

Sveučilište u Splitu
Prirodoslovno – matematički fakultet

Bojom senzibilizirane solarne ćelije

Završni rad / Bachelor thesis

Petra Bilela

Split, rujan 2022.

Temeljna dokumentacijska kartica

Sveučilište u Splitu
Prirodoslovno – matematički fakultet
Odjel za fiziku
Ruđera Boškovića 33, 21000 Split, Hrvatska

Završni rad

Bojom senzibilizirane solarne ćelije

Petra Bilela

Sveučilišni preddiplomski studij Fizika

Sažetak:

Neobnovljivi izvori energije će se iscrpiti te je nužno prijeći na obnovljive izvore energije. Sunce je neiscrpan izvor energije koji se ni približno dovoljno ne iskorištava što je velika prednost solarnim ćelijama općenito. Bojom senzibilizirane solarne ćelije pripadaju trećoj generaciji solarnih ćelija, a ističu se zbog niske cijene, širokog raspona mogućnosti primjene, jednostavne strukture i načina rada. S obzirom na ogroman napredak u efikasnosti u zadnjih nekoliko desetljeća, te većoj zainteresiranosti znanstvenika, očekivano je povećanje efikasnosti u bližoj budućnosti. Dakle, imaju brojne prednosti, a nedostaci se konstantno poboljšavaju te je neupitan njihov ogroman potencijal, pa je očekivano da će u budućnosti značajan udio iskorištene energije biti proizveden ovim ćelijama.

- Ključne riječi:** bojom senzibilizirane solarne ćelije, obnovljivi izvori energije, solarna energija
- Rad sadrži:** 18 stranica, 14 slika, 0 tablica, 26 literaturnih navoda. Izvornik je na hrvatskom jeziku
- Mentor:** izv. prof. dr. sc. Željana Bonačić Lošić
- Ocjenjivači:** izv. prof. dr. sc. Željana Bonačić Lošić
izv. prof. dr. sc. Larisa Zoranić
dr. sc. Lucija Krce
- Rad prihvaćen:** 26. rujna 2022.

Rad je pohranjen u knjižnici Prirodoslovno – matematičkog fakulteta, Sveučilišta u Splitu.

Basic documentation card

University of Split
Faculty of Science
Department of Physics
Ruđera Boškovića 33, 21000 Split, Croatia

Bachelor thesis

Dye sensitized solar cells

Petra Bilela

University undergraduate study programme Physics

Abstract:

Non-renewable energy sources will be exhausted, so it is necessary to switch to renewable energy sources. The sun is an inexhaustible source of energy that is not used nearly enough, which is a big advantage for solar cells in general. Dye sensitized solar cells belong to the third generation of solar cells, and they stand out due to their low price, various application possibilities, simple structure and working principle. Considering the enormous progress in efficiency in the last few decades, and the greater interest of scientists, an increase in efficiency is expected in the near future. So, they have numerous advantages, and the disadvantages are constantly improving, and their great potential is unquestionable, so it is expected that in the future a significant share of the used energy will be produced by these cells.

- Keywords:** dye sensitized solar cells, renewable energy sources, solar energy
- Thesis consists of:** 18 pages, 14 figures, 0 tables, 26 references. Original language: Croatian
- Supervisor:** Asoc. Prof. Dr. Željana Bonačić Lošić
- Reviewers:** Asoc. Prof. Dr. Željana Bonačić Lošić
Asoc. Prof. Dr. Larisa Zoranić
Dr. Lucija Krce
- Thesis accepted:** September 26, 2022.

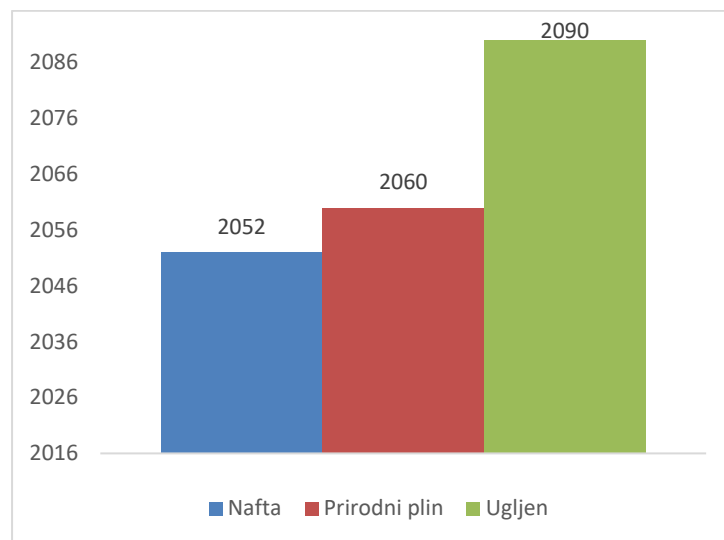
Thesis is deposited in the library of the Faculty of Science, University of Split.

Sadržaj

1	Uvod	1
2	Struktura	3
3	Način rada.....	6
4	Strujno naponska karakteristika.....	9
5	Nedostaci i kako poboljšati	13
6	Primjena.....	15
7	Zaključak	16
8	Literatura.....	17

1 Uvod

Korištenje obnovljivih izvora energije u budućnosti biti će neizbježno. Iako nam neobnovljivi izvori pružaju više energije od obnovljivih izvora, njihova zaliha će se iscrpiti. Također je bitno navesti da njihovim korištenjem dovodimo do onečišćavanja i time ugrožavanja okoliša. Sagorijevanjem fosilnih goriva oslobađaju se plinovi koji loše utječu na zdravlje ljudi i životinja. Među emitiranim plinovima je i ugljikov dioksid, staklenički plin koji je jedan od uzročnika globalnog zatopljenja. S obzirom na to da se godišnja potrošnja neobnovljivih izvora energije može nepredvidljivo mijenjati i da su uzeti u obzir do tada (2016.) otkriveni izvori fosilnih goriva, znanstvenici su izračunali kada bi svi izvori fosilnih goriva trebali nestati te su rezultati prikazani na slici 1.



Slika 1. Predviđeno trajanje izvora fosilnih goriva (podaci preuzeti s [https://ourworldindata.org/\[1\]](https://ourworldindata.org/[1])).

Dakle, u kratkom vremenu obnovljiva energija mora postati glavni izvor korištene energije. Usavršavanjem iskorištavanja obnovljive energije ona će postati jeftinija. Velika prednost toga jest što, za razliku od neobnovljivih izvora energije, cijena obnovljivih izvora energije ne ovisi o političkim situacija u državama koje ih proizvode. Obnovljivi izvori energije sami proizvode energiju potrebnu za rad, što znači da bi cijene struje bile fiksne. Obnovljivi izvori energije trenutno nisu dostupni u mnogim državama.[2]

Sunce je obnovljiv izvor energije koji je jeftin, pogodan za iskorištavanje te dostupan preko dana. Sunčevo zračenje proizvodi toplinu i svjetlost te se već stoljećima koristi u razne svrhe. Najvažnija primjena sunčeve energije jest pretvaranje iste u električnu energiju pomoću solarnih ćelija. Jako malo dostupne sunčeve energije se iskorištava. Najveća mana solarne energije je visoka cijena njenog pohranjivanja. Ideja o iskorištavanju sunčeve energije već se stoljećima istražuje, a jedan od najbitnijih događaja je otkriće fotoelektričnog učinka 1839. godine. Nakon otkrića efekta za postizanje spomenutog učinka prvo su se koristili kristali

silicija. Njemački znanstvenik Hertz otkrio je da kada je materijal obasjan svjetlošću, dolazi do izbijanja slobodnih elektrona s površine materijala. Također je primijetio da energija izbijanja ne ovisi o intenzitetu svjetlosti nego o valnim duljinama i frekvenciji zračenja. Zahvaljujući ovom otkriću, danas solarne ćelije rade na principu fotoelektričnog učinka. Ovisno o vremenu kada su se koristile, odnosno kako su bile otkrivene i o svojstvima materijala, solarne ćelije dijelimo u tri generacije. Bojom senzibilizirane solarne ćelije pripadaju trećoj generaciji koja se počela razvijati 1990-ih godina. Treća generacija s obzirom na efikasnost nije isplativija od ostalih, ali se trenutno radi na njezinom poboljšanju.

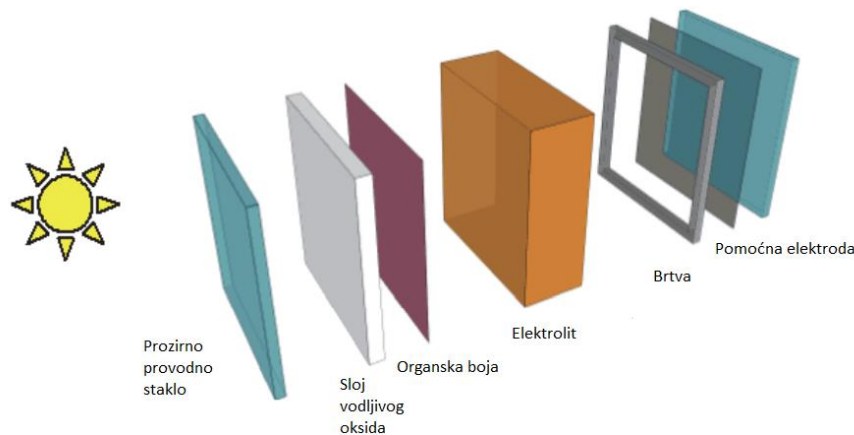
Početak razvoja bojom senzibiliziranih solarnih ćelija (skraćeno DSSC eng. „Dye sensitized solar cells“) započeo je 1960-ih godina kada se otkrilo da osvijetljena organska boja može proizvesti električnu energiju na poluvodičkim elektrodama u elektrokemijskoj ćeliji. Ime „Bojom senzibilizirana solarna ćelija“ dao je Michael Grätzel 1991. godine, a po njemu se ona često naziva i Grätzelova ćelija. Njegova ideja, dobivanje solarne fotonaponske energije, temeljena je na principu fotosinteze kod biljaka.[3]

Efikasnost bojom senzibiliziranih solarnih ćelija danas doseže i do 12% što je veliki napredak od početnih pokušaja. Efikasnost DSSC-a je još uvijek dosta manja od efikasnosti druge generacije solarnih ćelija čija je efikasnost 20-30%. Maksimalna efikasnost DSSC-a je prema teorijskim predviđanjima trebala biti oko 20%, ali s obzirom na to što su bojom senzibilizirane solarne ćelije popularna tema u zadnjih nekoliko desetljeća, taj postotak se povećao.[4]

Prvo je opisana struktura ćelije u poglavlju 2 da bismo mogli opisati način rada u poglavlju 3 te strujno-naponsku karakteristiku u poglavlju 4. Nedostaci ovih vrsta ćelija i primjeri kako poboljšati učinkovitost i stabilnost su opisani u poglavlju 5, a u zadnjem poglavlju je navedena primjena (komercijalizacija).

2 Struktura

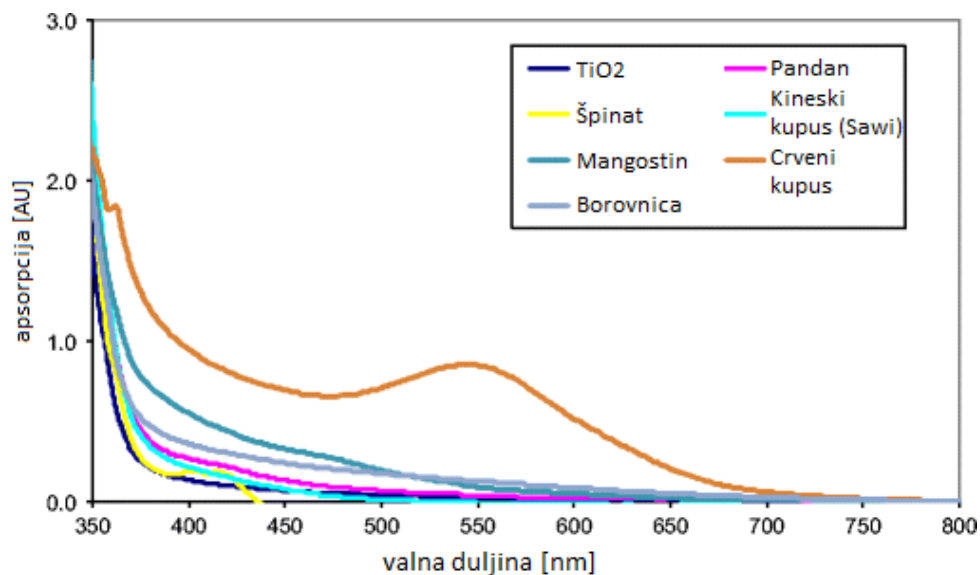
Komponente DDSC su prikazane na slici 1.



Slika 2. Komponente bojom senzibilizirane solarne ćelije.[5]

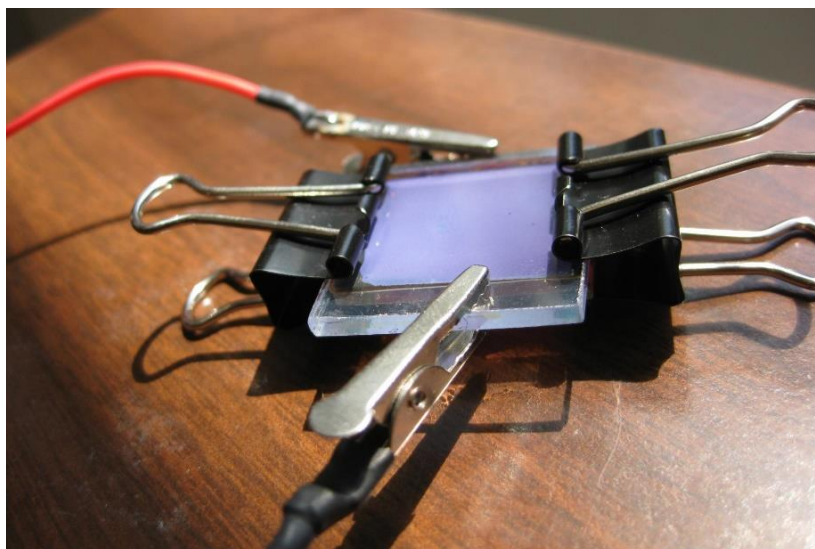
Prozirni sloj stakla s jedne strane je premazan filmom prozirnog vodljivog oksida jer se tako postiže nizak električni otpor. Međutim, tako smanjujemo prozirnost elektrode što znači da neće biti potpuno propusna u vidljivom i bliskom infracrvenom dijelu spektra. Poluvodič P-tipa (akceptorski tip) se postavlja na stranu radne elektrode. Pomoćna elektroda se prije sastavljanja ćelije mora obložiti katalizatorom koji će znatno ubrzati proces doniranja elektrona elektrolitu.

Za razliku od prethodnih generacija solarnih ćelija koje su koristile glomazne i nestabilne poluvodiče, bojom senzibilizirane solarne ćelije koriste poluvodiče (najčešće TiO_2 i ZnO_2) koji su otporni na fotokoroziju te su tako puno stabilniji. Ovi poluvodiči širokog pojasa energije mali dio upadne sunčeve svjetlosti apsorbiraju što znači da je učinkovitost pretvaranja svjetlosti u struju jako mala. Dokazano je da se povećanjem faktora hrapavosti fotoelektrode postiže visoka fotonaponska učinkovitost. Također je znatno doprinijelo povećanje efikasnosti fotosenzibilizatora koji mogu upijati široki spektar upadnog sunčevog zračenja. TiO_2 se često koristi zbog toga što mu je cijena niska, stabilan je, nije toksičan i jednostavan je za pripremu.



Slika 3. Apsorpcijski spektar nekoliko prirodnih boja (slika preuzeta s www.researchgate.net[6]).

Važnu ulogu imaju molekule organske boje koje su smještene na površini nanočestica fotoelektrode. One apsorbiraju upadno sunčevo zračenje. U početku su se koristili polipiridilni spojevi rutenija kao senzibilizatori, ali je ubrzo nakon otkriven potencijal ekstrakata prirodnih boja (bambus, kana, crna riža...). Crvena boja ili N3 boja postiže učinkovitost iznad 10%, ali je skupa kao i ostale neprirodne boje. Prirodne boje su mnogo jeftinije od do tada korištenih prijelaznih metala te je tako stvorena mogućnost za poboljšanjem efikasnosti smanjenjem troškova. Na slici 3. je prikazan graf apsorpcijskog spektra nekih prirodnih boja, možemo uočiti da svim bojama mogućnost apsorpcije opada od ultraljubičastog prema infracrvenom dijelu spektra, osim crvenom kupusu. 1997. je otkriveno da boja treba imati nekoliko karbonalnih ili hidroksilnih skupina, a primjer takve boje je boja dobivena iz *Rubus ursinus* (Kalifornijske kupine). Korištenjem boje kupine moguće je napraviti jednostavnu solarnu ćeliju kod kuće i taj primjer je prikazan na slici 4.



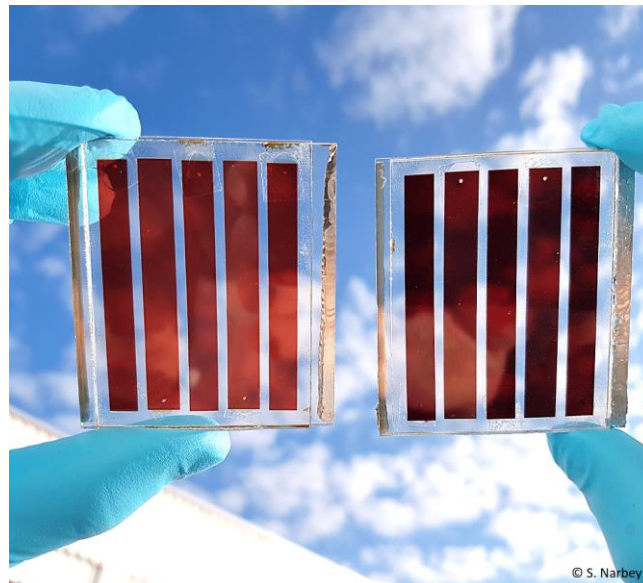
Slika 4. Bojom (soka kupine) senzibilizirana solarna ćelija (slika preuzeta s www.nisenet.org[7]).

Način na koji možemo povećati apsorpciju upadne svjetlosti te tako povećati učinkovitost DSSC-a jest dodavanjem energetskih relej boja. Njihovim dodavanjem povećavamo pretvorbu energije i povećavamo širinu pojasa apsorpcije. Daljnjim istraživanjima i testiranjima pokazan je značajan napredak, a to je 26% povećanje u učinkovitosti pretvorbe energije.

Regeneraciju oksidiranih molekula boje postižemo redoks ionima, a za to se najčešće koristi elektrolit koji sadrži I^-/I_3^- ione. Redoks ioni zatvaraju strujni krug te tako omogućavaju izmjenu elektrona između elektrode i pomoćne elektrode. Mješavine jodida otopljene u neprotionska otapala služe za stvaranje elektrolita. Zbog toga što viskoznost otapala utječe na vodljivost iona, preporučeno je koristiti otapala manje viskoznosti.[8]

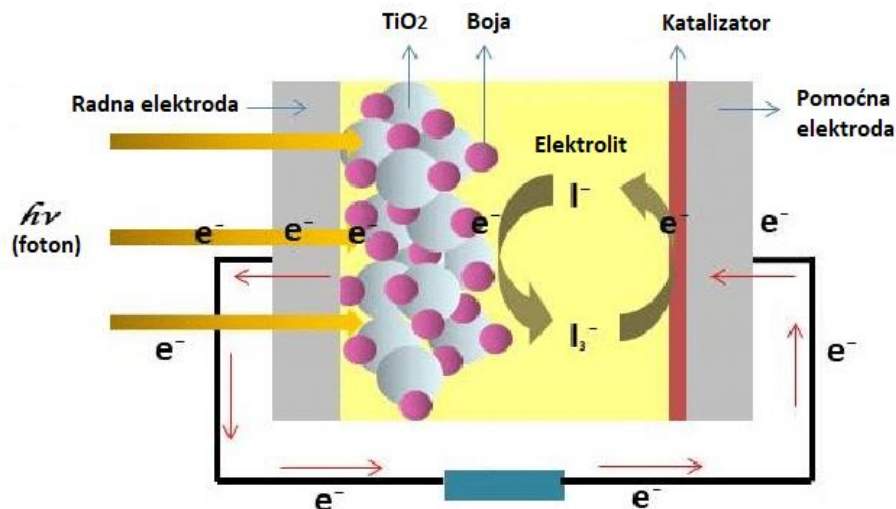
Staklena podloga se prekrije materijalom koji služi kao katalizator i katodni materijal te tako dobijemo pomoćnu elektrodu. Najbolji materijal zbog visoke učinkovitosti je platina, ali zbog visoke cijene često se koriste ugljične katode.[5]

U ovom dijelu je opisana struktura DSSC-a (slika 5.) i postavljen temelj za razumijevanje načina rada bojom senzibiliziranih solarnih ćelija što će biti detaljnije objašnjeno u sljedećem poglavlju.



Slika 5. Polupropusni bojom senzibilizirani mali solarni panel (slika preuzeta s www.pv-magazine.com[9]).

3 Način rada

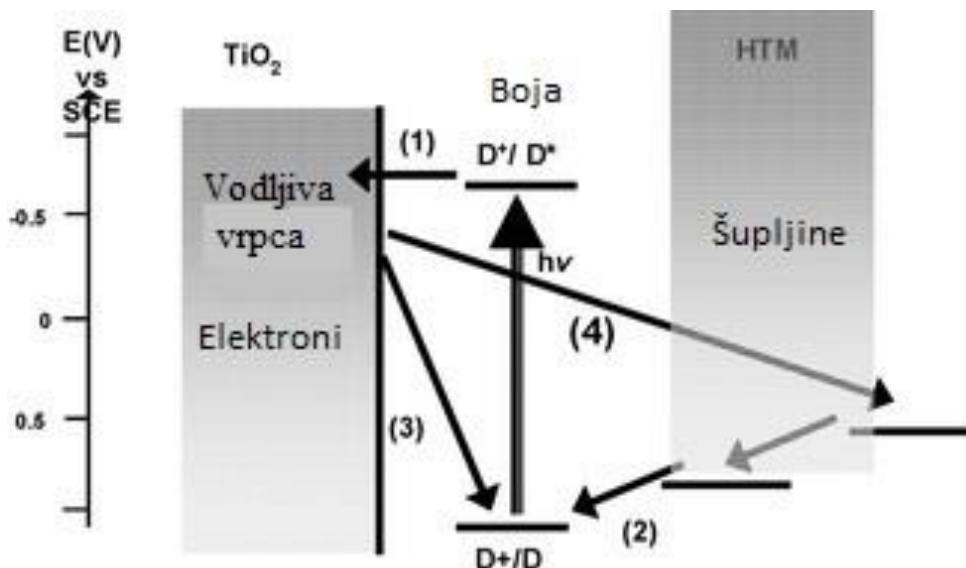


Slika 6. Prikaz načina rada bojom senzibiliziranih solarnih ćelija (slika preuzeta s www.researchgate.net[10]).

Dolazni fotoni sunčeve svjetlosti prolaze kroz propusni sloj vodljivog oksida (npr. ITO „In-doped tin oxide“-indij-kositar oksid, FTO „F-doped tin oxide“-fluor-kositar oksid i AZO „Aluminium-doped zinc oxide“-aluminij-cink oksid) i prozirno provodno staklo. Boja apsorbira fotone i prenosi jedan elektron iz najviše zauzete molekularne orbitale HOMO (eng. „highest occupied molecular orbital“) u najnižu nezauzetu molekularnu orbitalu LUMO (eng. „lowest unoccupied molecular orbital“), tj. dolazi do pobuđenja molekula boje. Visoka učinkovitost se postiže ako se HOMO nalazi u zabranjenom pojasu poluvodiča (zabranjeni pojas predstavlja energiju koja je potrebna elektronu da se oslobodi), a LUMO u vodljivom pojasu.

Zatim, kao što je prikazano na slici 6., pobuđeni elektron putuje od molekula boje, ostavljajući šupljine, do radne elektrode. Kretanje elektrona stvara električnu energiju koja se skuplja u trošilu. Šupljina se rekombinira sa elektronima iz iona elektrolita jer za nju ne postoje energetski kanali da prijeđe u sloj vodljivog oksida. Trijodid nam osigurava stalno kruženje elektrona jer regenerira jodide tako što prihvaća elektrone iz trošila.

Uvijek postoji vjerojatnost susreta elektrona i šupljina te njihove rekombinacije što smanjuje izlaznu električnu energiju DSSC-a. Shema procesa rekombinacije je prikazana na slici 7.[5]



Slika 7. Prikaz rekombinacije elektrona i šupljina (slika preuzeta s pubs.rsc.org[11]).

Napisane su kemijske reakcije za prethodno opisane procese.

Proces pobuđenja boje:



Proces ubacivanja elektrona u vodljivi pojas:



gdje je TiO_2 vodljivi oksid.

Proizvodnja energije:



gdje je p. e. pomoćna elektroda.

Regeneracija boje:



Redukcija I_3^- iona:



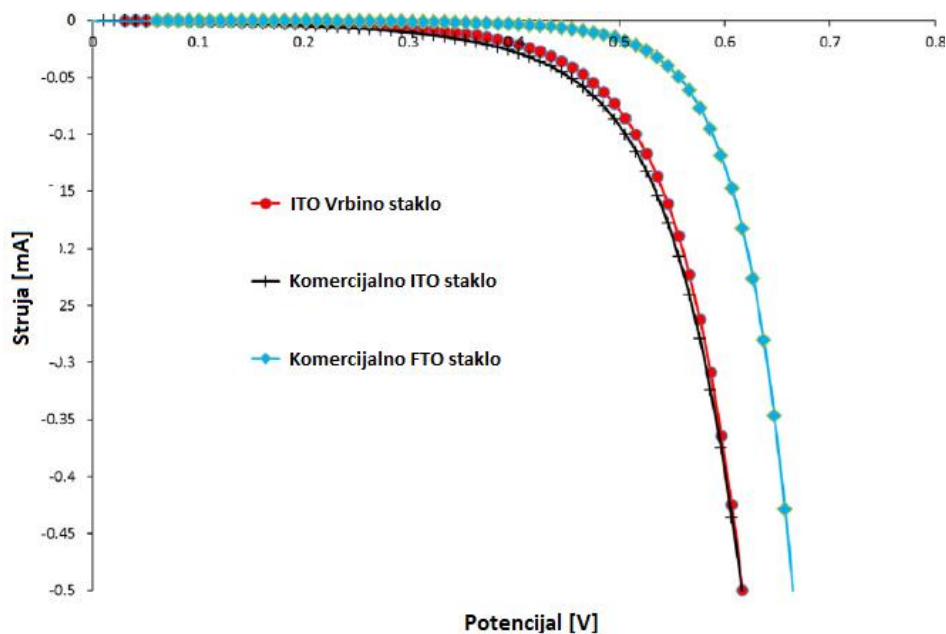
Da bi se postigla dugoročna stabilnost potrebno je usporiti proces rekombinacije i na taj način poboljšati učinkovitost stvaranja električne energije. Znanstvenik Haque i njegovi suradnici su u svom izvješću naveli da hibridna supermolekula pokazuje najbolje rezultate u odvajanju naboja. Korištenjem fotoelektroda (npr. TiO_2) koje sadrže cijev povećavamo brzinu prijenosa elektrona do anode (difuzije), a smanjujemo brzinu rekombinacije jer tako elektroni imaju direktan put do anode.

Tamna struja je posljedica rekombinacije (gubitka) elektrona sa šupljinama. Smanjenjem tamne struje povećavamo korisnost, a sljedeća jednačba povezuje potencijal otvorenog kruga sa strujom ubacivanja i tamnom strujom

$$V_{ok} = \frac{k_b T}{q} \ln \left(\frac{I_u}{I_t} + 1 \right), \quad (6)$$

gdje je V_{ok} potencijal otvorenog kruga, I_u struja ubacivanja/ubrizgivanja, I_t tamna struja, k_b Boltzmannova konstanta, T apsolutna temperatura ćelije i q električni naboj elektrona. Dakle, smanjivanjem tamne struje I_t povećavamo potencijal otvorenog kruga V_{ok} . [8]

Slika 8. prikazuje mjerenja tamne struje za različite vrste stakla i možemo vidjeti da komercijalno FTO staklo pokazuje najbolje rezultate od ostalih $V_{ok} = 0,789$ V (smanjuje brzinu rekombinacije), a da ITO vrbino staklo i komercijalno ITO staklo daju slične rezultate za V_{ok} . [12]



Slika 8. Mjerenja tamne struje za različite vrste stakla. [12]

4 Strujno naponska karakteristika

Grätzel je opisao učinkovitost pretvorbe fotonske energije u električnu energiju jednadžbom

$$\eta = \frac{I_{ks} \cdot V_{ok} \cdot FF}{I_0}, \quad (7)$$

gdje je I_{ks} struja kratkog spoja, V_{ok} napon otvorenog kruga, FF (eng. „fill factor“) faktor punjenja solarne ćelije i I_0 intenzitet upadnog sunčevog zračenja.

Učinkovitost pretvorbe upadnih fotona u električnu struju $IPCE$ (eng. „incident photon-to-current conversion efficiency“) opisana je jednadžbom

$$IPCE(\lambda) = \frac{1240 (eV \cdot nm) \cdot I_{ks} (\mu A/cm^2)}{\lambda (nm) \cdot I (\mu W/cm^2)}, \quad (8)$$

gdje je I intenzitet svjetlosti pri valnoj duljini apsorbiranih fotona λ .

$IPCE$ još možemo zapisati preko učinkovitosti prikupljanja svjetlosti LHE (eng. „light harvesting efficiency“), kvantnog prinosa injektiranja elektrona Φ_{inj} i učinkovitosti sakupljanja injektiranih elektrona na stražnjem kontaktu η_s

$$IPCE = LHE \cdot \Phi_{inj} \cdot \eta_s. \quad (9)$$

Dakle, $IPCE$ i LHE se izjednačavaju približavanjem Φ_{inj} i η_s 100%.

Zbog postojanja drugih radijacijskih i ne-radijacijski procesa, kvantni prinos Φ_{inj} približava se 100% samo ako su $(k_{rad} \text{ i } k_{nrad}) \ll k_{inj}$

$$\Phi_{inj} = \frac{k_{inj}}{k_{inj} + k_{rad} + k_{nrad}}, \quad (10)$$

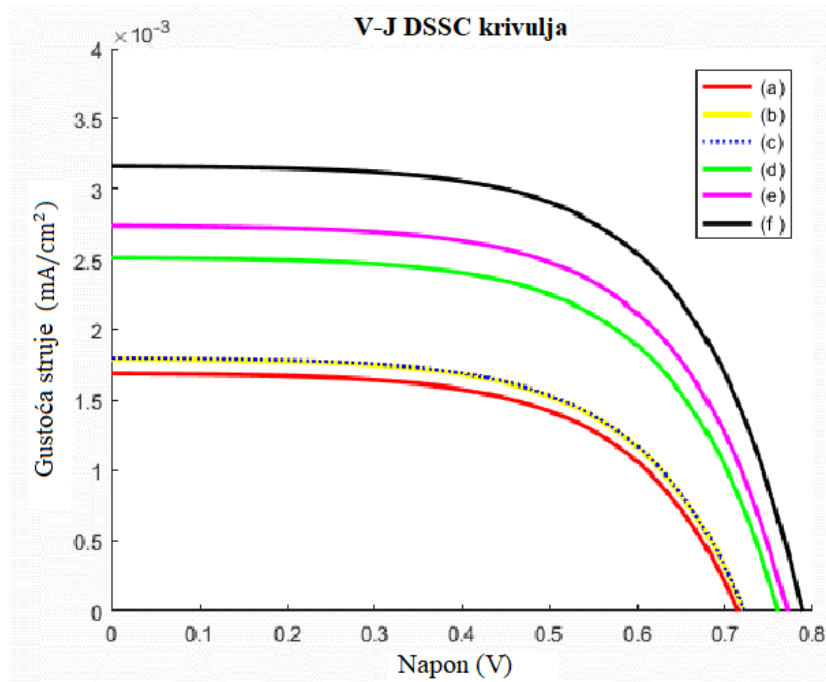
gdje je k_{inj} brzina injektiranja naboja, a k_{rad} i k_{nrad} brzine radijacijskih i ne-radijacijskih procesa.

Fermijevim zlatnim pravilom određujemo konstantu brzine injekcije elektrona k_{inj}

$$k_{inj} = \frac{4\pi^2}{h} \cdot |V|^2 \cdot \rho(E), \quad (11)$$

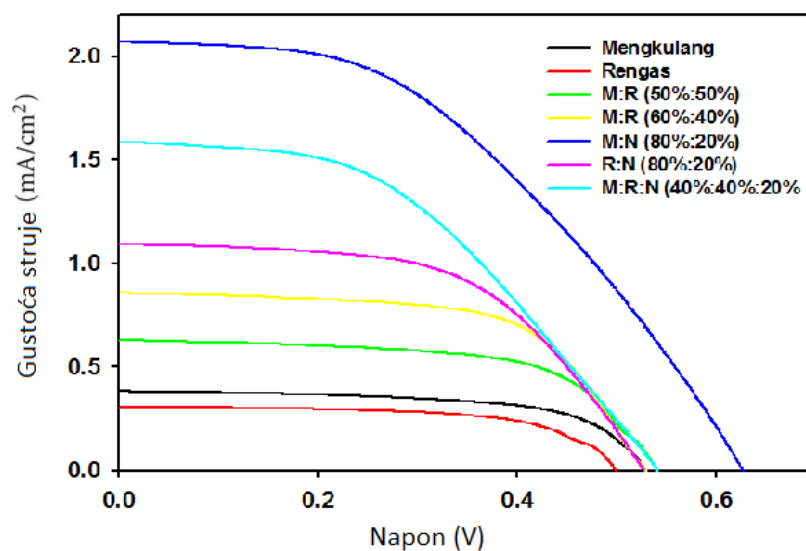
gdje je $|V|$ matrični element za spajanje elektrona i $\rho(E)$ gustoća akceptorskih stanja u vodljivom pojasu.[8]

Parametri FF , η , V_{ok} i I_{ks} se mjere pri uvjetima $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$, $I_0 = 100 \text{ mW/cm}^2$ i $SPD = \text{AM1.5G}$ (eng. „spectral power distribution“-spektralna raspodjela snage).[13]



Slika 9. Graf ovisnosti gustoće struje o naponu za različite prirodne boje.[14]

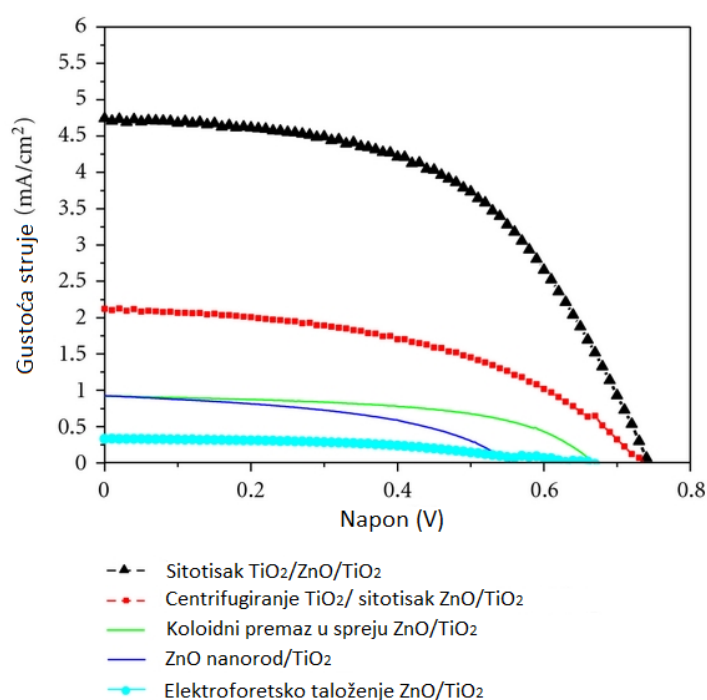
Na slici 9. je prikazan J-V graf za različite prirodne boje, a to su (a) kurkuma, (b) kava, (c) kava i kurkuma, (d) Phyllanthus Reticulatus Poir, (e) Piper Croacatum (f) Melaleuca Leucadendra (Kajaput drvo). Prirodne boje su nabrojane redoslijedom od najmanjeg do najvećeg potencijala. Dakle, najveći koeficijent upijanja upadne svjetlosti ima Melaleuca Leucadendra i može apsorbirati svjetlost velikih valnih duljina te tako proizvodi najviše električne struje. Način za povećanje apsorpcije solarne ćelije jest miješanje prirodnih boja.[14]



Slika 10. J – V graf za individualne boje, pomiješane boje i ko-senzibilizatore.[15]

Na slici 10. je prikazana ovisnost gustoće struje o naponu za individualne boje, pomiješane boje i ko-senzibilizirane boje. *N* je rutenijeva boja, *M* je stablo mengkulang i *N* je stablo rengas. Rutenijeva boja služi kao ko-senzibilizator (povećava raspon apsorpcije svjetlosti). Dakle, mješavina rutenijeve boje i mengkulanga ima najveću korisnost jer ima najveći raspon upijanja valnih duljina.[15]

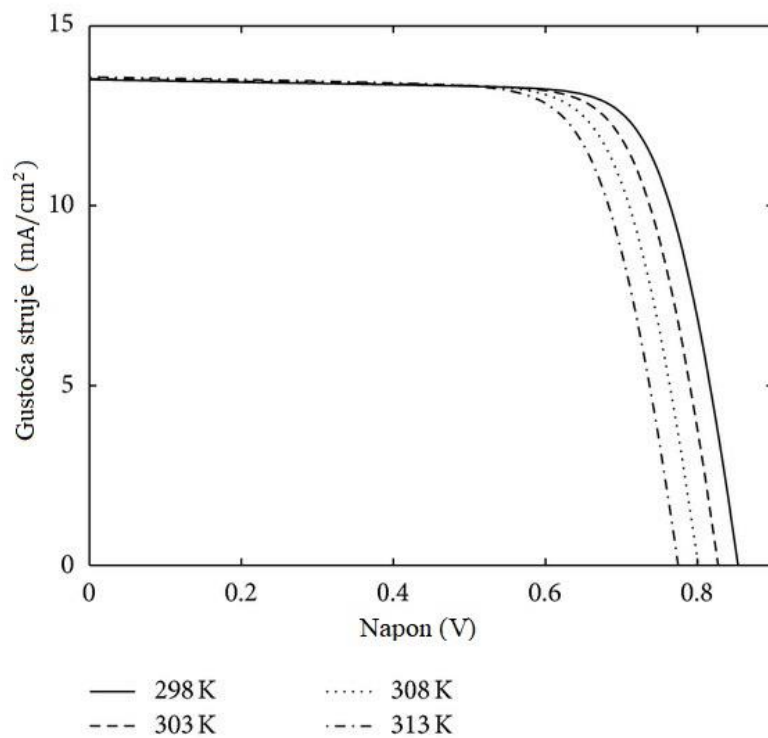
Još jedan način za poboljšavanje učinkovitosti DSSC-a jest izrada fotoanoda od dva ili više materijala. Na slici 11. je prikazan $J - V$ graf za fotoanodu izrađenu od ZnO (omogućuje brz prijenos elektrona) i TiO_2 (omogućuje visoku učinkovitost injektiranja TiO_2 elektrona iz boja na bazi rutenija). Najveću učinkovitost ima fotoanoda napravljena sitotiskom $TiO_2/ZnO/TiO_2$ zbog svoje ujednačene porozne strukture.[16]



Slika 11. $J - V$ graf DSSC-a za različito napravljene fotoanode od ZnO i TiO_2 . [16]

Temperatura je varijabla koja najviše utječe na stabilnost DSSC-a zbog stalne izloženosti suncu. Elektroliti mogu biti tekući ili čvrsti. Kod tekućih elektrolita se javlja problem niske temperature vrelišta. Degradacija DSSC-a može biti reverzibilna ili ireverzibilna.[17]

Sa slike 12. možemo vidjeti kako se gustoća struje J i napon V ponašaju na različitim temperaturama. Povećanje temperature utječe na brzinu rekombinacije generiranih elektrona sa šupljinama iz elektrolita zbog promjene viskoznosti tekućeg elektrolita koja linearno opada povećanjem temperature. Dakle, povećanjem temperature povećava se i pokretljivost iona u elektrolitu i time se povećava brzina rekombinacije te se smanjuju vrijednosti gustoće struje J i napona V . [18]



Slika 12. J – V graf DSSC za različite temperature.[19]

5 Nedostaci i kako poboljšati

Bojom senzibilizirane ćelije imaju brojne prednosti: jednostavan način rada, niska cijena u odnosu na druge solarne ćelije, to što mogu biti transparentne i u boji te tanka fleksibilna struktura omogućuju širok raspon mogućnosti primjene, mogućnost proizvodnje električne energije pri slaboj sunčevoj svjetlosti i u zatvorenom prostoru, manja težina, ne onečišćuju okoliš jer ne sadrže štetne tvari te su mogu reciklirati, itd.[20]

Iako imaju brojne prednosti te je dosta napretka ostvareno u zadnjih nekoliko godina, bojom senzibilizirane ćelije, kao i ostale solarne ćelije, imaju određene nedostatke.

Ograničenje stabilnosti DSSC-a dijelimo na ograničenje vanjske (ekstrinzične) i unutarnje (intrinzične) stabilnosti. Vanjska stabilnost se odnosi na stabilnost materijala za brtvljenje (npr. Surlyn) na kojeg utječe povećanje tlaka i cikličke promjene temperature. Nužno je povećati njihovu adheziju (prianjanje) sa staklom. Unutrašnja stabilnost DSSC-a se testira eksperimentom ubrzanog starenja jer tako vidimo toplinsku stabilnost boje, elektrolita i pomoćne elektrode. Taj test traje 1000 sati i odvija se pri uvjetima od 80 °C. Ovim eksperimentom je dokazano da je uređaj pri temperaturama 55 – 60 °C stabilan, ali povišenjem temperature i natapanjem se učinkovitost uređaja naglo smanjuje, a postizanje visokih temperatura tijekom sunčanih dana je neizbježno. Dakle, nužno je popraviti ove nedostatke kako bi se bojom senzibilizirane solarne ćelije mogle „mjeriti“ sa naprednijim solarnim ćelijama.

Primjeri kako poboljšati učinkovitost i stabilnost:

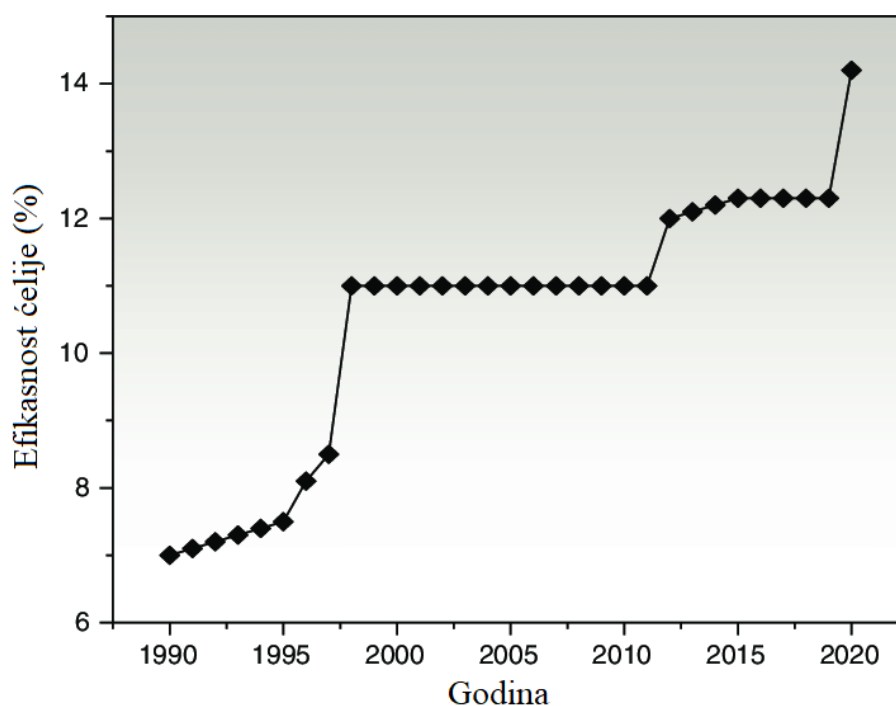
- Regeneracija treba biti brza kao i oksidacija boje kako bi oksidirana boja ostala u osnovnom stanju jer I^- ioni utječu na maksimalni fotonapon te trebaju biti blizu osnovnog stanja boje.
- Apsorpciju boje povećavamo povećavanjem poroznosti.
- Onemogućavanjem kontakta elektrolita sa staklom nanošenjem sloja TiO_2 preko stakla smanjujemo mogućnost pojave tamne struje.
- Ko-senzibilizacijom se povećava raspon apsorpcijskog spektra.
- Korištenjem npr. nanocijevi ili grafena u proizvodnji elektrolita, gel elektrolita... umjesto tekućeg, razvojem hidrofobnih senzibilizatora, itd. možemo značajno povećati učinkovitost ćelija.
- Dodavanjem energetskih relej boja povećavamo apsorpciju upadne svjetlosti.

Uvijek se cilja na to da DSSC bude što fleksibilnija, tanja, jeftinija, efikasnija, stabilnija i lakša jer se tako povećava potražnja za njima te se počinju primjenjivati u razne uređaje. Za velike napretke u učinkovitosti DSSC-a su zaslužni Michael Grätzel i njegovi suradnici.[4]

Prema Schokley-Quessier granici, maksimalna učinkovitost DSSC izložene upadnoj sunčevoj svjetlosti 1000 W/m^2 s spektrom distribucije AM1.5G jest 33,8%.

Najbolji rezultati se postižu mezoporoznom TiO_2 poluvodičkom elektrodom. Boje jako utječu na efikasnost ćelija te su organske boje preferirane. Jedni od najboljih rezultata se postižu ko-senzibilizacijom. U zadnjih nekoliko godina se često koriste redoks medijatori na bazi kobalta.[21]

Dakle, iako je napravljen veliki napredak u zadnjih nekoliko desetljeća, još uvijek postoje brojni nedostaci. S obzirom da popularnost DSSC-a s godinama raste za ne sumnjati je da će znanstvenici nastaviti raditi na povećanju njene efikasnosti i stabilnosti. Napredak efikasnosti u zadnja tri desetljeća je prikazan na slici 13.



Slika 13. Napredak u efikasnosti DSSC od 1990. do 2020. godine (slika preuzeta s www.researchgate.net[22]).

6 Primjena

Bojom senzibilizirane ćelije se sve više koriste zbog jednostavne proizvodnje i niske cijene u odnosu na druge vrste ćelija. Kompanije koje ne pripadaju kemijskom sektoru mogu ući u tržište razvoja DSSC proizvoda zbog toga što se DSSC razlikuju od ostalih solarnih ćelija. Popularni komercijalizirani DSSC proizvodi su svakodnevni elektronički uređaji. Neke kompanije su povećale performanse komponiranjem DSSC-a u različite uređaje.[23]



Slika 14. a) Ruksak za napajanje električnih uređaja (slika preuzeta s www.altenergymag.com[24]). b) Samonapajajuće slušalice (slika preuzeta s urbanista.com[25]).

2009. godine u Hong Kongu su prvi put DSSC primijenjene u komercijalne svrhe (slika 14.a). U ruksak je ugrađen solarni panel koji proizvodi električnu energiju za punjenje elektroničkih uređaja. Primjeri drugih primjena su: ugradnja u prozore za opskrbljivanje kuće električnom energijom, ugradnja u reklamne panoe, primjena u vojne svrhe (ugradnja u šatore i ostale tkanine) itd.[24]

Švedska kompanija Exeger je 2009. započela sa razvijanjem uređaja koji se sami opskrbljivaju pomoću DSSC-a, a to je moguće zahvaljujući materijalu Powerfoyle koji je fleksibilan. Do sada su sa nekoliko brendova zajedno razvili proizvode. Jedan od tih uređaja su slušalice u suradnji sa brendom Urbanista (slika 14.b) koje su ujedno prve samonapajajuće bežične slušalice na svijetu. Pomoću aplikacije korisnici mogu provjeravati kako koji intenzitet svjetlosti utječe na bateriju. Baterija se puni i u zatvorenom prostoru i dok je oblačno, a predviđeno je da bi prosječni korisnik imao pristup gotovo neograničenom vremenu slušanja glazbe.[26] Ovaj primjer komercijalizacije DSSC-a predstavlja mogući trend koji će kompanije u budućnosti pratiti.

7 Zaključak

Prelazak na obnovljive izvore energije je neizbježan, te su bojom senzibilizirane solarne ćelije, za sada, jedne od boljih alternativa. S obzirom na način na koji apsorbiraju sunčevu svjetlost, način rada se može usporediti s procesom fotosinteze. Struktura je također jako jednostavna, te su ove ćelije tanke i savitljive što im omogućava jako široku primjenu jer se mogu ukomponirati u brojne uređaje i predmete, a taj trend komercijalizacije DSSC-a je primjetan već godinama. Nažalost, stabilnost i efikasnost im još uvijek nisu dovoljno optimizirane, ali se svejedno ove ćelije smatraju budućnošću solarne energije. Teorijska maksimalna efikasnost prema Schokley-Queessier jest 33,8% (ovaj postotak varira ovisno o literaturi), a zahvaljujući istraživanju u zadnjih nekoliko desetljeća (s naglaskom na Grätzela i njegov tim), efikasnost DSSC-a je danas oko 14%. Jedni od najboljih rezultata su postignuti ko-senzibilizacijom jer se tako povećava raspon apsorpcije svjetlosti.

Bojom senzibilizirane solarne ćelije imaju manju efikasnost od solarnih ćelija prve i druge generacije, ali su jeftinije te će u budućnosti obnovljiva energija trebati biti dostupna svim ljudima. Pohranjivanje solarne energije je skupo, ali ona ima najviše potencijala pa je nužno istraživati i razvijati jeftinije varijante, a to su bojom senzibilizirane solarne ćelije.

8 Literatura

- [1] H. Ritchie & M. Roser, Our World in Data, *Fossil Fuels*, URL: <https://ourworldindata.org/fossil-fuels> (9. 5. 2022.).
- [2] Shahzad, Umair. (2015). *The Need For Renewable Energy Sources*.
- [3] S.N., Karthick & Hemalatha, Kuzhandaivel & Balasingam, Suresh kannan & Clinton, F. & Akshaya, S. & Kim, Hee-Je. (2019). *Dye-Sensitized Solar Cells: History, Components, Configuration, and Working Principle*. 10.1002/9781119557401.ch1.
- [4] Sharma K, Sharma V, Sharma SS. *Dye-Sensitized Solar Cells: Fundamentals and Current Status*. *Nanoscale Res Lett*. 2018 Nov 28;13(1):381. doi: 10.1186/s11671-018-2760-6. PMID: 30488132; PMCID: PMC6261913.
- [5] Jiao, Yang & Zhang, Fan & Meng, Sheng. (2011). *Dye Sensitized Solar Cells Principles and New Design*. 10.5772/21393.
- [6] *Performance of natural dyes as sensitizer in dye-sensitized solar cells employing LiBOB-based liquid electrolyte* - Scientific Figure on ResearchGate. URL: https://www.researchgate.net/figure/UV-Vis-adsorption-spectra-of-natural-dye-sensitized-TiO2-samples_fig2_318683046 (9. 5. 2022.)
- [7] NISE, *Dye Sensitized (Raspberry Juice) Solar Cell*, URL: https://www.nisenet.org/catalog/programs/dye_sensitized_raspberry_juice_solar_cell (9. 5. 2022.)
- [8] Jasim, Khalil. (2011). *Dye Sensitized Solar Cells - Working Principles, Challenges and Opportunities*. 10.5772/19749.
- [9] S. Narbey, SyMMES, URL: <https://www.pv-magazine.com/2020/12/11/semi-transparent-dye-sensitized-solar-module-with-8-7-efficiency/> (9. 5. 2022.)
- [10] Short review: *Natural pigments photosensitizer for dye-sensitized solar cell (DSSC)* - Scientific Figure on ResearchGate. URL: https://www.researchgate.net/figure/Working-principles-of-DSSC-DSSC-is-a-third-generation-of-solar-cell-discovered-by-ORegan_fig1_323537683 (30. 5. 2022.)
- [11] S. Handa, H. Wietasch, M. Thelakkat, J. R. Durrant i S. A. Haque, *Chemical Communications, Reducing charge recombination losses in solid state dye sensitized solar cells: the use of donor-acceptor sensitizer dyes*, URL: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2007/cc/b618700e#!divAbstract> (30. 5. 2022.)
- [12] Sheehan, Stephen & Surolia, Praveen & Byrne, Owen & Garner, Sean & Cimo, P & Li, Xinghua & Dowling, Denis & Thampi, K.. (2015). *Flexible glass substrate based DSSC*.
- [13] Prashant K. Baviskar, Babasaheb R. Sankapal, *Dye-sensitized solar cells*, *Energy Materials*, 2021, URL: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/photovoltaic-performance> (3. 6. 2022.)
- [14] E Supriyanto et al 2019 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 515 012048
- [15] Safie, Nur & Ludin, Norasikin & Hamid, Norul & M. Tahir, Paridah & Mat Teridi, Mohd Asri & Sepeai, Suhaila & Ibrahim, Mohd & Sopian, Kamaruzzaman. (2017). *Electron transport studies of dye-sensitized solar cells based on natural sensitizer extracted from rengas (Gluta spp.) and mengkulang (Heritiera elata) wood*. *BioResources*. 12. 9227-9243. 10.15376/biores.12.4.9227-9243.
- [16] Yan, L. & Wu, Fang-Lue & Peng, Lan & Zhang, Li-Juan & Li, Pu-Jun & Dou, Sui-Yang & Li, Tian-Xiang. (2012). *Photoanode of Dye-Sensitized Solar Cells Based on a ZnO/TiO2 Composite Film*. *International Journal of Photoenergy*. 2012. 10.1155/2012/613969.

- [17] Mehmood, Umer & Al-Ahmed, Amir & Al-Sulaiman, Fahad & Malik, Muhammad & Shehzad, Farrukh & Khan, Anwar. (2017). *Effect of temperature on the photovoltaic performance and stability of solid-state dye-sensitized solar cells: A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 79. 10.1016/j.rser.2017.05.114.
- [18] Kim, Ji Hoon & Moon, Kook & Kim, Jong Man & Lee, Dongyun & Kim, Soo. (2015). *Effects of various light-intensity and temperature environments on the photovoltaic performance of dye-sensitized solar cells*. Solar Energy. 113. 10.1016/j.solener.2015.01.012.
- [19] Tripathi, Brijesh & Yadav, Pankaj & Kumar, Manoj. (2013). *Effect of Varying Illumination and Temperature on Steady-State and Dynamic Parameters of Dye-Sensitized Solar Cell Using AC Impedance Modeling*. International Journal of Photoenergy. 2013. 10.1155/2013/646407.
- [20] Andualem, Anteneh & Negedu, Solomon. (2018). *Review on Dye-Sensitized Solar Cells (DSSCs)*. Journal of Heterocyclics. 29-34. 10.33805/2639-6734.103.
- [21] Boschloo, Gerrit. (2019). *Improving the Performance of Dye-Sensitized Solar Cells*. Frontiers in Chemistry. 7. 77. 10.3389/fchem.2019.00077.
- [22] *Advancements in the Development of Various Types of Dye-Sensitized Solar Cells: A Comparative Review - Scientific Figure on ResearchGate*. URL: https://www.researchgate.net/figure/Three-decade-efficiency-trend-of-DSSC-6-8-9_fig2_352099908 (4. 7. 2022.)
- [23] Susana Garcia Mayo. (2021). *Dye-Sensitized Solar Cells (DSSCs): the future of consumer electronics?*
- [24] Len Calderone, *Dye Sensitized Solar Cells Is The Future of Solar*, URL: <https://www.altenergymag.com/article/2019/12/dye-sensitized-solar-cells-is-the-future-of-solar/32431> (4. 6. 2022.)
- [25] Urbanista Los Angeles, URL: <https://urbanista.com/en-uk/products/los-angeles> (4. 6. 2022.)
- [26] Exeger, URL: <https://www.exeger.com/> (4. 6. 2022.)