni proporcionalni intenzitetu sunčeve svjetlosti koja pada na površinu ćelije. Primjerice: U uvjetima najveće sunčeve svjetlosti, tipična solarna ćelija s površinom od 160 cm<sup>2</sup> proizvodit će oko 2W vršne snage. Kada bi sunčeva svjetlost iznosila 40% vršne, tada bi ćelija proizvodila oko 0,8 W. Kod solarne energije jedan od glavnih parametara je trošak energije po isporučenoj jedinici (kWh). On ovisi o učinkovitost fotonaponske pretvorbe i o kapitalnom trošku po vatnom kapacitetu. Stoga, ova dva parametra najbolje pokazuju koliko je (ekonomski) fotonaponska električna energija konkurentna, učinkovitost pretvorbe fotonaponskih ćelija dana je formulom (3-1).

$$\eta = \frac{\textit{izlazna električna snaga}}{\textit{solarna energija koja djeluje na ćeliju}} \quad (3-1)$$

Poluvodiči s energetske procjepom između 1 i 1,5 eV imaju najveći potencijal za izgradnju učinkovite ćelije. Materijal koji se najčešće koristi za izradu fotonaponske solarne ćelije je kristalni silicij koji se još dijeli prema vrsti kristala i veličini kristala na: monokristalni silicij, polikristalni silicij, trakasti silicij. Silicij je četverovalentni prijelazni metal, atomskog broja 14 i atomske mase 28.0855. Poslije kisika, drugi je najzastupljeniji element na Zemlji i ima važnu primjenu u industriji, npr. može se koristiti kao vodič u raznim elektroničkim napravama, integriranim krugovima i mikročipovima.

### **3.1. Materijali dostupni za proizvodnju fotonaponskih ćelija**

Najčešći oblici za proizvodnju fotonaponskih ćelija su monokristalni silicij, polikristalni silicij te amorfni silicij. Silicij čini oko 27% Zemljine kore.

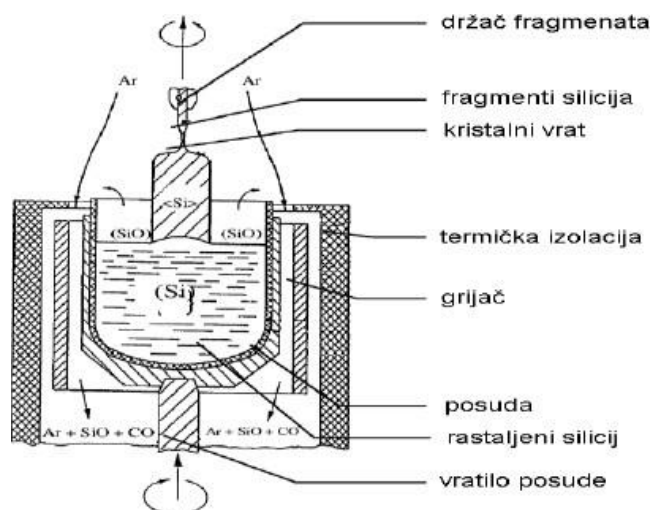
#### **3.1.1. Monokristalni silicij**

Monokristalne solarne ćelije prepoznatljive su po izrezanim rubovima i po njihovoj tamnocrnoj boji. Monokristalni silicij osnovni je materijal za integrirane sklopove na bazi silicija koji se koriste u gotovo cijeloj modernoj elektroničkoj opremi. Također, monokristalne solarne ćelije napravljene su od vrlo čistog oblika silicija, što ih čini najučinkovitijim materijalom kada je u pitanju pretvorba sunčeve svjetlosti u energiju [9]. Sastoji se od silicija u kojem je kristalna rešetka cijele krutine neprekinuta do svojih rubova i bez ikakvih granica zrna (tj. jednog kristala). Jedan je od najvažnijih tehnoloških materijala te zbog svojih poluvodičkih svojstava temelj je današnje elektronike i IT revolucije. Brojne su prednosti monokristalnih solarnih panela primjerice, imaju najvišu razinu učinkovitosti, od 15 do 20%, zahtijevaju manje prostora u odnosu na druge, proizvođači daju 25-godišnje jamstvo itd. Iako su najučinkovitije solarne ćelije, to ih stavlja i među najskupljima na tržištu, također prilikom proizvodnje monokristalni solarni paneli imaju puno otpadnog materijala kada se silicij reže tijekom proizvodnje [10].

Monokristalni silicij općenito se stvara jednom od nekoliko metoda koje uključuju taljenje silicija visoke čistoće, poluvodičkog razreda (samo nekoliko dijelova na milijun nečistoća). Najčešća proizvodna tehnika je metoda Czochralskog prikazana na slici 3.2, koja uranja točno orijentirani kristal montiran na šipku u rastaljeni silicij. Šipka se zatim polako povlači prema gore i istovremeno rotira, dopuštajući da se povučeni materijal skruti u monokristalni cilindrični ingot do 2 metra duljine i mase nekoliko stotina kilograma.

## **Prikaz 8 glavnih koraka u proizvodnji monokristalnih solarnih ćelija [11]:**

1. Napraviti metalurški silicij: Glavni sastojak koji čini monokristalne solarne panele je silicij poznat i kao silikatni pijesak, kvarcit ili  $\text{SiO}_2$
2. Pročistiti metalurški silicij Siemensovim postupkom
3. Stvaranje silicijskog ingota – potrebno je zametnuti kristal, koji je mala šipka čistog monokristalnog silicija umočiti u rastaljeni silicij i polako okretati kristal klice kako bi se umanjio učinak konvekcije u talini, tekući silicij skrućivat će se 4 dana stvarajući veliki homogeni cilindrični jednokristalni silicij, tj. Silicijski ingot
4. Stvaranje silicijskih pločica
5. Poboljšanje pločica – ohlapljivanje i jetkanje površina pločica radi bolje učinkovitosti i sprječavanje refleksija svjetla
6. Difuzija – za provođenje električne energije potreban je pn spoj, budući da su silicijske pločice pozitivno nabijene, dodaje se negativno nabijeni sloj fosfora svakoj pločici koje se zatim premještaju u posebne peći na  $900\text{ }^\circ\text{C}$  kako bi se ubrizgao fosfor s dušikom, ta mješavina dušika i fosfora rezultira učinkovitom pločicom pn spoja
7. Poboljšanje vodljivosti – za smanjenje gubitka električne energije koristi se legura srebra
8. Sastavljanje – svaki monokristalni solarni panel sastavljan je od 32 do 96 kristalnih pločica sastavljenih u redove i stupce, a broj ćelija u svakoj pločici određuje izlaznu snagu ćelije

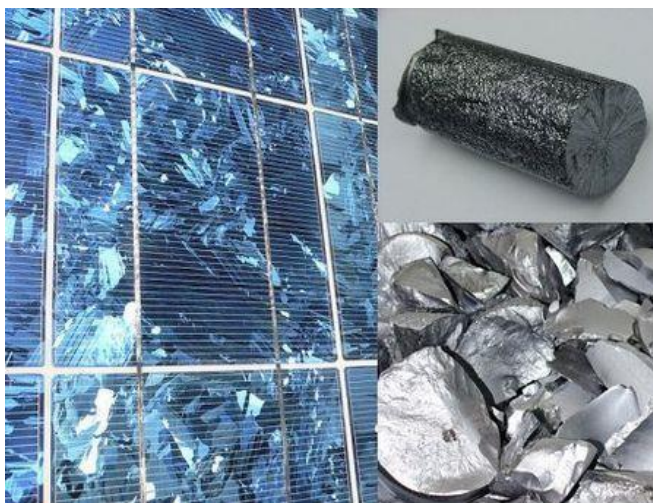


**Slika 3.2, Prikaz dobivanja monokristalnog silicija Czochralskijevom metodom [12]**

Ostale metode dobivanja monokristalnog silicija su zonsko taljenje, koje prolazi polikristalnu silicijsku šipku kroz radiofrekventnu grijaću zavojnicu koja stvara lokaliziranu rastaljenu zonu, iz koje izrasta ingot sjemenskog kristala (mali komad monokristalnog ili polikristalnog materijala iz kojeg se u laboratoriju uzgaja veliki kristal obično istog materijala), i Bridgmanove tehnike, koji pomiču lončić kroz temperaturni gradijent. Stvrdnuti ingoti se procesom eng. *wafering* izvodi pilom s više žica koja iz istog kristala reže više pločica u isto vrijeme, koje se zatim poliraju do željenog stupnja ravnosti i debljine.

### 3.1.2. Polikristalni silicij

Polikristalne ćelije također poznate su kao polisilicijske i multisilicijske ćelije. Bile su to prve solarne ćelije razvijene u industriji početkom 1980-ih. Karakteristične su po svome kvadratnom obliku koji se dobije da se prvo silicij rastali, a zatim izlije u četvrtasti kalup. U odnosu na monokristalne solarne ćelije, polikristalne ćelije cjenovno su pristupačnije, međutim manje su učinkovite i zahtijevaju puno više prostora. Jedan od glavnih nedostataka je da ne mogu funkcionirati na visokim temperatura, što je veliki problem u podnebljima koji imaju vruće klimatske uvjete [9]. Polikristalni silicij oblik je silicija visoke čistoće, koji se koristi kao sirovina u solarnoj fotonaponskoj i elektronskoj industriji. Polikristalni također poznati kao višekristalni ili višekristalni solarni paneli također su izrađeni od čistog silicija. Međutim, za razliku od monokristalnih, napravljeni su od mnogo različitih fragmenata silicija umjesto jednog čistog ingota. Razlika između proizvodnje mono i poli solarnih ćelija je u tome što se, nakon pročišćavanja silicija, umjesto polaganog povlačenja ingota kako bi se napravio homogeni cilindrični kristal (Czochralskijev proces), rastaljeni silicij ostavlja da se ohladi i fragmentira. Ti se fragmenti zatim tale u pećnicama i sipaju u kockaste posude. Nakon što se rastaljeni silicij skrutne, ingoti se režu na tanke pločice, zatim se poliraju, poboljšavaju, raspršuju i sastavljaju kao monokristalne ploče [14]. Prema tablici 3.4 dana je usporedba monokristalnih i polikristalnih solarnih panela.

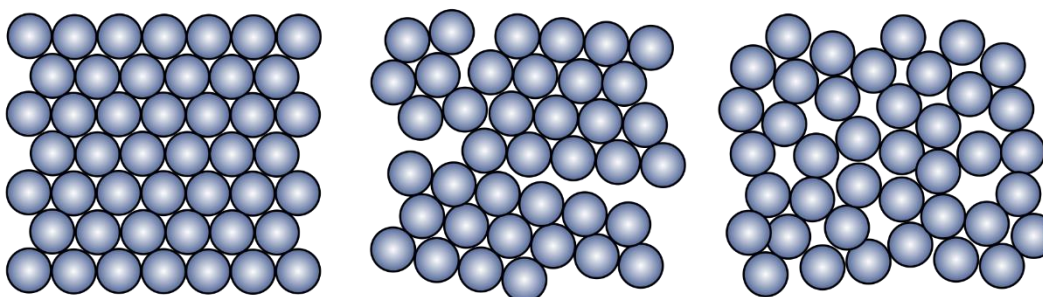


**Slika 3.3, Oblici polikristalnog silicija [13]**

**Tablica 3.4, usporedba monokristalnih i polikristalnih solarnih panela**

	<b>MONOKRISTALNI</b>	<b>POLIKRISTALNI</b>
<b>MATERIJAL</b>	Pojedinačni kristal čistog silicija	Različiti silikonski fragmenti rastaljeni zajedno
<b>IZGLED</b>	Ujednačeni tamni kvadrati sa zaobljenim rubovima	Plavi kvadrati bez zaobljenih rubova
<b>UČIKOVITOST PRETVORBE</b>	Od 15% do 20%	Od 13% do 16%
<b>PROSTORNA UČINKOVITOST</b>	učinkovit	manje učinkovit
<b>TEMPERATURNI KOEFICIJENT</b>	Od -0,3% do -0,5%	Od -0,3% do -1%
<b>ŽIVOTNI VIJEK</b>	oko 40 godina	oko 35 godina
<b>MOGUĆNOST RECIKLIRANJA</b>	da	da

Tablica 3.4. prikazuje usporedbu monokristalnih i polikristalnih solarnih panela, dok su na slici 3.5, prikazane su alotropske modifikacije silicija koje se koriste za izradu fotonaponskih ćelija.



**a) Monokristalni silicij**

**b) Polikristalni silicij**

**c) Amorfnj silicij**

**Slika 3.5 Prikazuje alotropsku modifikaciju silicija [15]**

### 3.1.3. Amorfni silicij

Amorfni silicij nekristalni je oblik silicija koji se koristi za solarne ćelije i tankoslojne tranzistore u LCD-ovima. Za razliku od kristalnog silicija, u kojem je raspored atoma pravilan, amorfni silicij ima nepravilan atomski raspored [16]. Kao rezultat toga, recipročno djelovanje između fotona i atoma silicija događa se češće u amorfnom siliciju nego u kristalnom siliciju, što omogućuje apsorpciju mnogo više svjetlosti. Budući da su lagani i fleksibilni, amorfne solarne panele često je lakše i jeftinije postaviti od tradicionalnih solarnih panela. Općenito se ne koriste u krovnim solarnim nizovima zbog svoje niske učinkovitosti. Međutim, mogu se postaviti na zakrivljene površine ili u manje prostore zbog njihove fleksibilnosti, što čini amorfne ploče potencijalno primjenjivima u zahtjevnim situacijama ugradnje [17]. Amorfne silicijske fotonaponske ćelije uglavnom imaju nisku učinkovitost, ali ih se zato smatra jednim od ekološki najprihvatljivijih fotonaponskih tehnologija, jer one ne koriste otrovne teške metale kao što su kadmij ili olovo. Slika 3.6. prikazuje oblik amorfnog silicija.



**Slika 3.6 Prikaz amorfnog oblika silicija [18]**

Također, postoje i drugi materijali koji se koriste u izradi fotonaponskih ćelija, a to su:

- a) Galij asrenid
- b) Tankoslojni Kandijev telurid fotonaponski modul
- c) Bakar indij selen
- d) Tankoslojni kristalni silicij
- e) Fotoosjetljivi pigmenti
- f) Organske/polimerne solarne ćelije



**Slika 3.7, Prikazuje galij asrenid [19]**



**Slika 3.8, Prikazuje tankoslojni kandijev telurid fotonaponski modul [20]**

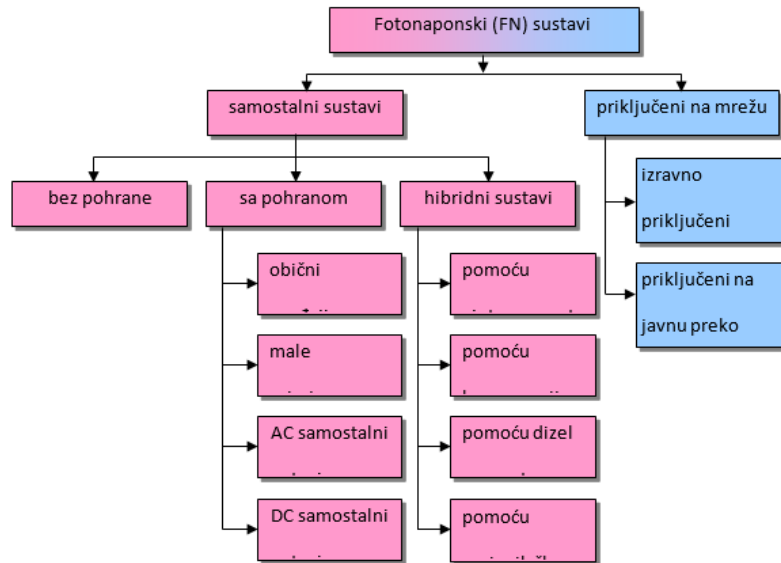


**Slika 3.9, Prikazuje bakar indij selen [21]**



### 3.2. Podjela fotonaponskih sustava

Fotonaponski sustavi mogu se podijeliti u dvije osnovne skupine, a to su mrežni fotonaponski sustavi koji su priključeni na javnu elektroenergetsku mrežu (on grid) i otočni fotonaponski sustavi koji nisu priključeni na mrežu (off grid), koji su prikazani na slici 3.10.



Slika 3.10, Prikaz osnovne podjele fotonaponskih sustava [22]

Osnovni dijelovi fotonaponskog sustava su fotonaponski moduli, fotonaponski izmjenjivač (inverter), montažna podkonstrukcija, te priključno mjerni ormar sa zaštitnom i instalacijskom opremom. Fotonaponski moduli pretvaraju sunčevu energiju u električnu energiju istosmjernog oblika, a fotonaponski izmjenjivač prilagođava tako proizvedenu energiju u oblik u kojem se može predati u javnu elektroenergetsku mrežu. Izmjenični napon se preko zaštitne i mjerne opreme predaje u elektroenergetsku mrežu. Inverteri moraju proizvesti kvalitetnu izmjeničnu struju odgovarajućeg napona koji moraju biti pogodni za mrežne fotonaponske sustave. Uloga mrežnih izmjenjivača je da osiguraju napon koji će biti u fazi s mrežnim naponom koja će kasnije omogućiti fotonaponskom sustavu da isporuči električnu energiju u sustav. Normirana veličina nazivnog napona iznosi 230V, između faznog i neutralnog vodiča i 400V, između faznih vodiča, za četverožilne trofazne mreže nazivne frekvencije 50 Hz, te se u normalnim uvjetima ne treba razlikovati od nazivnog napona više od  $\pm 10\%$  [23].

### 3.3. Svojstva i struktura fotonaponskih ćelija

Fotonaponski panel sastoji od niza fotonaponskih ćelija zaštićenih staklom s prednje strane i plastičnim materijalom sa stražnje strane. Cijeli je vakuumski inkapsuliran u polimeru što je moguće prozirnije. Pojedinačne komponente su [24]:

- **Fotonaponska solarna ćelija**

Ćelije su glavna komponenta i imaju funkciju uhvatiti sunčevu svjetlost i pretvoriti je u električnu energiju. Kristalne stanice mogu biti monokristalne ili polikristalne, u skladu s njihovim proizvodnim procesom. To međutim ne utječe na proizvodni proces fotonaponskog modula. Glavne tehničke karakteristike su: veličina, boja, broj sabirnica i prije svega učinkovitost pretvorbe. Potonji je glavni parametar koji utječe na izlaznu snagu ploče. U ovom razdoblju najzastupljenije ćelije su polikristalne s učinkovitošću od oko 17,6%, koje potječu od 250W fotonaponskog modula sa 60 ćelija. Stanice su međusobno povezane tankom bakrenom trakom obloženom kositrenom slitinom, koja se naziva vrpca.

- **Prednje staklo**

Prednje staklo je najteži dio fotonaponskog modula i ima funkciju zaštite i osiguravanja robusnosti cijelog fotonaponskog modula, održavajući visoku transparentnost. Debljina ovog sloja obično je 3,2 mm, ali može varirati od 2 mm do 4 mm, ovisno o vrsti odabranog stakla. Važno je obratiti pozornost na karakteristike kao što su kvaliteta stvrdnjavanja, spektralna propusnost i propusnost svjetla. Za fotonaponske sustave proučavana su neka posebna stakla s posebnim uzorkom na površini koji osigurava veći stupanj hvatanja svjetlosti. Pažljivim odabirom stakla, provjerom ovih značajki ili dodavanjem antirefleksnih slojeva, može se postići ukupno poboljšanje učinkovitosti modula.

- **Back-sheet**

Pojam back-sheet znači list na poleđini. Izrađen je od plastičnog materijala koji ima funkciju električne izolacije i zaštite fotonaponskih ćelija od vlage. Ovaj određeni list obično je bijele boje i dostupan je u rolama ili listovima. Postoje određene izvedbe koje se mogu razlikovati u debljini, boji i prisutnosti određenih materijala za veću zaštitu ili veću mehaničku čvrstoću.

- **Enakapsulant materijal**

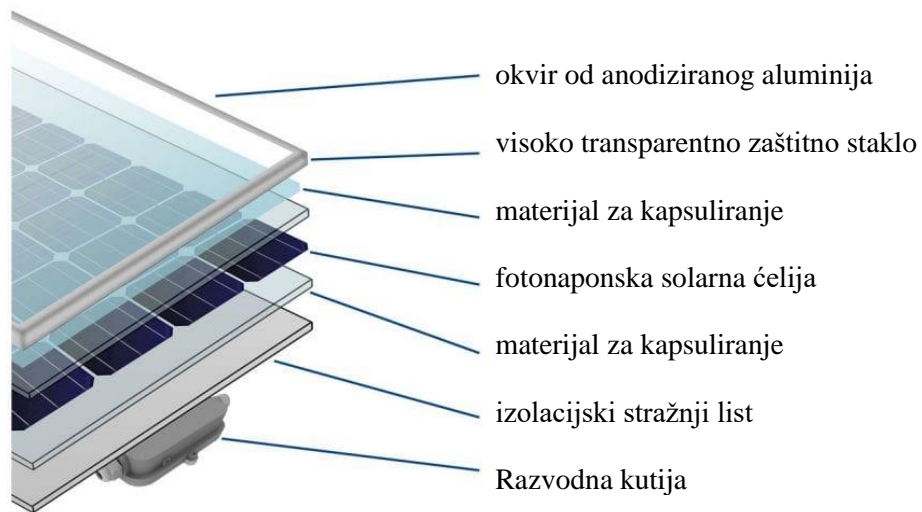
Jedan od najvažnijih materijala je enakapsulant, koji djeluje kao vezivo između različitih slojeva fotonaponskih panela. Najčešći materijal koji se koristi kao enakapsulant je EVA – etilen vinil acetat. Proziran polimer mora se izrezati u listove i odložiti prije i poslije fotonaponskih ćelija. Kada se podvrgne toplinskom procesu kuhanja u vakuumu, ovaj određeni polimer postaje sličan prozirnog gelu i uključuje fotonaponske ćelije. Kvaliteta ovog procesa, nazvana laminacija, osigurava dug radni vijek samog modula, dok kvaliteta enakapsulanta utječe na prijenos svjetlosti, brzinu procesa i otpornost na žutilo zbog UV zraka.

- **Okvir**

Jedan od posljednjih dijelova koji se sastavljaju je okvir. Obično je izrađen od aluminija i ima funkciju osigurati robusnost te praktično i sigurno spajanje na fotonaponski modul. Zajedno s okvirom, također se sloj brtvila nanosi oko stijenki panela kao barijera protiv vlage. U tu svrhu najčešće se koristi silikon, iako se ponekad koristi posebna brtvena traka. Za posebne primjene dostupni su i moduli bez okvira ili posebna plastična rješenja. Ova rješenja obično uključuju korištenje nosača zalijepljenih sa stražnje strane i modula s tehnologijom staklo-staklo.

- **Razvodna kutija**

Razvodna kutija ima funkciju izvođenja električnih priključaka fotonaponskih modula. Sadrži zaštitne diode za sjene i kabele za spajanje panela na terenu. Pri odabiru razvodne kutije vodimo računa o kvaliteti plastike, kvaliteti brtvljenja, vrsti spoja ribona i kvaliteti by-pass dioda. Tih su godina proizvedene i kutije s posebnim diodama s malim gubicima ili integrirane s mikro inverterima. Visoka cijena ovih rješenja još nije omogućila masovnu distribuciju.



**Slika 3.11, Prikaz sastava fotonaponske ćelije [24]**

Struktura i materijali koji se koriste u procesu proizvodnje fotonaponskih panela vrlo su slični neovisno o različitim vrstama rješenja. Zato temeljnu ulogu ima proces proizvodnje, istraživanje i iskustvo kako bi se postigli kvalitetni fotonaponski moduli.

## **4. PRIMJERI PRIMJENE I PRAVCI RAZVOJA FOTONAPONSKIH SUSTAVA**

Sve veća zabrinutost zbog klimatskih promjena, zdravlja, učinaka onečišćenja zraka, energetske sigurnosti i pristupa energiji, zajedno s nestabilnim cijenama nafte u posljednjih nekoliko desetljeća, doveli su do potrebe za proizvodnjom i korištenjem alternativnih opcija kao što su obnovljivi izvori energije. Solarni fotonaponski sustav je bio jedna od pionirskih tehnologija obnovljivih izvora energije 20. stoljeća. Ukupni instalirani kapacitet solarnih fotonaponskih sustava je dosegao 480 GW globalno do kraja 2018., predstavljajući drugi po veličini obnovljivi izvor električne energije nakon vjetra. U 2021. godini fotonaponski sustavi ponovno dominiraju ukupnim obnovljivim izvorima energije, dosežu oko 94 GW. Dosadašnja evolucija solarne fotonaponske industrije bila je izvanredna, s nekoliko postignutih prekretnica posljednjih godina u pogledu instalacija (uključujući izvan mreže), smanjenja troškova i tehnološkog napretka. Dakle, solarna energija će i dalje biti neophodna opcija obnovljivih izvora energije u nadolazećim desetljećima [25]. Daljnji rast solarne industrije uvelike ovisi o smanjenju ravnoteže sustava, što čini najveći dio ukupno instaliranog sustava troškova i ima najveći potencijal za smanjenje troškova [26].

### **4.1. Fotonaponski sustavi u svijetu**

Svakoga dana možemo svjedočiti različitim klimatskim promjenama i posljedicama koje one uzrokuju. Ekstremni događaji poput poplava, oluja, tornada, snažnih potresa sve su učestalije zbog klimatskih promjena. Svake godine meteorolozi mjere porast temperature zraka, utjecaj na to imaju staklenički plinovi koji zadržavaju toplinu u atmosferi, no glavnim uzrokom smatra se neograničeno sagorijevanje fosilnih goriva, pri čemu se misli na ugljen, prirodni plin i naftu koji uzrokuju oslobađanje ugljikovog dioksida u atmosferu, što čini Zemlju sve toplijom. Dakako, klimatske promjene ugrožavaju živi svijet, odnosno prijete izumiranju biljnih i životinjskih vrsta i ugrožavanju čovjekovog života. U nastojanju da spriječi ove navedene stvari Europska Unija donijela je Europski zeleni plan u kojemu se navodi da do 2050. godine [29]:

- neće biti neto emisija stakleničkih plinova

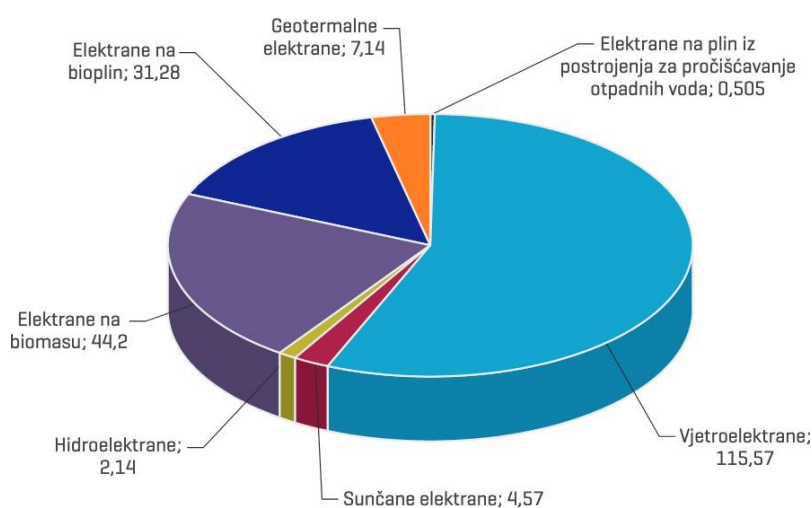
-gospodarski rast odvojen od korištenja resursa

-nijedna osoba i nijedno mjesto nije ostavljeno iza sebe.

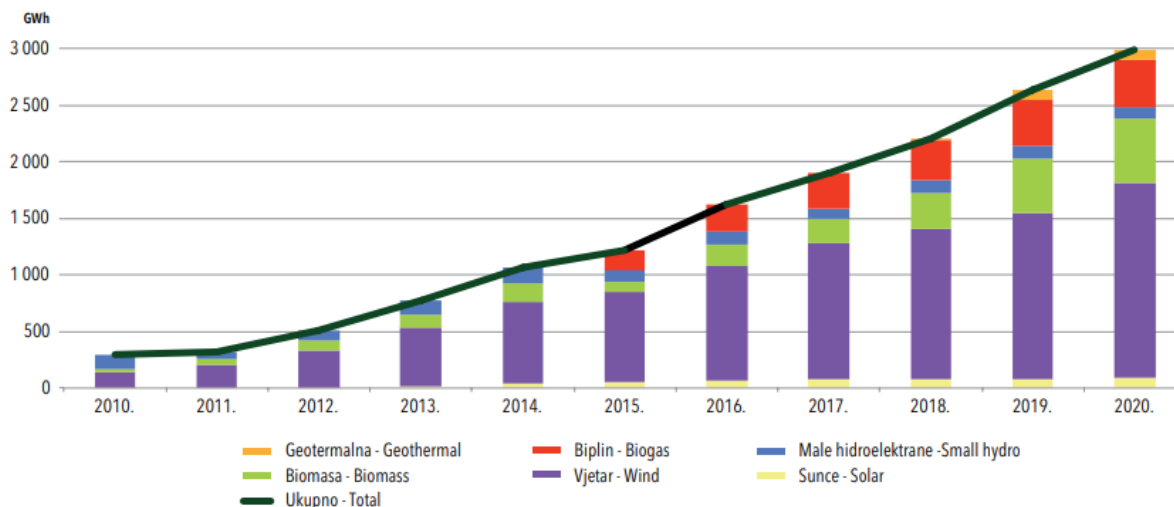
Time bi Europa postala prvi svjetski neutralni kontinent u emisijama stakleničkih plinova. Prema rangu Međunarodne agencije za energiju SAD, Vijetnam, Japan, EU i Kina vodeće su države po proizvodnji solarne energije. Isto tako Međunarodna agencija za energiju procjenjuje da proizvodnja solarne energije predstavlja uštedu od 860 milijuna tona emisija CO<sub>2</sub> svake godine. Kina je vodeća u svijetu i ima više od 48GW fotonaponskih kapaciteta u 2020., čime je instalirani kapacitet ukupno iznosio 256,3 GW.

## 4.2. Fotonaponski sustavi u Hrvatskoj

Kao jedna od članica Europske Unije, Hrvatska se obvezala na prihvaćanje europskog klimatskog paketa koji podrazumijeva i Direktivu 2009/28/EZ o poticanju i uporabi energije iz obnovljivih izvora pri čemu je udio energije iz obnovljivih izvora trebao iznositi najmanje 20%, na EU razini u bruto neposrednoj potrošnji. Ideja Direktive bila je smanjiti emisije stakleničkih plinova i ovisnosti o uvozu energije, te tako dodatno razviti obnovljive izvore. Prema podacima iz 2019. godine Hrvatska je imala 27,47% energije iz obnovljivih izvora u bruto konačnoj potrošnji, što će reći da je Hrvatska kao takva uspjela ispuniti obaveze prema EU. Nadalje, u 2020. godini s 27,47% proizvodnja je porasla na 31%. U toj proizvodnji najveći udio imale su velike hidroelektrane, zatim je slijedila energija vjetra, dok se energija Sunca, koja je prikazana na grafikonima na slikama 4.1. i 4.2, smjestila među zadnjima. Uporedbe radi u listopadu 2020. godine najveću proizvodnju električne energije imaju vjetroelektrane s 56%, a kod ostvarene proizvodnje također su na vrhu vjetroelektrane sa 78%, dok su sunčane elektrane na 6% [30].



**Slika 4.1, Struktura proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora do listopada 2020. godine (u GWh) [30]**



**Slika 4.2., Prikazuje proizvodnju električne energije iz OIE u Hrvatskoj u 2020. godini [30]**

### **4.3. Suvremeni materijali koji se istražuju za proizvodnju fotonaponskih modula**

Solarni moduli koji su komercijalno dostupni općenito se temelje na kristalnom Si, amorfnom-Si, CdTe i CIGS materijalima. Neke od vodećih tvrtki u ovom području su Yingli Green, First Solar, Suntech Power Co., SunPower on itd. Različite tvrtke pokušavale su povećati konačnu izlaznu snagu postupkom postavljanja solarnih panela. Umjesto jednostavnog skupljanja sunčeve svjetlosti koja sija na površine solarne ploče, nova tehnologija ima razvijen dodatak optičke opreme kao što su leće i zrcala za fokusiranje većih količina solarne energije na visoko učinkovite solarne ćelije (koncentrirana solarna energija, CSP). Iako bi ova tehnologija mogla neznatno povećati troškove proizvodnje u prednosti su CSP-a u odnosu na konvencionalne solarne ploče. Postoje i nadolazeće tehnologije za razvoj solarnih ćelija. Osnovni mehanizam takvih tehnologija je da se solarni paneli neprestano kreću sa suncem kako bi dobili dodatnu sunčevu svjetlosti. Mikrostrukture na polimernim naljepnicama imaju sposobnost savijanja i preusmjeravanja sunčeve svjetlosti koja povećava izlaznu snagu za oko 10% i više [31].



Nadalje, predmet istraživanja su i perovskiti, ti bi materijali također bili lagani, jeftini za proizvodnju i jednako učinkoviti kao današnji vodeći fotonaponski materijali, koji su uglavnom od silicija. Predmet su sve većeg istraživanja i ulaganja, ali tvrtke koje žele iskoristiti njihov potencijal solarne ćelije temeljene na perovskitu moraju biti komercijalno konkurentne. Izraz perovskit ne odnosi se na određeni materijal, poput silicija ili kadmijeva telurida već na cijeli niz spojeva. Vrsta solarnih materijala perovskit nazvana je po svojoj strukturalnoj sličnosti s mineralom perovskitom, koji je otkriven 1839. i nazvan po ruskom mineralogu LA Perovskom. Izvorni mineral perovskit, koji je kalcij-titanijev oksid ( $\text{CaTiO}_3$ ), ima prepoznatljivu kristalnu konfiguraciju. Ima trodijelnu strukturu, čije su komponente dobile oznake A, B i X, u kojoj su rešetke različitih komponenti isprepletene.

Skupina perovskit sastoji se od mnogih mogućih kombinacija elemenata ili molekula koje mogu zauzeti svaku od tri komponente i formirati strukturu sličnu onoj samog izvornog perovskita. Ta struktura isprepletenih rešetki sastoji se od iona ili nabijenih molekula, od kojih su dvije (A i B) pozitivno nabijene, a druga (X) negativno nabijena. A i B ioni obično su prilično različitih veličina, s time da je A veći. Jedna od velikih prednosti perovskita je njihova velika tolerancija na nedostatke u strukturi. Za razliku od silicija, koji zahtijeva izuzetno visoku čistoću da bi dobro funkcionirao u elektroničkim uređajima, perovskiti mogu dobro funkcionirati čak i s brojnim nesavršenostima i nečistoćama [32].

#### **4.4. Problemi recikliranja solarnih panela**

Solarni paneli obično se proizvode od stakla, polimera, aluminijske, silicij, olova, bakra i drugih metala. Silicij se inače može reciklirati, ali se kombinira s metalima poput kadmija i olova kako bi solarne ćelije bile vrlo učinkovite. Kada je riječ o recikliranju solarnih ploča, njihovo se staklo mora razbiti kako bi se riješili kadmija, olova i drugih štetnih kemikalija. Osim štetnih kemikalija moguće su i nečistoće. Ostala oprema u fotonaponskim sustavima sustavu poput baterija i pretvarača može se obraditi kako bi se pristupilo vrijednim materijalima koje sadrže. Baterije koje se koriste za fotonaponske sustave obično imaju prosječni životni vijek od oko 5 do 15 godina. Neke vrste baterija (olovne, kadmijeve) prikladnije je reciklirati od drugih (litij-ionske). Nekoliko tijela nadležnih za energetiku i otpad predlažu obvezno recikliranje što će rezultirati obećavajućim povećanjem tržišne vrijednosti recikliranih materijala. Neke tvrtke za proizvodnju solarnih panela imaju i svoje pogone za recikliranje. Te tvrtke potiču kupce da vrate svoje stare ploče po cijeni koja odgovara njihovoj vrijednosti u tom trenutku. Međutim, u nekim slučajevima troškovi recikliranja ploča nisu održivi, zbog čega neke tvrtke ne nude takvu mogućnost. Ovisno o njihovoj vrijednosti, mogu preprodati stare ploče koji još rade, ali uz nižu učinkovitost [33].

Neke zemlje trećeg svijeta ne mare previše za manje učinkovite ploče budući da imaju raspoloživo zemljište za postavljanje velike količine istih, a dobiti solarne energije u udaljenim područjima pomažu u rješavanju drugih problema. Solarnih panela mogu se udružiti s pružateljima usluga recikliranja kako bi postavili inovacije koje povećavaju povrat vrijednosti [34].

## 5. ZAKLJUČAK

Glavna komponenta solarne ćelije je silicij, koji se desetljećima koristi kao ključni dio u proizvodnji solarnih panela. Silicijske solarne ćelije često se nazivaju solarni paneli „prve generacije“. Razlog za naslov „prve generacije“ je taj što je tehnologija silicijskih solarnih ćelija počela imati značaj već 1950-ih. Stoga je to prvi oblik tehnologije solarnih ćelija. Međutim, treba napomenuti da je čisti kristalni silicij loš vodič električne energije budući da je u svojoj biti poluvodički materijal. Silicij koji se nalazi u solarnoj ćeliji ima niz nečistoća, pa se drugi atomi namjerno miješaju s atomima silicija. Time se rješavaju problemi vodljivosti jer pomiješani atomi poboljšavaju sposobnost silicija da uhvati energiju sunca i pretvori je u električnu energiju. Za sada tržištem dominiraju ćelije od kristalnog silicija, dok tehnologija tankog filma omogućuje značajne uštede materijala, fleksibilniju ugradnju fotonaponskih ćelija budući da se mogu savijati. Nadalje, solarne ćelije tankoslojne tehnologije imaju znatno kraći povrat uložene energetske učinkovitosti dok je, s druge strane, učinkovitost nešto manja, međutim silicij kao osnovni materijal apsolutno dominira, sa udjelom od 98,3%, od čega uglavnom tehnologija kristalnog silicija s 93,7% udjela u ukupnoj proizvodnji fotonaponskim sustava.

Mnogo je čimbenika koji mogu utjecati na učinkovitost solarnih panela, uključujući vremenske prilike, krhotine na panelu ili probleme s instalacijom. Uz to, svi solarni paneli testirani su pod standardnim ispitnim uvjetima kako bi se dobila točna i standardizirana ponuda učinkovitosti. Trenutačno najučinkovitiji solarni paneli dostupni na tržištu imaju oko 23 posto učinkovitosti. Točnije, solarni paneli visoke učinkovitosti tvrtke SunPower prepoznati su kao najučinkovitiji dostupni solarni paneli, s ocjenom od 22,8 posto. Ostali proizvođači koji proizvode neke od najučinkovitijih solarnih panela su LG (22 posto) i REC Solar (21,7 posto). Sadašnja istraživanja pokazuju da se tehnologija koju koristi NREL (The National Renewable Energy Laboratory - Nacionalni laboratorij za obnovljivu energiju transformira energiju kroz istraživanje, razvoj, komercijalizaciju i primjenu tehnologija obnovljive energije i energetske učinkovitosti.) za stvaranje solarnih ćelija s učinkovitošću od 47,1 % može podesiti da dosegne učinkovitost od 50 posto u budućnosti. Ova se tehnologija razlikuje od tradicionalnih uređaja solarnih ćelija jer postoji 140 slojeva od šest poznatih kolektorskih materijala koji se koriste za izradu ove visokoučinkovite panele.

## SAŽETAK

Solarni paneli su oni uređaji koji se koriste za prikupljanje sunčevih zraka i njihovo pretvaranje u električnu energiju ili toplinu. Solarni panel zapravo je skup solarnih (ili fotonaponskih) ćelija, koje se mogu koristiti za proizvodnju električne energije putem fotonaponskog efekta. Te su ćelije raspoređene u obliku mreže na površini solarnih ploča. Većina solarnih panela izrađena je od solarnih ćelija od kristalnog silicija. Postavljanje solarnih panela u domove pomaže u borbi protiv štetnih emisija stakleničkih plinova i tako pomaže u smanjenju globalnog zatopljenja. Solarni paneli ne dovode do zagađenja i čisti su izvori energije. Oni također smanjuju oslanjanje na fosilna goriva (koja su ograničena) i tradicionalne izvore energije.

## **SUMMARY**

Solar panels are those devices which are used to absorb the sun's rays and convert them into electricity or heat. A solar panel is actually a collection of solar (or photovoltaic) cells, which can be used to generate electricity through photovoltaic effect. These cells are arranged in a grid-like pattern on the surface of solar panels. Most solar panels are made of crystalline silicon solar cells. Installing solar panels in homes helps combat harmful greenhouse gas emissions and thus helps reduce global warming. Solar panels do not lead to any form of pollution and are clean. They also reduce reliance on fossil fuels (which are finite) and traditional energy sources.

## LITERATURA

- [1] "Fotonaponski sustavi," [Online]. Available: <https://eko-sustav.hr/strucni-clanci/fotonaponski-sustavi/>. [Accessed 25 Lipanj 2022.].
- [2] "First photovoltaic Devices," [Online]. Available: <https://www.pveducation.org/es/fotovoltaica/first-photovoltaic-devices>. [Accessed 25 Lipanj 2022.].
- [3] "The PV Cell History, Basics & Technologies," [Online]. Available: <https://slideplayer.com/slide/12053345/>. [Accessed 25 Lipanj 2022.].
- [4] "The selenium PV cell," [Online]. Available: <https://www.beta.pvcdrom.org/pvcdrom/manufacturing-si-cells/first-photovoltaic-devices>. [Accessed 25 Lipanj 2022.].
- [5] "A Brief History of Solar Panels," [Online]. Available: <https://www.smithsonianmag.com/sponsored/brief-history-solar-panels-180972006/>. [Accessed 25 Lipanj 2022.].
- [6] "The Invention Of The Solar Cell," [Online]. Available: <https://www.popsci.com/article/science/invention-solar-cell/#page-2>. [Accessed 25 Lipanj 2022.].
- [7] "Solar Power Advantages and Disadvantages," [Online]. Available: <https://www.sepcosolarlighting.com/blog/solar-power-advantages-and-disadvantages>. [Accessed 25 Lipanj 2022.].
- [8] "Advantages and disadvantages of photovoltaic solar energy conversion," [Online]. Available: <https://www.mechanicaleducation.com/2019/06/advantages-and-disadvantages-of-photovoltaic-energy-conversion.html>. [Accessed 25 Lipanj 2022.].
- [9] "What are silicon solar cells," [Online]. Available: <https://www.renewableenergyhub.co.uk/main/solar-panels/silicon-solar-cells/>. [Accessed 25 Lipanj 2022.].
- [10] "Monocrystalline solar panels," [Online]. Available: <https://www.renewableenergyhub.co.uk/main/solar-panels/monocrystalline-solar-panels/>. [Accessed 25 Lipanj 2022.].
- [11] "Monocrystalline vs Polycrystalline Solar Panels," [Online]. Available: <https://ases.org/monocrystalline-vs-polycrystalline-solar-panels/>. [Accessed 25. Lipanj 2022.].

- [12] A. Goetzberger i V. U. Hoffmann, Photovoltaic Solar Energy Generation, Pringer: 1st ed. Berlin, 2005.
- [13] Polycrystalline silicon,« [Mrežno]. Available: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Polysilicon\\_compilation.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Polysilicon_compilation.jpg). [Pokušaj pristupa 25. Lipanj 2022.].
- [14] "Polycrystalline Modules," [Online]. Available: <https://www.solarpowerworldonline.com/2012/02/polycrystalline-modules-101/>. [Accessed 25. Lipanj 2022.].
- [15] "Schematic\_of\_allotropic\_forms\_of\_silcon\_horizontal\_plain.svg," [Online].
- [16] "Amorphous vs monocrystalline vs polycrystalline solar panels," [Online]. Available: <https://www.redarc.com.au/poly-vs-mono-vs-amorphous-know-the-difference>. [Accessed 25 Lipanj 2022.].
- [17] "Amorphous solar panels," [Online]. Available: <https://news.energysage.com/amorphous-solar-panels/>. [Accessed 25 Lipanj 2022.].
- [18] "Irena Istra," [Online]. Available: [https://www.irena-istra.hr/uploads/media/Fotonaponski\\_sustavi.pdf](https://www.irena-istra.hr/uploads/media/Fotonaponski_sustavi.pdf) [Accessed 25 Lipanj 2022.].
- [19] »DS New Energy,« [Mrežno]. Available: <https://si.dsnsolar.com/solar-panel/mono-solar-panel/315w-hjt-solar-pv-panel.html>. [Pokušaj pristupa 25. Lipanj 2022.].
- [20] »Uber-Thin Modular Solar Panels Energize Any Building,« [Mrežno]. Available: <https://inhabitat.com/uber-thin-modular-solar-panels-energize-any-building/sulfurcell-sc-cis/>. [Pokušaj pristupa 25. Lipanj 2022.].
- [21] »New Atlas,« [Mrežno]. Available: <https://newatlas.com/self-dusting-solar-panels/16104/>. [Pokušaj pristupa 25. Lipanj 2022.].
- [22] "Solarni toplinski sustavi," [Online]. Available: <https://www.hsuse.hr/?tehnologija#solarnipotonaponskisustavi>. [Accessed 25 Lipanj 2022.].
- [23] R. Foster, M. Ghassemi and A. Cota, Solar energy renewable energy and the environment, London, New York: CRC Press, 2009.
- [24] "The structure of photovoltaic module," [Online]. Available: <https://ecoprogetti.com/the-structure-of-photovoltaic-module/>. [Accessed 25. Lipanj 2022.].

- [25] "Future of solar photovoltaic," [Online]. Available: [https://irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Nov/IRENA\\_Future\\_of\\_Solar\\_PV\\_2019.pdf](https://irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Nov/IRENA_Future_of_Solar_PV_2019.pdf). [Accessed 25 Lipanj 2022.].
- [26] "Future of solar energy," [Online]. Available: <https://energy.mit.edu/research/future-solar-energy/>. [Accessed 25 Lipanj 2022.].
- [27] "Solar Photovoltaic Panels," [Online]. Available: [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2016/IRENA\\_IEAPVPS\\_End-of-Life\\_Solar\\_PV\\_Panels\\_2016.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2016/IRENA_IEAPVPS_End-of-Life_Solar_PV_Panels_2016.pdf). [Accessed 25 Lipanj 2022.].
- [28] "Europski zeleni plan," [Online]. Available: [https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal\\_hr](https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_hr). [Accessed 25 Lipanj 2022.].
- [29] "Solar energy," [Online]. Available: [https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/solar-energy\\_en](https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/solar-energy_en). [Accessed 25. Lipanj 2022.].
- [30] "Ministarstvo gospodarstva i održivog razvoja," [Online]. Available: [https://mingor.gov.hr/UserDocsImages/UPRAVA%20ZA%20ENERGETIKU/Ostali%20dokumenti/Energija\\_u\\_Hrvatskoj\\_2020-1.pdf](https://mingor.gov.hr/UserDocsImages/UPRAVA%20ZA%20ENERGETIKU/Ostali%20dokumenti/Energija_u_Hrvatskoj_2020-1.pdf). [Accessed 25. Lipanj 2022.].
- [31] "Materials Research and Opportunities in Solar (Photovoltaic) Cells," [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/282962744\\_Materials\\_Research\\_and\\_Opportunities\\_in\\_Solar\\_Photovoltaic\\_Cells/link/59b0a49faca2728472cce051/download](https://www.researchgate.net/publication/282962744_Materials_Research_and_Opportunities_in_Solar_Photovoltaic_Cells/link/59b0a49faca2728472cce051/download)
- [32] "Materials Discovery," [Online]. Available: <https://www.nrel.gov/pv/materials-discovery.html>. [Accessed 25. Lipanj 2022.].
- [33] "Is Solar Panel Recycling a Problem?," [Online]. Available: <https://werecolesolar.com/is-solar-panel-recycling-a-problem/>. [Accessed 25. Lipanj 2022.].
- [34] "Solar panels," [Online]. Available: <https://www.technologyreview.com/2021/08/19/1032215/solar-panels-recycling/>. [Accessed 25 Lipanj 2022.]



## **ŽIVOTOPIS**

Martina Pavić rođena je 03.05.2000. godine u Osijeku, Republika Hrvatska. Osnovnu školu pohađala je do 2015. godine kada upisuje I. gimnaziju Osijek. Nakon završenoga srednjoškolskog obrazovanja, 2019. godine upisuje prvu godinu sveučilišnog studija, smjer elektrotehnika, na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek.