

Primena različitih prirodnih pigmenata kao fotoosetljive komponente u solarnim ćelijama

Ekstrahovani prirodni pigmenti korišćeni su kao fotoosetljiva komponenta u solarnim ćelijama treće generacije (eng. dye-sensitized solar cells). Korišćeni su pigmenti koji pripadaju antocjanima (aronija, kupina, malina, višnja, borovnica), kurkuminoidima (kurkuma), hlorofila, kao i mešavinama ovih pigmenata. Ćelije su izrađene u konfiguraciji: fotoanoda (film TiO_2 prekriven pigmentom) / elektrolit na bazi jodida / pomoćna elektroda (tanak film platine). Debeli film TiO_2 napravljen je depozicijom prethodno sintetisane paste TiO_2 doctor-blade tehnikom na FTO stakla i termičkom obradom na 500°C . Za potrebe fotonaponskih merenja konstruisan je solarni simulator sa referentnim intenzitetom zračenja (1000 W/m^2) i spektralnim poklapanjem sa Sunčevim zračenjem. Od ćelija sa pojedinačnim pigmentom, najbolje rezultate dala je ćelija sa kurkumom ($V_{OC} = 405 \text{ mV}$, $I_{SC} = 19 \mu\text{A}$), dok je ubedljivo najbolje karakteristike imala solarna ćelija sa kombinacijom prirodnih pigmenata aronija/ kurkuma/hlorofil ($V_{OC} = 408 \text{ mV}$, $I_{SC} = 60 \mu\text{A}$), potvrđujući tezu da raznovrsniji apsorpcioni spektar fotoosetljive komponente rezultuje boljim fotonaponskim karakteristikama ćelije.

Uvod

Usled sve većih zahteva za energijom u svetu i smanjenja do sada korišćenih resursa, sve više se radi na pronalaženju alternativnih rešenja. Uz vetrogeneratore, solarne ćelije su trenutno najprikladniji koncept, jer osim što se svrstavaju u

obnovljive izvore energije, njihov proces proizvodnje energije ne predstavlja ekološki rizik.

Međutim, električna energija dobijena iz solarnih ćelija i dalje ima visoku cenu, zbog skupe i zahtevne proizvodnje, kao i ograničenog radnog veka. Nasuprot komercijalno dostupnim ćelijama prve i druge generacije (kristalni silicijum, polikristalni silicijum, amorfni silicijum, CdTe, CuInGaSe₂), ćelije tzv. treće generacije imaju odnos cene i performansi koja im omogućava proboj na tržištu. Narочito se ističu tzv. ćelije sa fotoosetljivom bojom (eng. dye-sensitized solar cells), čija efikasnost konverzije solarne energije dostiže 11.04% pri standardnom osvetljenju od 1000 W/m^2 (Gratzel 2005).

Struktura ćelije sa fotoosetljivom bojom i njen operativni mehanizam

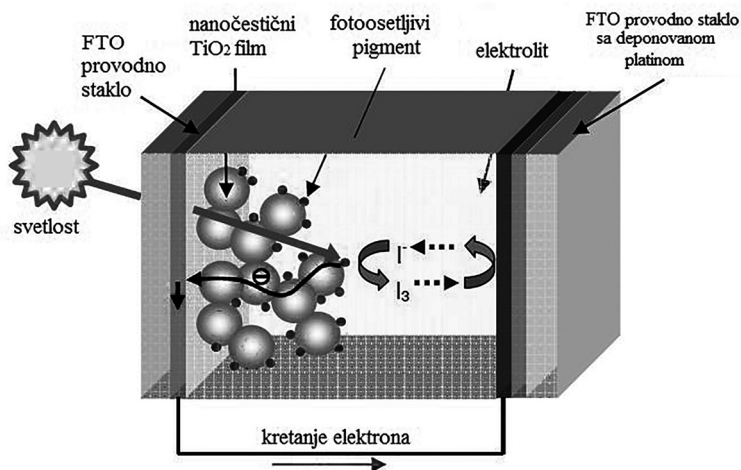
Solarne ćelije sa fotoosetljivom bojom sastoje se od fotoaktivne anode, elektrolita i pomoćne platinske elektrode. Fotoaktivnu elektrodu čini porozni sloj titan(IV)-oksida, visoke specifične površine, koji je deponovan na transparentno provodno staklo, i na kojem su adsorbovani molekuli fotoosetljive boje. Provodljivosti stakla doprinosi tanak sloj fluorom dopiranog kalaj-oksida (FTO), čija debljina od oko 220 μm omogućava transport fotogenerisanih nosilaca naelektrisanja. Prostor između elektroda ispunjen je elektrolitom na bazi joda.

Pri prodoru zračenja u ćeliju kroz transparentno provodno staklo, molekuli boje bivaju pobuđeni i preko provodne zone poluprovodničkog TiO_2 dolaze do spoljnjeg električnog kola. Gubitak elektrona molekuli boje kom-

Irena Đorđević (1996), Niš, Bulevar Nemanjića 7/25, učenica 3. razreda Gimnazije „Svetozar Marković” u Nišu

Stefan Ilić (1996), Čičevac, Stevana Sinđelića 65, učenik 3. razreda Gimnazije „Svetozar Marković” u Nišu

MENTOR: Nikola Tasić, Institut za multidisciplinarna istraživanja, Odsek za nauku o materijalima, Univerzitet u Beogradu



Slika 1. Šematski izgled solarne ćelije sa fotoosetljivim pigmentom

Figure 1. Schematic representation of the dye-sensitized solar cell

penziju preko elektrolita (jod se oksiduje), dok elektrolit nadoknađuje izgubljene elektrone na pomoćnoj elektrodi (slika 1). Dakle, operativni mehanizam solarnih ćelija sa fotoosetljivom bojom omogućava generisanje električne energije bez ireverzibilne hemijske promene u ćeliji.

Solarne ćelije, prave se od poluprovodničkih materijala (u našem slučaju titan(IV)oksid), čija struktura obezbeđuje kretanje elektrona u jednom smeru. Kod poluprovodničkih materijala jedna od karakteristika je širina zabranjene zone koja predstavlja energiju koju je potrebno predati elektronu da bi prešao iz valentne u provodnu zonu, i time postao prenosilac električne struje. Poluprovodnici imaju širinu zabranjene zone od 0 do 3.5 eV.

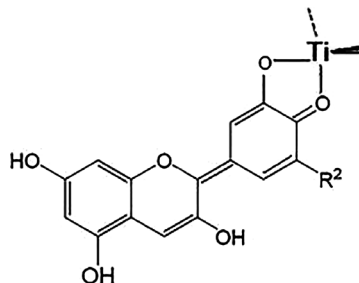
Molekuli boje igraju ključnu ulogu u proizvodnji električne energije. Njihova uloga je da apsorbuju fotone, tj. da prevaziđu malu apsorpcionu moć titan(IV)-oksida, i samim tim povećaju efikasnost solarne ćelije. Prema tome, što je veća apsorpciona moć boje, time je i ćelija efikasnija. Ćelije najveće efikasnosti koriste metal-organske komplekse na bazi rutenijuma kao fotoosetljivu komponentu, ali njihova visoka cena predstavlja prepreku značajnijoj komercijalizaciji. Alternativno rešenje mogu predstavljati lako dostupni prirodni pigmenti: antocijani, kurkumin, hlorofil i drugi, što je i predmet našeg istraživanja. Ispitali smo mogućnost upotrebe pojedinačnih pigmenta ekstrahovanih iz namirnica i biljaka, a na osnovu njihovih apsorpcionih

svojstava, razmotrili smo i mogućnost primene kombinovanih pigmenta.

Prirodni pigmenti

Biljni pigmenti korišćeni u našem istraživanju za pospešenje apsorpcione moći ćelija bili su antocijani, kurkuminoidi i hlorofil.

Antocijani su biljni pigmenti koji se mogu javljati u različitim bojama (crvenoj, plavoj ili ljubičastoj) u zavisnosti od pH vrednosti. U najvećoj koncentraciji ih ima u plodovima i cvetovima. Novu primenu su našli u solarnim ćelijama jer imaju značajnu apsorpciju u vidljivom delu spektra, s tim da samo antocijani sa prisutnim -O i -OH vezama mogu da služe kao fotoosetljive komponente, zbog mogućnosti vezivanja za titan(IV)-oksid (slika 2).

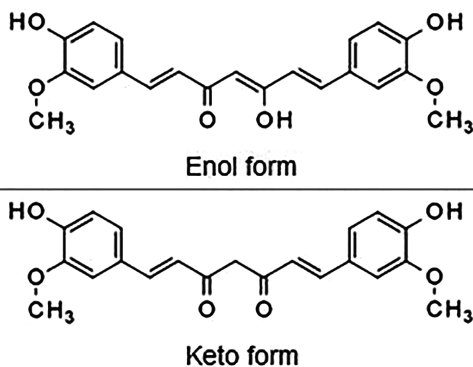


Slika 2. Vezivanje antocijana za TiO₂.

Figure 2. Anthocyanin and TiO₂ chelation

Hlorofil je zeleni biljni pigment poznat po vršenju fotosinteze, konverziji sunčeve energije, zahvaljujući čemu je našao primenu i u solarnim ćelijama sa identičnom funkcijom, pa se može reći da ova vrsta solarnih ćelija funkcioniše na principu „veštačke fotosinteze”. Hlorofil a poznat je kao glavni fotosintetički pigment, dok pigmenti b, c i d služe kao tzv. pomoćni biljni pigmenti. Njihovi apsorpcioni spektri pokrivaju različite talasne dužine, a njihov količinski odnos u telu viših biljaka zavisi od spektralne raspodele svetlosti kojoj su izložene. Pigment a je zbog raznovrsnijeg apsorpcionog spektra zastupljeniji u višim slojevima biljaka gde je osvetljenost veća, dok su pomoćni hlorofili zastupljeniji u nižim slojevima, apsorbujući svetlost koju su krošnje propustile.

Kurkumin je predstavnik kurkuminoida koji se nalazi u indijskom začinu kurkumi. U začinu postoje još dve vrste kurkuminoida (desmetoksikurkumin i bis-desmetoksikurkumin) i svi su oni članovi porodice đumbira (*Zingiberaceae*). Kurkuminoidi, kao i antocijani spadaju u fenole, s tim da kurkuminoidi daju izrazito žutu boju, zbog koje se koriste za bojenje hrane (prehrambena oznaka E100). Kurkumin ima bar dve tautomerne forme, keto i enol formu, gde se keto forma obično nalazi u čvrstom stanju, dok enol najčešće u tečnom (slika 3).



Slika 3. Kurkumin

Figure 3. Curcumin

Materijali i metode

Konstrukcija solarne ćelije obuhvata ekstrakciju pigmenta, pripremu titan(IV)-oksida filmova, pripremu elektrolita i na kraju sklapanje ćelije.

Ekstrakcija pigmenta. Za pripremu rastvora antocijana vršena je ekstrakcija pigmenta iz sledećih namirnica (po 50 g namirnice): kupine, maline, višnje, aronije i borovnice. Rastvor kurkumina napravljen je upotrebom komercijalnog začina kurkume, dok je hlorofil ekstrahovan iz lišća (50 g). Postupci pripreme uključivali su rastvaranje navedenih masa sirovina u etanolu i prečišćavanje filtracijom. U slučaju hlorofila korišćen je petroletar kao rastvarač. Za potrebe kombinovanja pigmenta, mešani su rastvori aronije, kurkume, hlorofila i aronije, borovnice, hlorofila. Pripremljeni rastvori, bilo da se radilo o pojedinačnom pigmentu ili kombinaciji pigmenta, skladišteni su na sobnoj temperaturi i mračnom mestu, da bi se sprečila njihova fotodegradacija.

Meren je apsorpcioni spektar svakog uzorka na UV-Vis spektrofotometru, pri čemu su uzorci pojedinačnih pigmenta bili uniformne koncentracije (0.1 mL rastvora na 10 mL etanola).

Priprema TiO₂ filmova. Postupak za pripremu filmova, preuzet iz rada Ito *et al.* (2007), prilagođen je našim instrumentalnim mogućnostima realizovan je po sledećoj proceduri:

1. Pomešati prah TiO₂ (0.5 g) i sirćetnu kiselinu (0.3 mL) u avanu i mešati 5 min
2. Dodati vodu (0.3 mL) i mešati, ponoviti postupak 3 puta
3. Dodati etanol (0.3 mL) i mešati, ponoviti postupak 3 puta
4. Dodati 10 mL etanola uz mešanje
5. Prebaciti u čašu
6. Držati u ultrazvučnom kupatilu 5 min
7. Dodati terpinel (1.8 mL)
8. Držati u ultrazvučnom kupatilu 20 min
9. Dodati etil-celulozu (0.25 g) i etanol (5 mL)
10. Držati u ultrazvučnom kupatilu 20 min
11. Upariti

Korišćen je nanočestični prah TiO₂ (Sigma Aldrich, < 25 nm, 99.7% metals basis). Voda i sirćetna kiselina su dodate zbog doprinosa meha-

ničkim svojstvima filmova, tj. dobroj adheziji za supstrat i sprečavanju nastanka pukotina. Terpeneol je dodat radi sprečavanja rasta čestica, a etil-celuloza radi postizanja poroznosti filmova, usled dekompozicije tokom termičkog tretmana.

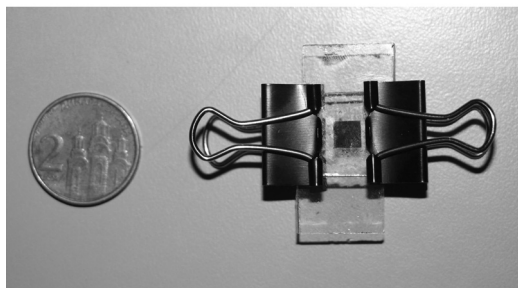
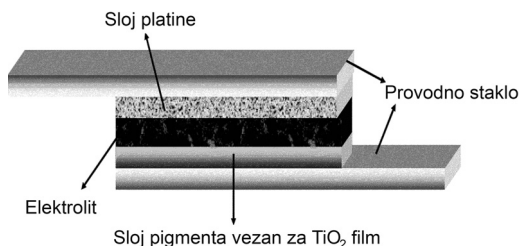
Filmovi su deponovani doctor-blade tehnikom na provodna FTO stakla. Pravljeni su filmovi kvadratnog oblika, dimenzija 5×5 mm, početne debljine 40 μm, odnosno finalne debljine 10-11 μm, nakon sušenja i termičkog tretmana. Filmovi su nakon depozicije ostavljeni na sobnoj temperaturi nekoliko minuta, da bi potom svaki film zbog kalcinacije bio tretiran postupkom: 120°C/10 min, na 250°C/10 min, na 400°C/10 min, na 450°C/5 min, i konačno na 500°C/15 min. Filmovi su potom prebačeni u rastvore pigmentata i ostavljeni 24 časa na 25°C i mračnom mestu. Filmovi su prilikom bojenja zagrejani na 80°C da bi se sprečilo neželjeno vezivanje vlage iz vazduha za TiO₂.

Priprema elektrolita. U 20 mL etilen glikola rastvoreno je 1.66 g kalijum jodida (0.5M KI) i 0.254 g joda (0.05M I₂) na temperaturi 50°C uz mešanje.

Sklapanje ćelija. Nakon bojenja, filmovi su pažljivo isprani etanolom i destilovanom vodom, a nakon sušenja toplim vazduhom spojeni sa pomoćnom platinskom elektrodom i pričvršćeni pomoću štipaljki. Platinska transparentna elektroda pripremljena je doctor-blade depozicijom komercijalno dostupne platinske paste (Platisol T/SP, Solaronix) na FTO staklu i daljim termičkim tretmanom na 450°C tokom 30 minuta. Nakon spajanja elektroda, pritisak štipaljki je neznatno popušten i omogućen je dodatak elektrolita u međuprostor između elektroda iglom i špricom, čime je završen proces sklapanja ćelije (slika 4).

Karakterizacija. Morfološke karakteristike pripremljenih filmova TiO₂ ispitane su skenirajućom elektronskom mikroskopijom (SEM). UV-Vis-NIR spektroskopskom analizom snimljeni su refleksijski i transmisioni spektri filmova, kao i apsorpcioni spektri rastvora pigmentata. Iz refleksijskih spektara filmova, preko Kubelka-Munk transformacije i Tauc linearizacije, utvrđena je širina zabranjene zone TiO₂.

Strujno-naponska karakteristika solarnih ćelija snimana je na osvetljenju specijalno dizajniranog solarnog simulatora, simultanim očitava-



Slika 4. Presek ćelije po slojevima (gore) i finalni izgled ćelije (dole)

Figure 4. Dye-sensitized solar cell assembly (above) and finished solar cell (below)

vanjem intenziteta struje i napona pomoću multimetara, pri različitim opterećenjima.

Filing faktor (FF) solarne ćelije predstavlja odnos maksimalne snage ($P_{\max} = U_{\max} I_{\max}$) i proizvoda struje kratkog spoja (I_{SC}) i napona otvorenog kola (U_{OC}):

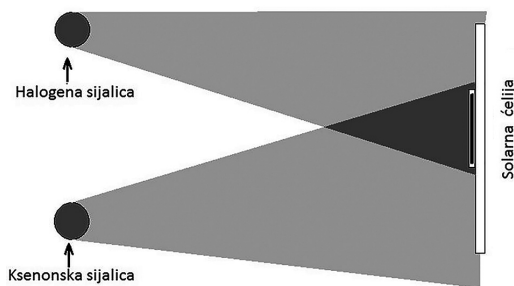
$$FF = \frac{U_{\max} I_{\max}}{U_{OC} I_{SC}}$$

Stepen korisnog dejstva ili efikasnost solarne ćelije (η) određuje se kao odnos maksimalne snage (P_{\max}) i snage sunčevog zračenja (P_u), tj. odnos iskorišćene energije i ukupne energije sunčevog zračenja koja pada na solarnu ćeliju:

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_u} = \frac{U_{\max} I_{\max}}{GS}$$

gde je G – intenzitet zračenja solarnog simulatora (1000 W/m²), a S – površina solarne ćelije koja je izložena sunčevom zračenju (Kostić 2010).

Izrada solarnog simulatora. Intenzitet Sunčevog zračenja nije konstantan i zavisi od vremenskih prilika i doba dana, pa se po dogovoru uzima usrednjena vrednost od 1000 W/m². Za

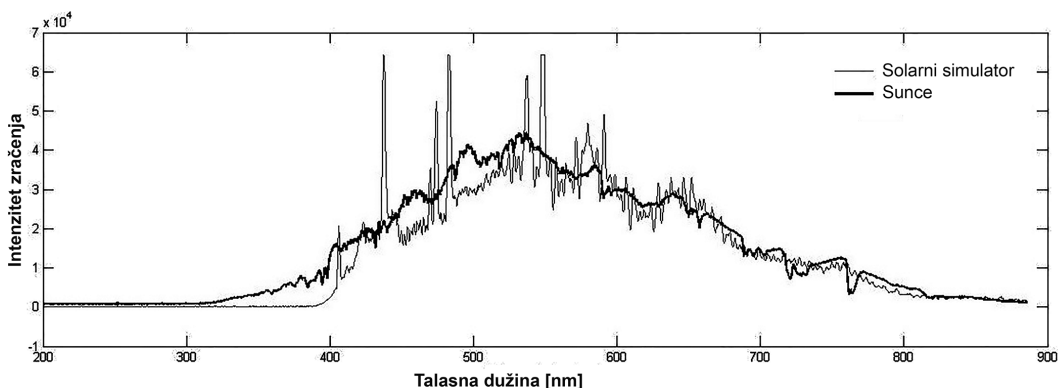


Slika 5. Šema solarnog simulatora.

Figure 5. Optical layout of the solar simulator

reproduktivne uslove merenja solarnih ćelija, bilo je potrebno koristiti solarni simulator koji osim intenziteta od 1000 W/m^2 ima i spektralno poklapanje sa Sunčevim zračenjem.

Za potrebe karakterizacije pripremljenih solarnih ćelija, dizajniran je sistem po uzoru na rad Georgescu *et al.* 2008, i koji zadovoljava navedene zahteve. Sistem se sastoji od dva svetlosna izvora, halogene sijalice 12 V/50 W i ksenonske sijalice 12 V/35 W (slika 5), koji zbirno daju jako dobro poklapanje sa standardom definisanim Sunčevim zračenjem (slika 6).



Slika 6. Uporedni prikaz spektara Sunca i simulatora.

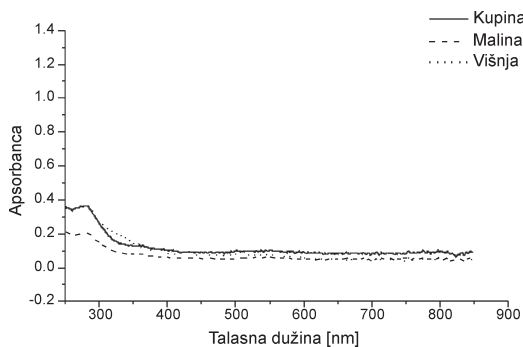
Figure 6. Simulator spectrum (dashed line) compared with the solar spectrum (bold line)

Rezultati i diskusija

Apsorpcioni spektri pripremljenih rastvora kupine, maline i višnje pokazuju slab odziv u UV oblasti, za razliku od intenzivnijih i raznovrsnijih spektara rastvora aronije, borovnice, hlorofila i kurkume. Na slici 7 se može videti da rastvori kupine, maline i višnje imaju gotovo identične apsorpcione spektre sa pikovima na istim talasnim dužinama, jednim u UV oblasti i drugim slabo izraženim u vidljivoj oblasti oko 550 nm.

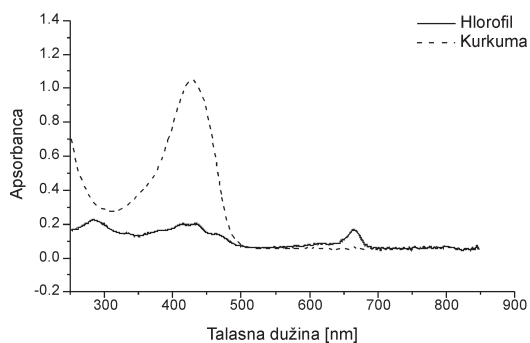
Rastvori aronije i borovnice beleže slično apsorpciono ponašanje (slika 8), ali sa izraženijim pikovima u UV i vidljivoj oblasti. Treba spomenuti da aronija i borovnica imaju veću koncentraciju antocijana po jedinici mase u odnosu na kupinu, malinu i višnju (Alhamed *et al.* 2012), što je jedan od razloga za intenzivnije spektre (uzimane su iste količine rastvora za karakterizaciju).

Spektar kurkume poseduje širok pik u vidljivoj oblasti koji pokriva oblast 400-500 nm (slika 9). Hlorofil ima slabo apsorpciono ponašanje u najvećem delu spektra, ali za razliku od ostalih ispitivanih rastvora, poseduje apsorpcioni pik na približno 670 nm.



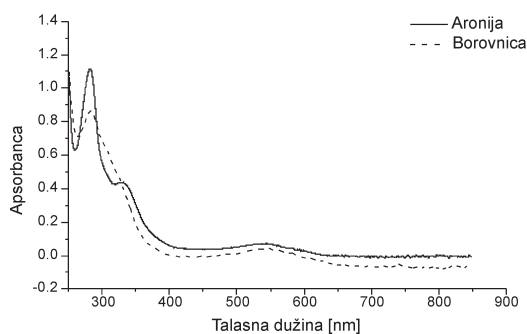
Slika 7. Apsorpcioni spektri kupine, maline i višnje

Figure 7. Absorption spectrum of blackberries (solid line), raspberries (dashed) and cherries (dotted) dye solutions



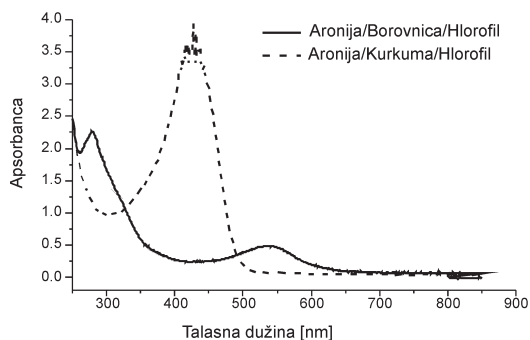
Slika 9. Apsorpcioni spektri hlorofila i kurkume

Figure 9. Absorption spectrum of chlorophyll (solid line) and turmeric (dashed line) dye solutions



Slika 8. Apsorpcioni spektri aronije i borovnice

Figure 8. Absorption spectrum of chokeberries (solid line) and blueberries (dashed line) dye solutions



Slika 10. Apsorpcioni spektri kombinacije pigmentata aronija–borovnica–hlorofil i aronija–kurkuma–hlorofil. U oba slučaja je odnos 1 : 1 : 1.

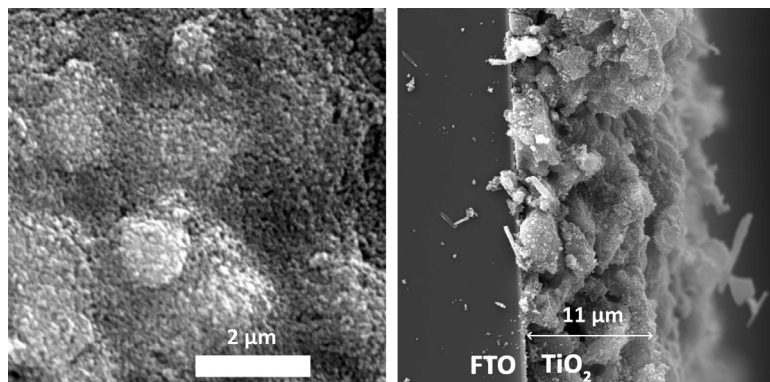
Figure 10. Absorption spectrum of a combination of natural dyes solution: chokeberries–blueberries–chlorophyll (solid line) and chokeberries–turmeric–chlorophyll (dashed line). Both cases are a ratio of 1 : 1 : 1.

Rezultati analiza pojedinačnih rastvora sugerišu da bi kombinacija više pigmentata mogla rezultovati raznovrsnijim ukupnim spektrom, što je i potvrđeno merenjima. Na slici 10 prikazan je kombinacija pigmentata aronija/borovnica/hlorofil i aronija/kurkuma/hlorofil.

Analiza filmova TiO_2 skenirajućom elektronskom mikroskopijom potvrđuje prisustvo razvijene površine i porozne strukture. Utvrđen je prečnik nano-čestica TiO_2 filma koji iznosi

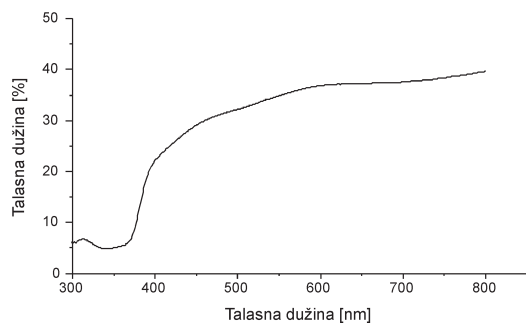
oko $2 \mu\text{m}$. Ovo je neophodan preduslov za efikasnu fotoelektrodu, jer omogućava veliku adsorpciju boje i kontakta između boje i elektrolita. Snimanjem poprečnog preseka filma utvrđena je debljina filma od $11 \mu\text{m}$ (slika 11).

Osim toga, sintetisani filmovi pokazuju značajnu transparentnost u vidljivoj oblasti spektra, što je i potvrđeno spektroskopskim merenjem (slika 12). Snimanjem refleksionih spektara i



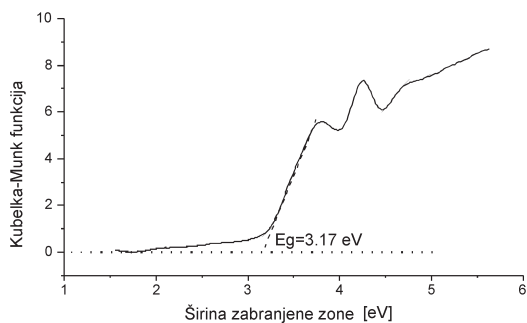
Slika 11.
SEM prikaz morfologije
TiO₂ filma (levo), poprečni
presek TiO₂ filma (desno)

Figure 11.
SEM image of the TiO₂ on
conductive FTO glass
surface (left) and its cross
section (right)



Slika 12. Transmisioni spektar TiO₂ filma

Figure 12. Optical transmission spectra of the TiO₂ film



Slika 13. Određivanje širine zabranjene zone TiO₂

Figure 13. Kubelka-Munk plots and band gap energy estimation of TiO₂ nanoparticles

manipulacijom podataka pomoću Kubelka-Munk transformacije i Tauc linearizacije, utvrđena je širina zabranjene zone (energetskog procepa) TiO₂, koja iznosi 3.17 eV (slika 13), i koja je u skladu sa literaturnim vrednostima (Kubelka 1948).

Strujno-naponske karakteristike ćelija sa antocijanima imaju sličan izgled, i različite vrednosti napona otvorenog kola (V_{OC}) i struje kratkog spoja (I_{SC}). Naročito dobar naponski odziv pokazuje ćelija sa kurkumom, dok najbolji strujni odziv ima ćelija sa višnjom i malinom kod ćelija sa pojedinačnim pigmentima (tabela 1). Na žalost, nestabilnost rastvora maline i višnje, odnosno njihovo brzo vrenje, onemogućuje kombinaciju ovih pigmenta sa ostalim rastvorima.

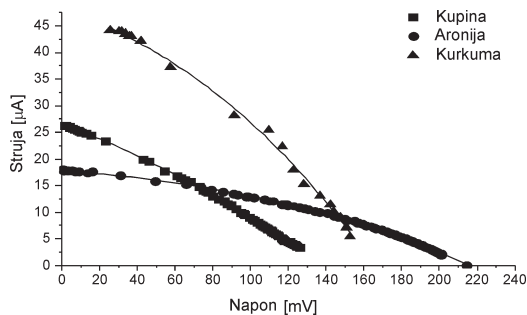
Kombinacija pigmenta pokazuje veći naponski odziv koji seže i do 408 mV. Najbolja kombinacija pigmenta je kurkuma/aronija/hlorofil koja ima strujni odziv od 60 μA, potvrđujući pretpostavku da raznovrsniji i intenzivniji spektralni odziv rezultuje boljim fotonaponskim karakteristikama (Kantesaria 2014).

Strujno-naponske karakteristike ćelija pojedinačnih pigmenta ukazuju na to da najveći filing faktor ima ćelija kurkume (49%), tj. da je ona najbliža idealnoj ćeliji, to pokazuje i najbolji izgled strujno-naponske krive kurkume (slika 14).

Kod strujno-naponskih karakteristika ćelija kombinovanih pigmenta, možemo primetiti da kriva kombinacije aronija/kurkuma/hlorofil ima

Tabela 1. Fotonaponski parametri ćelija sa različitom fotoosetljivom komponentom.

Rastvor	Napon otvorenog kola (mV)	Struja kratkog spoja (μA)	Filing faktor	Efikasnost (%)
Kupina	210.0	19.0	0.26	0.0042
Malina	104.0	30.5	0.19	0.0024
Višnja	165.0	47.0	0.35	0.0109
Borovnica	138.0	11.2	0.34	0.0021
Kurkuma	405.0	19.0	0.49	0.0151
Aronija	214.2	18.0	0.36	0.0055
Hlorofil	14.9	8.9	0.24	0.0001
Aronija/kurkuma/hlorofil	408.0	60.0	0.41	0.0402
Aronija/borovnica/hlorofil	355.0	21.0	0.23	0.0069



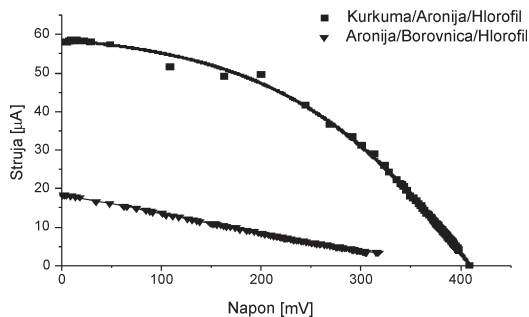
Slika 14. Strujno-naponska karakteristika ćelija pojedinačnih pigmenata

Figure 14. Current-Voltage curve of DSSCs illuminated at 1.5AM stained with blackberry, chokeberry and turmeric dye

bolji izgled, što i potvrđuje vrednost filing faktora od 41% (slika 15). Naši rezultati uodnosu na ostale radove imaju manju efikasnost i filing faktor ćelija, ali ipak porediv sa ostalim ćelijama ovakve vrste (Souad *et al.* 2013).

Zaključak

Ekstrahovanjem iz prirodnih izvora (kupina, malina, višnja, borovnica, kurkuma, aronija, hlorofil) pripremljeni su rastvori pigmenata koji su korišćeni kao fotoosetljive komponente u solarnim ćelijama. Osim toga, doctorn-blade tehnikom pripremljeni su debeli filmovi TiO_2 , koji su igrali ulogu porozne potpore fotooset-



Slika 15. Strujno-naponska karakteristika ćelija kombinovanih pigmenata

Figure 15. Current-Voltage curve of DSSCs illuminated at 1.5AM stained with combination of natural dyes solution (chokeberries, blueberries, chlorophyll and chokeberries, turmeric, chlorophyll) with a ratio of 1:1:1

ljivim molekulima u ćelijama. Filmovi su deponovani iz paste, koja je prethodno sintetisana polazeći od komercijalno dostupnog praha i organskih funkcionalnih agenasa. Mikroskopskom analizom filmova, utvrđeno je da filmovi poseduju neophodnu poroznu strukturu, kao i optimalnu debljinu od 10-11 mm. Filmovi su pokazali odlična mehanička svojstva u pogledu adhezije i odsustva pukotina. Na osnovu rezultata spektroskopskih merenja pojedinačnih rastvora pigmenata, napravljene su mešavine pigmenata sa ciljem što veće spektralne pokrivenosti. Za potrebe fotonaponskih merenja kon-

struisan je solarni simulator sa intenzitetom zračenja od 1000 W/m^2 i poklapanjem sa Sunčevim spektrom.

Od pojedinačnih pigmenata naročito dobar odziv imala je kurkuma ($V_{OC} = 405 \text{ mV}$, $I_{SC} = 19 \text{ mA}$), dok je ćelija sa mešavinom aronija/kurkuma/hlorofil dala ubedljivo najveće fotonaponske parametre ($V_{OC} = 408 \text{ mV}$, $I_{SC} = 60 \text{ mA}$), potvrđujući tezu da raznovrsniji apsorpcioni spektar pigmenta rezultuje boljim fotonaponskim karakteristikama.

U poređenju sa ostalim radovima (Alhamed *et al.* 2012, Souad *et al.* 2013), efikasnosti naših ćelija su manje, ali ipak uporedive sa ostalim ćelijama ovakve vrste. Prvenstveno to je zbog slabije homogenizacije paste (u radu Ito *et al.* 2007 je korišćena ultrazvučna sonda visoke snage), slabe pokrivenosti infracrvenog dela spektra kod solarnog simulatora, kao i nedostatka naprednih funkcionalnih komponenata u elektrolitu. Umesto teško dostupnog litijum-jodida, koji pokazuje bolje performanse ćelije kada se koristi kao elektrolit, korišćen je kalijum-jodid. Osim toga, bitno je napomenuti da su ove ćelije apsolutno ekološki čiste i da ne sadrže niti jednu supstancu koja može predstavljati opasnost po životnu sredinu.

Zahvalnost. Zahvaljujemo se mentoru Nikoli Tasiću i Odseku za nauke o materijalima, Instituta za multidisciplinarna istraživanja, pri Univerzitetu u Beogradu, na pruženoj saradnji i tehničkoj podršci.

Literatura

Alhamed M., Issa A., Doubal A. W. 2012. Studying Of Natural Dyes Properties As Photo-Sensitizer For Dye Sensitized Solar Cells (Dssc). *Journal of Electron Devices*, **16**: 1370.

Georgescu A., Damache G., Girtu A. M. 2008. Class A Small Area Solar Simulator For Dye-Sensitized Solar Cell Testing. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, **10** (11): 3003.

Gratzel M. 2005. Solar Energy Conversion by Dye-Sensitized Photovoltaic Cells. *Inorganic Chemistry*, **44**: 6841.

Ito S., Chen P., Comte P., Nazeeruddin K. M., Liska P., Pechy P., Gratzel M. 2007. Fabrication of screen-printing pastes from TiO_2 powders for dye-sensitized solar cells. *Progress in Photovoltaics: Research And Applications*, **15**: 603.

Kantesaria S. 2014. Optimization of Dye-Sensitized Solar Cells (DSSCs) Through Co-adsorption and Tri-adsorption of Organic Dyes. *North Carolina School of Science and Mathematics, Chronicle of The New Researcher*, **1** (1): 13.

Kostić Lj. 2010. Fizičke karakteristike hibridnog kolektora sa koncentrisanim sunčevim zračenjem – doktorska disertacija, Univerzitet u Nišu, Prirodno-matematički fakultet, Odsek za fiziku, Višegradska 33, 18000 Niš

Kubelka P. 1948. New contributions to the optics intensely light scattering materials. Part I. *Journal of the Optical Society of America*, **38**: 448.

Souad A., Alaei I., Sopyan I. 2013. Natural Photosensitizers for Dye Sensitized Solar Cells. *International Journal of Renewable Energy Research*, **3** (1)

Irena Đorđević and Stefan Ilić

The Application of Combined Natural Pigments in Dye-Sensitized Solar Cells

Dye-sensitized solar cells (DSSCs) were prepared using natural dyes and their mixtures for investigating the best cell performance. The pigments used were curcumin, chlorophyll and anthocyanins, which were extracted from blackberry, raspberry, chokeberry, blueberry and cherry. For the anode preparation, nano- TiO_2 paste was synthesized, deposited onto FTO conducting glass substrate, calcined at 500°C , and then immersed in the dye solution. In addition, iodide electrolyte was used for assembling the cells. The illumination used for the cells was

from the homemade solar simulator, created with xenon and halogen lamp, set to show the best spectral and light intensity match with the sun (1000 W/m^2). Absorption spectra were obtained from all the dye samples in order to compare the best spectral coverage with the cell performance. Curcumin separately ($V_{OC} = 405 \text{ mV}$, $I_{SC} = 19 \mu\text{A}$) and the mixture of curcumin/chokeberry/chlorophyll gave the best results ($V_{OC} = 408 \text{ mV}$, $I_{SC} = 60 \mu\text{A}$), which confirmed the predictions that better spectral coverage provides better cell performance. However, not all cells behaved as expected. The non-uniformity of the results is due to the unstable dye solutions and relatively short life span of DSSCs.

